



انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی

ماشین های کشاورزی



شماره ۳

جلد ۱۲

سال ۱۴۰۱

(شماره پیاپی: ۲۵)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

۲۵۵..... ساخت و ارزیابی ظروف سلولزی از کاه برنج با پوشش های طبیعی مهدی خوشدل، سید جعفر هاشمی، سید مجید ذبیح زاده، رضا اسماعیل زاده کناری

۲۶۷..... ارزیابی روش های مختلف به روی پشته بردن نیشکر در دو بافت خاک و سه سرعت پیش روی نسیم منجزی، محسن سلیمانی

۲۸۳..... $Al_2O_3 + Water$ با استفاده از نانوسیال MF 285 ترانکتور بهمن رحمتی نژاد، مهدی عباسقلی پور، بهزاد محمدی الستی

۳۰۲..... مطالعه تجربی و شبیه سازی سینتیک خشک شدن یونجه ساقه کوبی شده به روش دینامیک سیالات محاسباتی مریم دانا، پرویز احمدی مقدم

۳۲۱..... تحلیل انرژی موتور دیزل با استفاده از مخلوط های سوختی دیزل و بیودیزل حاوی نانو ذرات اکسید گرافن میثم اسحق پیر، محمد غلامی پرشکوهی، داوود محمدزمانی

۳۳۳..... بررسی تاثیر صفحه تنظیم کننده جریان خروجی بر عملکرد سیکلون آرد: مطالعات تجربی و شبیه سازی عددی احسان آقایی بدلیو، وحید رستم پور، عادل رضوانی وند فتانی، علی محمد نیکبخت

تأثیر سوخت های گازی و دمای مایع خنک کننده بر مشخصه های عملکردی و احتراقی یک موتور

۳۵۳..... تک سیلندر دیزل دور پایین بهرام صباحی، هوشنگ بهرامی، محمد جواد شیخ داودی، سید محمد صفی الدین اردبیلی، احسان هوشیار

۳۶۹..... ارزیابی اقتصادی اثر به کارگیری روش های مختلف خاک ورزی و تناوب زراعی در کشت گندم دیم سید محسن سیدان، احمد حیدری

بررسی تاثیر فشار بخار محرک بر روی عملکرد و جریان های بازگشتی ترمو کمپرسور کارخانه قند:

۳۸۱..... اعتبارسنجی و مطالعه عددی عادل رضوانی وند فتانی، علی حسن پور، علی محمد نیکبخت

۴۰۱..... اندازه گیری و آنالیز ارتعاش وارده به میوه در کف اتاق کامیون حین حمل و نقل در بزرگراه ها علی رمضان بکت، حسین نوید، میر جواد موسوی نیا، سجاد رنجبر

بهینه سازی تولید زیست گاز در هضم بی هوازی پسماندهای آلی جامد شهری با غلظت های

۴۱۱..... مختلف تحت پیش تیمارهای حرارتی سید مسعود کمالی، رضا عبدی، عباس روحانی، شمس الله عبدالله پور، سیروس ابراهیمی

مقالات مروری

تحلیل و ارزیابی شاخص های انرژی، اقتصادی و اثرات زیست محیطی سامانه های تولید محصولات باغی

۴۲۵..... و گلخانه ای در ایران با استفاده از روش PRISMA مرتضی زنگنه، نرگس بنائیان

نشریه ماشین های کشاورزی

با شماره پروانه ۸۹/۱۲۶۳۹ و درجه علمی - پژوهشی شماره ۳/۱۱/۳۷۸۱ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
۸۹/۶/۱۳ ۸۹/۳/۱۷

"بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند."

پاییز ۱۴۰۱

جلد ۱۲ شماره ۳

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی

سر دبیر: محمدحسین عباسپور فرد

استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

آق خانی، محمدحسین

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

ابونجمی، محمد

دانشیار- گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان (دانشگاه تهران)

پوررضا، علیرضا

گروه مهندسی بیولوژیک و کشاورزی (دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، آمریکا)

خوش تقاضا، محمدهادی

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه تربیت مدرس)

راجی، عبدالغنی

استاد- گروه مهندسی کشاورزی و محیط زیست، دانشکده فنی (دانشگاه ایبادان، نیجریه)

سعیدی راد، محمدحسین

دانشیار- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

سوپاکیت، سایاسونثرن

استادیار- دانشکده کشاورزی (دانشگاه کاستسارت، تایلند)

عباسپور فرد، محمدحسین

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

علیمردانی، رضا

استاد- گروه ماشین های کشاورزی (دانشگاه تهران- پردیس کرج)

عمادی، باقر

استاد مدعو- گروه مهندسی شیمی و بیولوژیک (دانشگاه ساسکاچوان، ساسکاتون، کانادا)

غضنفری مقدم، احمد

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شهید باهنر کرمان)

کدخدایان، مهران

استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

لغوی، محمد

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شیراز)

مدرس رضوی، محمدرضا

استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

نصیراحمدی، ابوذر

گروه مهندسی کشاورزی (دانشگاه کاسل آلمان)

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: مشهد- کد پستی ۹۱۷۷۵ صندوق پستی ۱۱۶۳

دانشکده کشاورزی- دبیرخانه نشریات علمی- نشریه ماشین های کشاورزی- نمابر: ۰۵۱۳۸۷۸۷۴۳۰

این نشریه در پایگاه های زیر نمایه شده است:

AGRICOLA، AGRIS، CABI، DOAJ، EBSCO، Google scholar، پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)، سامانه نشریات علمی، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)، مرجع دانش (CIVILICA)

پست الکترونیک: jame@um.ac.ir

مقالات این شماره در سایت <http://jame.um.ac.ir> به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

این نشریه به تعداد ۴ شماره در سال و به صورت آنلاین منتشر می شود.

مندرجات

مقالات پژوهشی

- 255 ساخت و ارزیابی ظروف سلولزی از کاه برنج با پوشش‌های طبیعی
مهدی خوشدل، سید جعفر هاشمی، سید مجید ذبیح‌زاده، رضا اسماعیل‌زاده کناری
- 267 ارزیابی روش‌های مختلف به روی پشته بردن نیشکر در دو بافت خاک و سه سرعت پیش‌روی
نسیم منجزی، محسن سلیمانی
- 283 ارزیابی تجربی انتقال حرارت رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از نانوسیال $Al_2O_3 + Water$
بهمن رحمتی‌نژاد، مهدی عباسقلی‌پور، بهزاد محمدی‌الستی
- 302 مطالعه تجربی و شبیه‌سازی سینتیک خشک شدن یونجه ساقه‌کوبی شده به روش دینامیک سیالات محاسباتی
مریم دانا، پرویز احمدی مقدم
- 321 تحلیل انرژی موتور دیزل با استفاده از مخلوط‌های سوختی دیزل و بیودیزل حاوی نانو ذرات اکسید گرافن
میشم اسحق‌پیره، محمد غلامی پرشکوهی، داوود محمدزمانی
- 333 بررسی تأثیر صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی بر عملکرد سیکلون آرد: مطالعات تجربی و شبیه‌سازی عددی
احسان آقایی بدلیو، وحید رستم‌پور، عادل رضوانی‌وند فنائی، علی محمد نیکبخت
- 353 تأثیر سوخت‌های گازی و دمای مایع خنک‌کننده بر مشخصه‌های عملکردی و احتراقی یک موتور تک سیلندر دیزل دور پایین
بهرام صباحی، هوشنگ بهرامی، محمد جواد شیخ داودی، سید محمد صفی الدین اردبیلی، احسان هوشیار
- 369 ارزیابی اقتصادی اثر به‌کارگیری روش‌های مختلف خاک‌ورزی و تناوب زراعی در کشت گندم دیم
سید محسن سیدان، احمد حیدری
- 381 بررسی تأثیر فشار بخار محرک بر روی عملکرد و جریان‌های بازگشتی ترموکمپرسور کارخانه قند: اعتبارسنجی و مطالعه عددی
عادل رضوانی‌وند فنائی، علی حسن‌پور، علی محمد نیکبخت
- 401 اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاش وارده به میوه در کف اتاق کامیون حین حمل‌ونقل در بزرگراه‌ها
علی رضوانی بوکت، حسین نوید، میرجواد موسوی‌نیا، سجاد رنجبر
- 411 بهینه‌سازی تولید زیست‌گاز در هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی جامد شهری با غلظت‌های مختلف تحت پیش‌تیمارهای حرارتی
سید مسعود کمالی، رضا عبدی، عباس روحانی، شمس‌الله عبدالله‌پور، سیروس ابراهیمی
- مقاله مروری
- 425 تحلیل و ارزیابی شاخص‌های انرژی، اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی سامانه‌های تولید محصولات باغی و گلخانه‌ای در ایران با استفاده از روش PRISMA
مرتضی زنگنه، نرگس بنائیان



Fabrication and Evaluation of Cellulose Containers from Rice Straw with Natural Coatings

M. Khoshdel¹, S. J. Hashemi^{2*}, S. M. Zabih Zadeh³, R. Esmailzadeh Kenari⁴

1- MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Sari University of Agricultural Science and Natural Resources

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Sari University of Agricultural Science and Natural Resources

3- Associate Professor, Department of Wood and Paper, Sari University of Agricultural Science and Natural Resources

4- Professor, Department of Food Sciences & Technology, Sari University of Agricultural Science and Natural Resources

(*- Corresponding Author Email: szhash@yahoo.com)

DOI: [10.22067/jam.2021.58650.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.58650.0)

Received: 13-06-2020

Revised: 01-09-2021

Accepted: 09-10-2021

Available Online: 09-10-2021

How to cite this article:

Khoshdel, M., S. J. Hashemi, S. M. Zabih Zadeh, and R. Esmailzadeh Kenari. 2022. Fabrication and Evaluation of Cellulose Containers from Rice Straw with Natural Coatings. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 253-264. (In Persian).

DOI: [10.22067/jam.2021.58650.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.58650.0)

Introduction

The use of agricultural waste to produce biodegradable containers is an appropriate option to solve the problem of biomass accumulation resulting from the cultivation of crops such as rice. The highest amount of agricultural waste compared to the area under cultivation is related to wheat straw and rice straw, respectively. After wheat, rice is the most important agricultural product in human nutrition. According to the World Food Organization, the area under rice cultivation in the world is about 150 million hectares. The use of rice straw as a raw material for disposable cellulosic dishes can prevent straw residues in paddy fields, improve the deficiency of cellulosic raw materials, and reduce the use of plastic containers and the dangers thereof. Rice straw is a significant source for making cellulosic containers, but after making containers, hydrophobicity and microbial hazards can be among the problems of making these types of containers. The coating technique is one of the best solutions for resolving hydrophobicity and microbial problems. Coverage is very important and necessary to increase the shelf life of agricultural products and maintain their quality. Waxes are the best preventative methods against moisture and water vapor loss, and beeswax is one of the best edible waxes with these properties. The antibacterial properties of coatings with natural antioxidants will help solve the cellulose containers' problem. The main objectives of this study were to evaluate the endurance, hydrophobicity and antimicrobial activity of rice straw degradable cellulosic dishes.

Materials and Methods

In order to obtain the raw material for the manufacture of cellulosic dishes, the straw was digested with 10% and 20% sodium hydroxide, and then to weigh the hydrophobicity tests, tensile strength index and brightness, 120 Gr paper was made. Concentrations of 1, 2, 5 and 10% of the wax solution in ethanol solution were prepared and used as the first coating to improve the hydrophobicity. The nettle extract encapsulated with royal seed gum as the second coating to improve the antibacterial activity. Hydrophobicity and antimicrobial properties of the samples were measured and compared. The cup mold specimen was made of 2-piece steel and made using appropriate rice straw paste and coating with the appropriate concentration of the sample in disposable cellulose.

Results and Discussion

The results showed that increasing the amount of sodium hydroxide in baking conditions increased the tensile strength and the degree of clarity, but it had no effect on hydrophobicity. As the concentration of baking soda (sodium hydroxide) increases, so does the brightness. Increasing the concentration of sodium hydroxide increases the tensile strength, and the increase in tensile strength due to the increase in the percentage of sodium hydroxide can be due to the increase in the ability to form bonds between fibers due to the release of lignin. Honey wax with a 5% concentration was the most optimal coating for hydrophobic cellulose containers. With increasing wax concentrations in ethanol solvents from 1 to 10 percent, water absorption by the paper made from rice straw has decreased by approximately 93 percent. Adding royal seed gum and nettle extract has a positive effect on the diameter of the halo and has antimicrobial properties. Honey wax with 5% and 10% concentration with nano-encapsulated nettle extract with royal seed gum was selected as the most suitable coating to improve antibacterial activity.

Conclusion

Due to the characteristics of rice straw and the experiments shown, rice straw can be considered as a suitable alternative to oil resources in the production and usage of disposable tableware. Rice straw has the potential to be used as a cellulose source for the production of disposable containers, and honey wax with a 5% concentration and nano-encapsulated nettle extract can improve the hydrophobic and antimicrobial properties as the airtight coating of the dishes.

Keywords: Disposable dishes, Honey wax, Hydrophobic, Nettle, Rice straw

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۲۶۴-۲۵۳

ساخت و ارزیابی ظروف سلولزی از کاه برنج با پوشش‌های طبیعی

مهدی خوشدل^۱، سید جعفر هاشمی^{۲*}، سید مجید ذبیح‌زاده^۳، رضا اسماعیل‌زاده کناری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷

چکیده

استفاده از ضایعات کشاورزی برای تولید ظروف، یکی از گزینه‌های مناسب برای حل مشکل انباشت زیست‌توده ناشی از کشت محصولاتی همچون برنج است. به کارگیری کاه برنج به عنوان ماده اولیه ظروف سلولزی یک‌بار مصرف علاوه بر جلوگیری از ماند کاه در شالیزارها، می‌تواند موجب بهبود مشکل کمبود مواد اولیه سلولزی، کاهش استفاده از ظروف پلاستیکی و خطرات ناشی از آن شود. ساخت و ارزیابی استقامت، میزان آبگریزی و خاصیت ضد میکروبی ظروف سلولزی تجزیه پذیر کاه برنج از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد. کاه در هاضم با سدیم هیدروکسید ۱۰ و ۲۰ درصد به منظور به دست آوردن ماده اولیه ساخت ظروف سلولزی، پخته و سپس برای گرفتن آزمون‌های آبگریزی، شاخص مقاومت به کشیدگی و درجه روشنایی، کاغذ با گراماژ ۱۲۰ ساخته شد. غلظت‌های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد از محلول موم-اتانول به عنوان پوشش اولیه برای بهبود آبگریزی و عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی به عنوان پوشش دوم برای بهبود خاصیت ضد باکتریایی استفاده شد. میزان آبدوستی و خاصیت ضد میکروبی نمونه‌ها سنجش و مقایسه گردید. قالب لیوان از فولاد دو تکه ساخته و با استفاده از خمیر مناسب کاه برنج و پوشش با غلظت مناسب نمونه ساخته شد. نتایج نشان داد افزایش مقدار سدیم هیدروکسید از ۱۰ به ۲۰ درصد در شرایط پخت موجب افزایش شاخص مقاومت به کشیدگی از ۴۰/۳۴ به ۴۳/۵ N.m g⁻¹ و درجه روشنی از ۴۳/۴۱ به ۴۵/۱۳ می‌شود. افزایش سدیم هیدروکسید بر میزان آبدوستی تاثیر معنی‌داری نداشت. همچنین غلظت ۵ درصد موم عسل به همراه عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی با ۳۷/۲۲ میلی لیتر جذب آب و قطر هاله ۴/۶۳ میلی متر بهینه ترین پوشش به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آبگریزی، ظروف یک‌بار مصرف، کاه برنج، گزنه، موم عسل

مقدمه

افزایش جمعیت، توسعه فرهنگی و هوشیاری جوامع بشری در خصوص ضرورت کاهش استفاده از مواد سنتزی و مصنوعی و وابسته به صنایع پتروشیمی با هدف کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، همگی عوامل تقویت کننده رشد روند استفاده از منابع طبیعی و زیست تخریب پذیر در صنعت است (Jahanshahi, et al., 2016). ظروف یک‌بار مصرف به اشکال مختلف پلاستیکی، فومی، کاغذی و گیاهی تولید می‌گردند. در بعضی از موارد به جای استفاده از پلیمرهای

مصنوعی، ظروف کاغذی با لایه‌هایی از موم یا رزین‌های طبیعی پوشانده می‌شود و تحت این شرایط ظروف اثرات منفی کمتری بر روی ماده غذایی یا آشامیدنی باقی می‌گذارند (Blomstedt and Mitikkae, 2007). ظروف کاغذی در مقایسه با کالاهای مشابه نظیر ظروف پلاستیکی به لحاظ زیست‌محیطی از جذابیت بیشتری برای عموم مردم برخوردار می‌باشند. چوب به علت قابلیت دسترسی و خواص کاربردی، منبع غالب در تأمین خمیر کاغذ استفاده شده در تولید ظروف کاغذی می‌باشد و در مقیاس جهانی حدود ۹۰٪ فرآورده‌های کاغذی از چوب تولید می‌شوند (Hurter and Eng, 1998). در این راستا از انواع منابع الیافی مانند جنگل‌های مصنوعی از درختان سریع‌الرشد و یا الیاف منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی به دست آمده از پسماندهای کشاورزی، برای تأمین ماده اولیه استفاده می‌شود (Sjostrom, 1993). کاهش جنگل‌ها بر اثر عوامل تخریب کننده و بهره‌برداری بیش از حد، محققان را بر آن داشته تا از منابع دیگری برای تهیه خمیر کاغذ و فرآورده‌های آن استفاده نمایند (Kamrani et al., 2011). از جمله پسماندهای مهم کشاورزی می‌توان به کاه و کلش به جا مانده از کشت برنج و از مزایای عمده کاه و کلش در صنعت خمیر کاغذ می‌توان به مقدار کم لیگنین آن اشاره کرد زیرا

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- دانشیار گروه چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۴- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: szhash@yahoo.com

DOI: 10.22067/jam.2021.58650.0

(Mortazavian et al., 2011).

خاصیت ضدباکتریایی پوشش‌هایی با آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی، به حل مشکل ظروف سلولزی کمک شایانی کرده است. آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی استخراج شده از گیاهان دارویی، جزو مهم‌ترین ترکیبات زیست‌فعال هستند که می‌توانند در تولید مواد غذایی مورد استفاده قرار بگیرند و موجب جلوگیری از اکسیداسیون و افزایش ماندگاری مواد غذایی حساس به اکسیژن شوند (Besbes et al., 2004). گزنه با نام علمی *Urtica dioica* L. و از تیره *Urticaceae* یکی از گیاهان دارویی بومی ایران است که به‌عنوان منبع مهم آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی، در نواحی شمال کشور به وفور یافت می‌شود (Niknejad and Asgharian 2015). ترکیبات فنلی موجود در گزنه بر جلوگیری از رشد باکتری‌هایی مثل *شریشیاکلی*^۱، *پروتئوس و لگاریکوس*^۲، *کلیسیلا*^۳ و *پسودوموناس*^۴ موثر است و آن خاصیت آنتی‌بیوتیکی داشته و نیز باعث وقفه در رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها شده است (Al ebrahim et al., 2019). عصاره‌های طبیعی در حضور نور، رطوبت، اکسیژن و دماهای بالا، فرار و ناپایدار هستند و ریزپوشانی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای مورد استفاده در بهبود پایداری خواص عصاره‌های طبیعی، جلوگیری از برهم‌کنش‌های نامطلوب آن‌ها با ترکیبات غذاها و بهبود طعم و مزه غذا و همچنین افزایش فعالیت بیولوژیکی آن‌ها (ضدمیکروبی، ضدقارچی و آنتی-اکسیدانی) است. در واقع طی ریزپوشانی مواد هسته (عصاره گزنه) توسط مواد دیواره که می‌توانند انواعی از پروتئین‌ها، پلی‌ساکارید و یا لیپیدها باشند، احاطه و در برابر عوامل خارجی محافظت می‌شوند (Li et al., 2014).

کپسول‌ها از نظر اندازه، در سه دسته: ماکرو (بالا تر از ۱ میلی‌متر)، میکرو (۱-۱۰۰۰ میکرومتر)، نانو (۱-۱۰۰۰ نانومتر) تقسیم می‌شوند (Jafari et al., 2008). کاهش اندازه ذرات به دلیل افزایش سطح به‌ازای واحد حجم، می‌تواند ویژگی‌های حلالیت مواد مغذی، فعالیت بیولوژیکی و ماندگاری را بهبود ببخشد (Sheqokar and Müller, 2010).

موسیلاژها^۵ یا لیزاب‌های دانه‌ای و پلی‌ساکاریدهای گیاهی به علت دسترسی آسان و قیمت مناسب اهمیت ویژه‌ای در ریزپوشانی دارند و در غلظت‌های کمتر از ۱ درصد به‌شدت ویژگی‌های بافتی محصول را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Phillips and Williams, 2000). گیاه شاهی یا تخم‌تره‌تیزک با نام علمی *لیپیدیوم ساتیوم* (*Lepidium Sativum*) از تیره شب‌بوینان و خانواده کروسیفرا

گیاهان غیرچوبی لیگنین کمتری در مقایسه با چوب دارند. لیگنین کمتر سبب لیگنین‌زدایی راحت‌تر می‌شود و این مواد بسیار آسان‌تر و با انرژی کمتر به خمیر کاغذ تبدیل می‌شوند (Rowell, 1996). برنج پس از گندم مهم‌ترین محصول کشاورزی از نظر تغذیه انسان محسوب می‌شود. بر اساس آمار سازمان خوار و بار جهانی، سطح زیر کشت برنج در دنیا در حدود ۱۵۰ میلیون هکتار می‌باشد و در سال ۲۰۱۸ میزان برداشت برنج در جهان به ۱۷۷ میلیون تن رسید (FAO, 2018).

سهم ایران از نظر سطح زیر کشت برنج حدود ۰/۴ درصد کل سطح زیر کشت برنج در جهان می‌باشد (FAO, 2018). استان‌های مازندران و گیلان به‌ترتیب مقام‌های اول و دوم را به‌خود اختصاص می‌دهند (Ivani et al., 2015). کاه برنج به‌منظور استفاده به‌عنوان ماده اولیه ساخت ظروف می‌بایست به خمیر تبدیل شود و روش‌های متنوعی شامل روش مکانیکی، شیمیایی و شیمیایی-مکانیکی برای خمیرسازی از کاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش مکانیکی، فشار عامل اصلی باز شدن الیاف کاه است و خمیر حاصل از این روش کیفیت مناسبی ندارد. خمیر سازی در روش شیمیایی-مکانیکی راندمان کمتری نسبت به روش مکانیکی داشته و کاغذ حاصل از آن در صنعت روزنامه استفاده می‌شود. خمیرسازی به روش شیمیایی کاربرد فراوانی در صنعت داشته و در تولید خمیر مناسب جهت تولید کاغذهای تحریر کاربرد دارد (Sjostrom 1993). روش‌های پخت شیمیایی متفاوتی از جمله کرافت، سودا و هیدروکسید پتاسیم در صنعت استفاده می‌شود که پخت سودا مناسب‌ترین روش برای کاه و کلش برنج می‌باشد (Vickers 2017).

کاه برنج منبع قابل توجهی جهت ساخت ظروف سلولزی محسوب می‌شود اما پس از ساخت ظروف، آبدوستی و میکروبی بودن، می‌تواند از جمله مشکلات ساخت این نوع ظروف باشد. پوشش‌دهی یکی از راه‌حل‌های مناسب جهت حل مشکلات آبدوستی و میکروبی می‌باشد. بهبود ظاهر، صافی، مقاومت نسبت به مایعات مختلف و رطوبت و همچنین قابلیت چاپ‌پذیری از دلایل استفاده از روش پوشش‌دهی در صنایع کاغذسازی است (Monfared et al., 1997). به‌علاوه، برای جلوگیری از نفوذ مایع به داخل کاغذ، ظروف با یک فیلم پلاستیکی نازک، پلی‌اتیلن (PE)، اسید پلی‌لاکتیک (PLA) یا موم پوشانده می‌شود (van der Harst et al., 2013). پیوند قوی بین سلولز و پوشش‌های پلاستیکی، بازیافت کاغذ را به چالش می‌کشد (Starbucks Corporation, 2019). از جمله پوشش‌دهنده‌های طبیعی می‌توان به پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها، پلی‌استرها (پلی‌لاکتیک‌اسید و پلی‌وینیل الکل) و لیپیدها (موم) اشاره کرد. موم‌ها بهترین ممانعت‌کننده در برابر رطوبت و بخار آب هستند و موم‌زنبور عسل از بهترین موم‌های خوراکی با این خواص می‌باشد

1- *Escherichia coli*

2- *Proteus vulgaris*

3- *Klebsiella*

4- *Pseudomonas*

5- Mucilage

$$MC_{GR} = \frac{M_h - M_o}{M_h} \times 10 \quad (۱)$$

در این رابطه MC_{GR} بیانگر رطوبت کاه برنج (درصد)، M_h بیانگر جرم مرطوب کاه برنج (گرم) و M_o نشان‌دهنده جرم خشک کاه برنج (گرم) است.

کاه برنج با روش پخت سودا به خمیر تبدیل شد (Vickers, 2017). در این پژوهش، غلظت مایع پخت شامل سدیم‌هیدروکسید و آب مقطر، به‌عنوان فاکتورهای متغیر در فرایند تولید خمیر کاغذ در نظر گرفته شد. پخت A و B به‌ترتیب با میزان ۲۰ و ۱۰ درصد سدیم‌هیدروکسید و نسبت ۱ به ۱۰ کاه به مایع پخت انجام شد. سایر پارامترهای پخت شامل زمان آغشته‌سازی و درجه حرارت به‌صورت ثابت و به‌ترتیب ۳۰ دقیقه و ۱۷۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد.

پالایش خمیر با دستگاه پالایشگر PFI آزمایشگاهی مطابق با استاندارد T 227-OM-92 آیین‌نامه TAPPI، ساخت کاغذ دست‌ساز به‌منظور انجام آزمایش‌های مقاومت‌سنجی، آزمون درجه‌ی روشنایی و آبگریزی، بر طبق استاندارد شماره 205 sp-02 دستورالعمل TAPPI، درجه روشنایی کاغذهای دست‌ساز طبق استاندارد T 403 omt-97 و اندازه‌گیری شاخص مقاومت به کشیدگی مطابق با استاندارد T 494 om-01 دستورالعمل TAPPI اندازه‌گیری شد.

از پوشش موم به‌منظور بهبود آبگریزی ظروف استفاده شد برای ساخت محلول موم-اتانول، موم‌ها به قطعات ریزتری تبدیل شدند و سپس ۲۵ گرم از موم با ۲۵۰ میلی‌لیتر محلول اتانول و متانول ۸۰ درصد به‌طور جداگانه مخلوط و به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق با دستگاه ساتریفیوژ (۱۵۰ دور در دقیقه) تکان داده شد، عصاره الکلی حاصل توسط کاغذ صافی واتمن شماره یک صاف شده و الکال آن تبخیر و عصاره الکلی خالص به‌دست آمد (Afhmi and Ahmadi, 2017). محلول موم و اتانول با غلظت‌های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد تهیه و بر روی کاغذهای ساخته‌شده پوشش داده شد. کاغذهای پوشش داده شده به مدت ۱ ساعت در هوای اتاق به‌منظور خروج اتانول از پوشش، قرار داده شدند.

ایزاری استوانه‌ای شکل بر اساس استاندارد T432 آیین‌نامه TAPPI ساخته و میزان آبدوستی کاغذهای پوشش داده شده به‌وسیله آن اندازه‌گیری شد. این ابزار متشکل از یک لوله به قطر داخلی ۱۱ سانتی‌متر و یک صفحه است که به زیر این لوله به‌وسیله پیچ و مهره به‌منظور آب‌بند شدن متصل شد. نمونه کاغذ مورد نظر ما بین این لوله و صفحه قرار گرفته و در استوانه آب ریخته شد. میزان جذب آب در زمان، دمای محیط و مقدار آب مشخص اندازه‌گیری و به‌عنوان مقدار جذب آب ثبت شد. صمغ دانه شاهی استخراج و عصاره‌ی گزنه با صمغ دانه‌ی شاهی ریزپوشانی شد (Dehghan et al., 2018) و به‌عنوان پوشش دوم بر روی کاغذ استفاده گردید. خاصیت ضدباکتریایی کاغذهای پوشش داده شده با حضور باکتری

(Cruciferae) به‌عنوان یک منبع طبیعی کربوهیدرات بوده و حاوی مقدار بسیار زیادی ترکیبات موسیلاژیست (Alirezalo et al., 2019). با توجه به فراوانی و بومی بودن گیاه شاهی، استفاده از آن به‌عنوان پوشاننده می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

ساخت یک نمونه ظرف از خمیر کاه برنج پس از استخراج خمیر، با مشخصه‌های مقاومت به کشیدگی و درجه‌ی روشنایی مناسب و بررسی بهبود خواص آبگریزی و ماندگاری ظرف با پوشش‌دهی موم عسل و عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

کاه برنج (رقم طارم هاشمی) مورد استفاده در این تحقیق از زمین شالیزاری آمل-مازندران، گزنه از ارتفاعات شهرستان آمل و دانه‌های شاهی (*Lepidium sativum*) که از راسته کلم سانان و تیره شب بویان است از عطاری در مازندران تهیه شد و جهت حذف مواد خارجی نظیر خاروخاشاک، سنگ، دانه‌های شکسته و کاه به شیوه دستی تمیز شدند.

در این تحقیق صمغ دانه شاهی در شرایط بهینه (نسبت آب به دانه به‌ترتیب ۱ به ۳۰، دما ۳۵ درجه سانتی‌گراد و pH=۱۰) استخراج شد (Karazhiyan et al., 2011).

برای استخراج عصاره به روش تقطیر با آب (کلونجر)، ۵۰ گرم از پودر گزنه خشک شده را درون بالن ریخته و بعد به آن آب مقطر اضافه شد تا حدی که سطح پودر نمونه را کاملاً پوشاند. استخراج در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای جوش آب) و به مدت ۴ ساعت (تا زمانی که کلیه اسانس از نمونه خارج شود) انجام شد، سپس اسانس حاصل تا زمان آنالیز، در فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد (Nikkhah et al., 2009).

صمغ‌های دانه شاهی و عصاره گزنه به‌عنوان مواد پوششی دیواره به‌صورت جدا و ترکیبی به نسبت ۱:۱ استفاده شدند. صمغ و عصاره برای رسیدن به ماده جامد کل ۱ درصد (با توجه به تست invitro)، در آب دیونیزه با نسبت ۱٪ (w/w) مخلوط شدند. از همزن مغناطیسی به مدت نیم ساعت در دمای محیط برای انحلال بهتر ترکیبات استفاده شد. محلول‌ها جهت تکمیل فرآیند جذب آب به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری شدند. تهیه نانوامولسیون به روش رضوی زاده و همکاران انجام گرفت (Razavizadeh et al., 2014).

کاه با استفاده از استاندارد T 275 om-85 آیین‌نامه TAPPI^۱ آماده شد و رطوبت از رابطه (۱) محاسبه گردید.

پوشش‌دهی با عصاره‌ی گزنه ریزپوشانی شده، نمونه قالب یک ظرف (لیوان) ساخته شد. ساخت قالب به صورت ۲ تکه، از جنس فولاد و به صورت پرس هیدرولیکی انجام شد (شکل ۱). پرس در دمای محیط و فشار هیدرولیکی ۳ بار توسط یک جک هیدرولیکی ۵ تنی انجام شد. پس از پرس نمونه به مدت ۸ ساعت در دمای محیط خشک شدند.



شکل ۱- قالب ساخته شده برای ساخت یک لیوان و نمونه لیوان ساخته شده

Fig.1. The fabricated mold to make a cup and a sample of the forged cup

در جدول ۱ نتایج حاصل از میانگین‌ها اثر تغییر شرایط پخت بر درجه روشنی و شاخص مقاومت به کشیدگی در کاغذهای ساخته شده، ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۱ اثر شرایط پخت بر میزان شاخص مقاومت به کشیدگی و همچنین بر درجه روشنی معنی‌دار و تاثیرگذار است.

جدول ۱- میانگین مربعات و انحراف معیار بر حسب نوع پخت روی مقاومت به کشیدگی و درجه روشنی

Table 1- Means of square and Std. deviation of baking type on the tensile strength and brightness

منابع تغییرات Sources of variations	میانگین مربعات Mean of square	
نوع پخت Type of baking	مقاومت به کشیدگی Tensile strength N.m.g ⁻¹	درجه روشنی Brightness
پخت A Baking A	43.51±0.743 ^b	45.136±0.021 ^a
پخت B Baking B	40.34±1.080 ^a	43.413±0.211 ^b

اثر شرایط پخت بر میزان جذب آب در کاغذهای دست‌ساز ساخته شده معنی‌دار نشد که بی تاثیر بودن غلظت مایع پخت بر میزان آبگریزی کاغذ ساخته شده را نشان می‌دهد. تکرار نیز در نمونه‌های

اشریشیاکلی (*Escherichia coli*) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کاغذ به صورت دیسکی با قطر ۱۴ میلی‌متر بر روی پلیت‌های کشت باکتری قرار گرفتند. پلیت‌ها در انکوباتور در دمای ۳۷ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند (Sanuja et al., 2015) و قطر هاله تشکیل شده اطراف دیسک‌ها با کولیس اندازه‌گیری شد. پس از انتخاب خمیر مناسب، درصد موم بهینه و

در این پژوهش به منظور مقایسه میانگین‌های شاخص مقاومت به کشیدگی، آبدوستی و درجه روشنی کاغذهای ساخته شده از خمیر پخت A و B از آزمون F (کاملاً تصادفی) استفاده شد و بر روی داده‌ها به منظور تحلیل آزمایش‌ها، به صورت طرح کاملاً تصادفی تجزیه واریانس و همچنین آزمون مقایسه میانگین دانکن انجام شد. کاغذ با خواص مقاومتی و ظاهری بهتر از خمیر پخت مناسب در پوشش‌دهی موم عسل و عصاره‌ی گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی انتخاب شد. کاغذها با موم عسل محلول در اتانول در ۴ غلظت ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد پوشش داده شدند و میزان آبگریزی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. به منظور مقایسه میانگین‌های مقدار جذب آب کاغذهای ساخته شده از آزمون دانکن استفاده شد. به منظور تحلیل آزمایش‌ها، به صورت طرح کاملاً تصادفی تجزیه واریانس شد.

به منظور ضد میکروبی ساختن نمونه‌های پوشش داده شده از عصاره گزنه ۱ درصد ریزپوشانی شده با صمغ دانه‌ی شاهی استفاده شد و میزان ممانعت در برابر جذب باکتری را از روش اندازه‌گیری قطر هاله به دست آورده، مقایسه میانگین‌های قطر هاله کاغذهای ساخته شده از آزمون دانکن و همچنین به منظور تحلیل آزمایش‌ها، به صورت طرح کاملاً تصادفی تجزیه واریانس انجام شد.

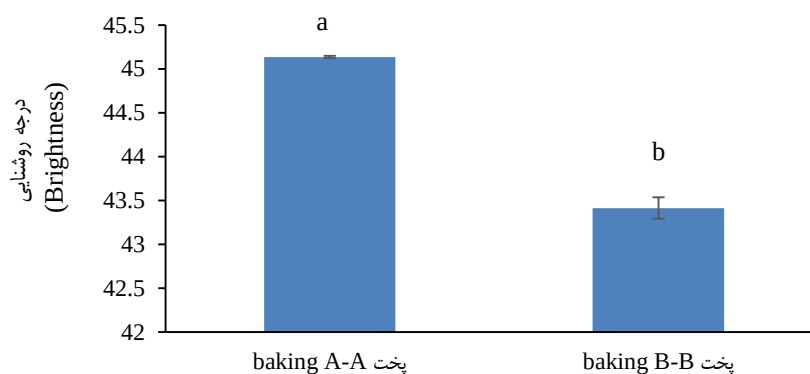
برای مقایسه میانگین از آزمون دانکن در سطح ۱ درصد استفاده شد و برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه V19 استفاده گردید.

نتایج و بحث

۲۰ درصد سدیم هیدروکسید درجه‌ی روشنی ۴۵/۱۳ و پخت ۱۰ درصد سدیم هیدروکسید درجه‌ی روشنی ۴۳/۴۱ را نشان داد. با کاهش میزان سدیم هیدروکسید در مایع پخت درجه روشنی کاغذ ساخته شده کاهش می‌یابد؛ که این اتفاق می‌تواند به دلیل خروج لیگنین و فنول‌های بیشتر با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم باشد.

جذب آب، درجه‌ی روشنی و مقاومت کششی معنی‌دار نشد. دلیل معنی‌دار نشدن تکرار می‌تواند نشان‌دهنده‌ی دقت ساخت نمونه‌ها، همگن بودن خمیر در هر پخت و یکنواخت بودن سطح کاغذ ساخته شده باشد.

شکل ۲ تاثیر کاهش درصد سدیم هیدروکسید بر درجه‌ی روشنی کاغذ ساخته شده را نشان می‌دهد. کاغذ ساخته شده با شرایط پخت

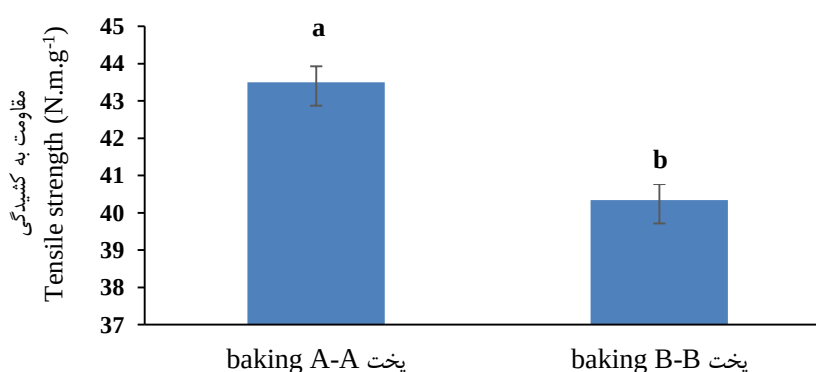


شکل ۲- مقایسه اثر شرایط پخت بر درجه روشنی کاغذ ساخته شده

Fig.2. Comparison of the effect of curing conditions on the degree of clarity of fabricated paper

بهبود می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت مایع پخت (سدیم هیدروکسید) درجه‌ی روشنی نیز باید روند افزایشی داشته باشد (Liang et al., 2011). شکل ۳، تاثیر کاهش غلظت سدیم هیدروکسید بر شاخص مقاومت به کشیدگی کاغذهای ساخته شده را نشان می‌دهد.

در تحقیقی با افزایش غلظت سدیم هیدروکسید از ۱۰ به ۱۶ درصد افزایش درجه روشنی از ۲۹/۱۲ به ۳۰/۸ مشاهده شد (Nazarnejad et al., 2018). با افزایش درصد NaOH، فنول‌های بیشتری حل شده و درجه‌ی روشنی به‌دست آمده از خمیر رنگبری شده افزایش می‌یابد (Johansson et al., 2000). با افزودن NaOH خروج مواد استخراجی تسریع و درجه‌ی روشنی کاغذ ساخته شده



شکل ۳- مقایسه اثر شرایط پخت بر شاخص مقاومت به کشیدگی کاغذ ساخته شده

Fig.3. Comparison of the effect of curing conditions on tensile strength of fabricated paper

افزایش قابلیت تشکیل پیوند بین الیاف با توجه به خروج لیگنین باشد. لئیباری در تحقیقی مشاهده نمود که با افزایش غلظت سدیم هیدروکسید در پخت کاه گندم از ۱۰ به ۱۴ درصد، شاخص مقاومت به کشیدگی از $56/5$ به $60/5$ $N.m.g^{-1}$ افزایش یافت بنابراین نتیجه گرفت که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم باعث افزایش شاخص مقاومت به کشیدگی می‌شود (Latibari, 2012). یافته‌های این تحقیق با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. واریانس اثر پوششی غلظت‌های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درصد از موم عسل حل شده در اتانول بر میزان آب جذب شده در کاغذهای ساخته شده از کاه برنج در جدول ۲ ارائه شده است.

در آزمایش‌های انجام شده، مشاهده شد کاغذ ساخته شده با شرایط پخت ۲۰ درصد سدیم هیدروکسید شاخص مقاومت به کشیدگی متوسط $43/5$ $N.m.g^{-1}$ و پخت ۱۰ درصد سدیم هیدروکسید شاخص مقاومت به کشیدگی متوسط $40/34$ $N.m.g^{-1}$ را نشان داد. با توجه به معنی‌دار بودن اثر شرایط پخت بر میزان شاخص مقاومت به کشیدگی در کاغذهای ساخته شده از کاه برنج در سطح یک درصد آزمایش‌ها نشان داد با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد در مایع پخت، شاخص مقاومت به کشیدگی حدود ۷ درصد افزایش یافت. دلیل افزایش شاخص مقاومت به کشیدگی در اثر افزایش درصد سدیم هیدروکسید می‌تواند به واسطه

جدول ۲- میانگین مربعات و انحراف معیار بر حسب غلظت پوشش روی جذب آب و قطر هاله در پوشش موم عسل و صمغ شاهی-عصاره گزنه

Table 2- Means of square and Std. Deviation of coating concentration on the water absorption and diameter halo in coating by honey wax and royal gum-nettle extract

منابع تغییرات Sources of variations		میانگین مربعات Mean of square	
غلظت Concentration (%)	جذب آب Water absorption ml.m ⁻²	قطر هاله- پوشش موم عسل Diameter of halo- honey wax	قطر هاله- پوشش صمغ شاهی- عصاره گزنه Diameter of halo-royal gum- nettle extract
0	497.003±25.86 ^a	-	-
1	275.373±32.89 ^b	2.333±0.058 ^b	3.53±0.058 ^b
2	134.873±24.68 ^c	2.507±0.095 ^b	3.56±0.140 ^b
5	37.226±10.12 ^d	3.197±0.105 ^a	4.63±0.381 ^a
10	35.036±7.08 ^e	3.297±0.155 ^a	4.68±0.25 ^a

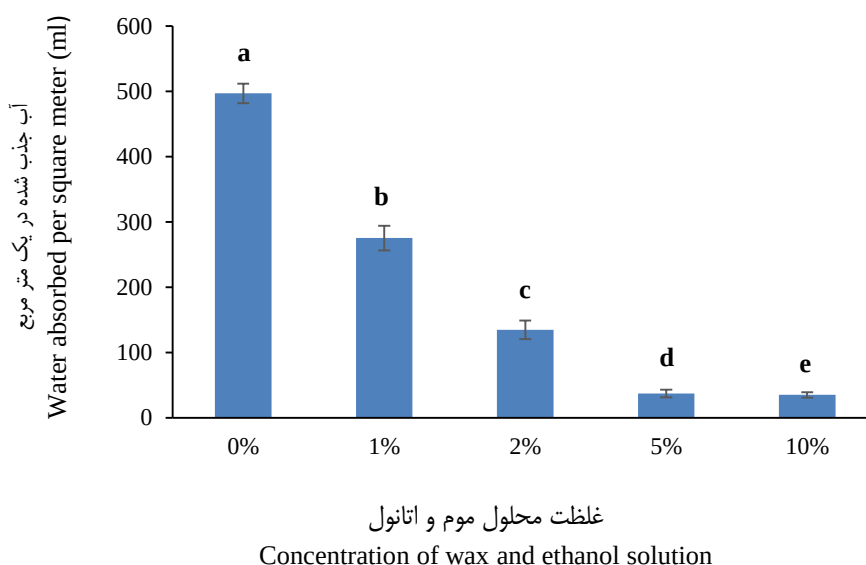
پوشش با غلظت ۵ درصد موم ۳۷/۲۲ میلی‌لیتر به‌دست آمد. پوشش‌دهی سطح مواد با استفاده از مواد آبریز راه مناسبی برای کاهش جذب آب توسط ماده اصلی است و با افزایش غلظت ماده پوشش‌دهنده جذب آب کاغذ تا حد زیادی کاهش می‌یابد (Mortazavian et al., 2011). همچنین در تحقیقات بسیاری ذکر شده است که استفاده از موم‌های طبیعی مانند موم زنبور اصل تاثیر زیادی در عدم جذب آب و بخارات مایع توسط سطوح موم کاری شده دارد (Monfared et al., 1397). می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت موم عسل در محلول پوشش‌دهی جذب آب کمتر خواهد شد، افزایش بیشتر از غلظت ۵ درصد توجیه اقتصادی نداشت و غلظت ۵ درصد به‌عنوان غلظت بهینه انتخاب شد.

جدول ۳ میانگین و انحراف از معیار اثر غلظت محلول موم در اتانول به همراه عصاره گزنه کپسوله شده با صمغ دانه شاهی بر خاصیت ضد میکروبی را نشان می‌دهد. اختلاف قطر هاله تشکیل شده اطراف دیسک‌های کاغذی از جنس کاه برنج، تفاوت خاصیت ضد میکروبی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول ۲ اثر تغییر غلظت موم بر میزان آبدوستی کاغذهای ساخته شده در سطح یک درصد معنی‌دار است و می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر غلظت موم در پوشش ظروف سلولزی، آبدوستی نیز تغییر خواهد کرد.

شکل ۴ نمودار میانگین اثر غلظت موم محلول در اتانول بر میزان جذب آب در کاغذهای ساخته شده از کاه برنج را نشان می‌دهد.

تغییر غلظت محلول موم و اتانول اثر معنی‌داری بر جذب آب توسط کاغذ ساخته شده از کاه برنج داشته و بیشترین جذب آب در غلظت ۱ درصد، میزان متوسط $275/37$ میلی‌لیتر و کمترین جذب آب در غلظت ۱۰ درصد، میزان $35/03$ میلی‌لیتر به‌دست آمد که مشاهده شد با افزایش غلظت موم در حلال اتانول از ۱ به ۱۰ درصد، جذب آب توسط کاغذ ساخته شده از کاه برنج تقریباً ۹۳ درصد کاهش یافته است. همچنین اختلاف بسیار کمی بین آبدوستی کاغذ با پوشش موم در غلظت ۵ و ۱۰ درصد مشاهده شد که دلیل این موضوع می‌تواند اشباع شدن تقریبی سطح کاغذ با موم عسل باشد و می‌توان نتیجه گرفت که افزایش غلظت موم عسل بیشتر از ۵ درصد به‌منظور پوشش‌دهی ظروف سلولزی مقرون به صرفه نیست. میزان جذب آب



شکل ۴- میزان متوسط جذب آب کاغذهای پوشش داده شده با موم عسل به میلی‌لیتر
Fig.4. The average water absorption of honey-coated paper in milliliter

عسل است در تحقیقی در سال ۲۰۰۸ مشاهده شد که دیسک‌های کاغذ حاوی ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی گرم موم با ایجاد هاله‌ای به قطر ۳/۶ تا ۱۰/۲۷ میلی‌متر مانع رشد باکتری پنی باسیلوس الویی^۱ در اطراف خود شدند و افزایش غلظت موم موجب افزایش قطر هاله شد (Von Bernuth et al., 2008).

همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد اضافه کردن صمغ دانه شاهی و عصاره گزنه تاثیر مثبتی بر قطر هاله و خاصیت ضد میکروبی داشته که این افزایش قطر هاله می‌تواند به دلیل افزودن عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی باشد.

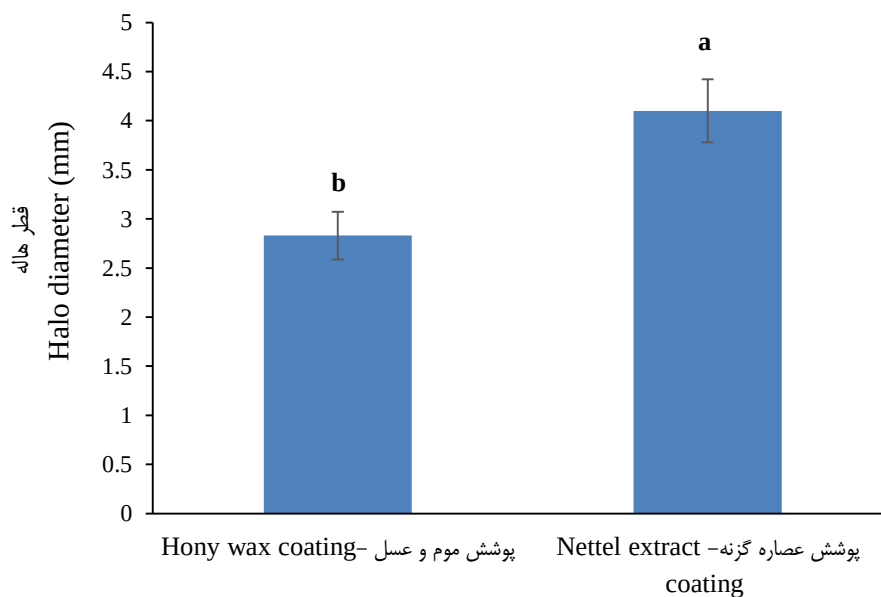
بر اساس مطالعات گالکین و همکاران عصاره گزنه مانع رشد *Escherichia coli* در محیط آزمایشگاهی شد (Gülçin et al., 2004). در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۳ تاثیر عصاره اتانولی گزنه را بر روی باکتری‌های *Salmonella*، *Pseudomonas aeruginosa*، *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* بررسی نمودند و نتایج نشان داد عصاره اتانولی گزنه بر همه باکتری‌ها موثر است (Kavalali, 2003) و این تحقیقات با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد. شریعت و همکاران در تحقیقی نشان دادند که از عصاره گیاهی گزنه می‌توان به عنوان ترکیبات ضد باکتریایی در راستای افزایش ماندگاری مواد غذایی استفاده کرد (Shariat et al., 2014). با توجه به شکل ۵ موم عسل خاصیت ضد باکتریایی داشته و عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی نیز مانع رشد باکتری در محیط آزمایشگاهی شد.

جدول ۳- میانگین مربعات و انحراف معیار بر حسب نوع پوشش روی قطر هاله

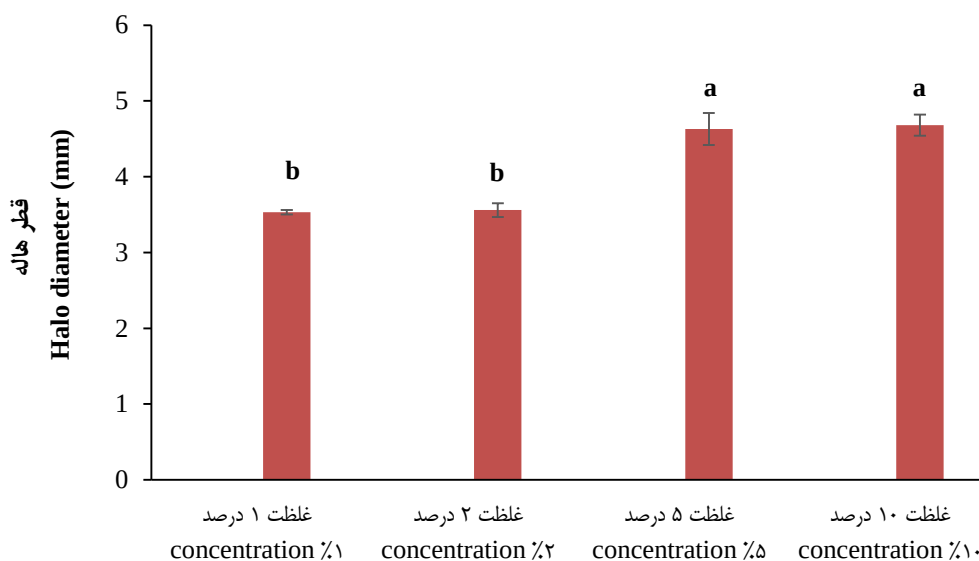
Table 3- Means of square and Std deviation of coating type on the diameter of halo

منابع تغییرات	میانگین مربعات
Sources of variations	Mean of square
نوع پوشش	قطر هاله
Coating type	Diameter of halo
موم و عسل	2.83±0.484 ^b
Honey wax	
عصاره گزنه	4.11±0.641 ^a
Nettle extract	

نتایج حاصل از اثر غلظت محلول موم در اتانول به همراه صمغ دانه شاهی و عصاره گزنه بر قطر هاله تشکیل شده اطراف دیسک‌های کاغذی ساخته شده از کاه برنج نشان داد اثر تیمار محلول صمغ دانه شاهی و عصاره گزنه و همچنین تیمار غلظت‌های مختلف موم در حلال اتانول بر خاصیت ضد میکروبی در سطح ۱ درصد معنی‌دار است و اثر متقابل این دو در سطح ۱ درصد معنی‌دار نبود. دلیل معنی‌دار نشدن اثر متقابل می‌تواند به واسطه ثابت نگه داشتن غلظت محلول عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی باشد. شکل ۵، تاثیر پوشش عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی بر خاصیت ضد میکروبی کاغذهای پوشش داده شده با موم عسل را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شکل ۵ موم عسل خاصیت ضد میکروبی دارد و قطر متوسط هاله تشکیل شده اطراف دیسک‌های کاغذی ۲/۸ میلی‌متر بوده که نشان‌دهنده خاصیت ضد میکروبی موم



شکل ۵- نمودار اثر پوشش صمغ شاهی و عصاره گزنه بر میزان متوسط قطر هاله تشکیل شده به میلی‌متر
Fig.5. The effect of gingerbread coating and nettle extract on the average diameter of halo formed in mm



شکل ۶- مقایسه پوشش عصاره گزنه نانوکپسوله شده با صمغ دانه شاهی بر میزان متوسط قطر هاله تشکیل شده به میلی‌متر
Fig.6. Comparison of Nano-capsulated nettle extract cover with royal seed gum on average halo diameter

درصد و بدون عصاره ریزپوشانی شده با قطر ۲/۳۳ میلی‌متر تشکیل شد. قطر هاله با غلظت موم عسل رابطه مستقیم داشته و با افزایش غلظت موم عسل قطر هاله نیز افزایش یافت. دلیل این اتفاق می‌تواند افزایش غلظت موم عسل در پوشش و نفوذ بیشتر میزان موم با افزایش غلظت آن در بافت کاغذ باشد. افزایش غلظت موم عسل

شکل ۶ مقایسه پوشش عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی بر خاصیت ضد میکروبی کاغذهای پوشش داده شده با موم عسل را نشان می‌دهد. بیشترین هاله اطراف دیسک پوشش‌دهی شده با موم ۱۰ درصد و عصاره ریزپوشانی شده با قطر ۴/۶۸ میلی‌متر تشکیل شد. کمترین هاله اطراف دیسک پوشش‌دهی شده با موم ۱

تأثیر معنی‌داری در میزان جذب آب کاغذهای ساخته شده نداشت. با افزایش درصد غلظت موم در محلول موم و اتانول، جذب آب توسط کاغذ ساخته شده از کاه برنج کاهش یافته و افزایش غلظت موم موجب افزایش آبگریزی سطح ظرف سلولزی می‌شود. موم عسل خاصیت ضد میکروبی دارد و افزایش غلظت موم عسل در پوشش ظروف سلولزی می‌تواند موجب افزایش خاصیت ضد میکروبی می‌شود.

اضافه کردن عصاره گزنه ریزپوشانی شده با صمغ دانه شاهی تأثیر افزایشی بر قطر هاله و خاصیت ضد میکروبی داشته و در نتیجه می‌تواند باعث بهبود خاصیت ضد میکروبی ظروف سلولزی شود (Nikkhah et al., 2009).

موجب افزایش خاصیت ضد میکروبی می‌شود (Von Bernuth et al., 2008). با توجه به شکل ۶ مشاهده شد که بین غلظت‌های ۵ و ۱۰ درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. دلیل معنی‌دار نبودن اختلاف داده‌ها در غلظت‌های ۵ و ۱۰ درصد را اشباع شدن تقریبی سطح کاغذ از غلظت ۵ درصد و بیشتر از آن بوده و بنابراین غلظت ۵ درصد می‌تواند به‌عنوان بهینه‌ترین غلظت موم عسل انتخاب گردد.

نتیجه‌گیری

با استناد به نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت: افزایش غلظت NaOH در مایع پخت می‌تواند پارامترهای درجه روشنی و شاخص مقاومت به کشیدگی کاغذ (ظروف سلولزی گیاهی) ساخته شده از کاه برنج را بهبود دهد. همچنین تغییر شرایط پخت

References

- Afhami, S., and P. Ahmadi. 2017. Use of Beeswax for Waterproofing and Stabilization of Poplar Dimensions in Home and Art Use. National Conference on Knowledge and Innovation in Wood and Paper Industry with Environmental Approach: Karaj.
- Al ebrahim, E., M. Rafeian, B. Zamanzad, and F. Deris. 2019. Effect of *Urtica dioica* L. Extract on Three Dental Caries Bacteria in Vitro. Eighth International Green Gold Conference.
- Alirezalo, K., S. Heydari, A. Barghol, and M. Shafaghi. 2019. Effect of Nettle Leaf Extract in Combination with Polysilene Epsilon on the Qualitative Characteristics of Beef Fillets During Storage. The Third International Congress and the 26th National Congress of Food Science and Technology of Iran.
- Besbes, S., C. Blecker, and C. Deroanne. 2004. Date seed oil: phenolic, tocopherol and sterol profiles. Journal of Food Lipids 11 (4): 251-265. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.2004.01141.x>
- Blomstedt, M., and M. Mitikkae. 2007. Simplified modification of bleached softwood pulp with carboxymethyl cellulose. Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment 60 (4): 309-314.
- Dehghan, B. E., and Z. Raftani Amiri. 2018. The effect of ginger and urban almonds on nanocapsule properties of orange peel essence. Food Science and Technology 15 (79): 157-169.
- Gülçin, I., Ö. Küfrevioğlu, M. Oktay, and ME. Büyükokuroğlu. 2004. Antioxidant, antimicrobial, antiulcer and analgesic activities of nettle (*Urtica dioica* L.). Journal of Ethnopharmacology 90 (2-3): 205-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2003.09.028>
- Heidari, R., N. Dolatabadzadeh, and J. Khalafi. 2004. Anthocyanin pigments of Siahe Sardasht grapes.
- Hurter, R. W., and P. Eng. 1998. Will nonwoods become an important fiber resource for North America? Proceedings of the World Wood Summit: 31 August-2 Sept 1998.
- Ivani, A., M. Safari, and A. Hedayatipoor. 2015. Comparison of direct planting methods of germinated rice (machine and manual) with transplanting. Journal of Agricultural Machinery 4 (1): 108-115. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v4i1.33172>
- Jafari, S. M., E. Assadpoor, and B. Bhandari. 2008. Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. Drying Technology 26 (7): 816-835. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373930802135972>
- Jahanshahi, S., A. Abdulkhani, K. Doosthoseini, and A. Shakeri. 2016. Study of physical and mechanical properties of produced strawboard using bio epoxy tannins resin. Iranian Journal of Wood and Paper Industries 7 (2): 271-282.
- Johansson, C., R. Beatson, and J. Saddler. 2000. Fate and influence of western red cedar extractives in mechanical pulping. Wood Science and Technology 34 (5): 389-401. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002260000051>
- Kamrani, A., A. Naghinejad, and F. Attar. 2011. Biodiversity and ethnobutane of medicinal flora of southern slopes of Alborz wetlands. National Conference on Medicinal Plants.
- Karazhiyan, H., S. M. A. Razavi, G. O. Philips, Y. Fang, S. Al-Assaf, K. Nishinari. 2011. Physicochemical aspects of hydrocolloid extract from the seeds of *Lepidium sativum*. International Journal of Food Science & Technology 46 (5): 1066-1072. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02583.x>
- Kavalali, G. 2003. An introduction to *Urtica* (botanical aspects). In: *Urtica*. CRC Press: 17-27.
- Latibari, A. 2012. Investigation of chemical-mechanical pulp production of wheat straw. Iranian Journal of Wood and Paper Sciences 26. (In Persian):
- Li, X.-L., D.-L. Meng, J. Zhao, Y.-L. Yang. 2014. Determination of synthetic phenolic antioxidants in essence

- perfume by high performance liquid chromatography with vortex-assisted, cloud-point extraction using AEO-9. Chinese Chemical Letters 25 (8): 1198-1202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2014.03.005>
19. Liang, C., H. Zhan, B. Li, S. Fu. 2011. Characterization of bamboo SCMP alkaline extractives and the effects on peroxide bleaching. BioResources 6 (2): 1484-1494.
 20. Monfared, M., H. Resalati, R. Dashtbani, and A. Tatari. 2018. The effect of esterase on reduction of bitumen extractants in chemical-mechanical pulp (CMP) bleached and un bleached.
 21. Mortazavian, A., M. Azizi, and S. Sohrabvandi. 2011. A Review on the Use of Edible Wrappers in Food. Journal of Food Science and Technology 7 (1).
 22. Nazarnejad, N., M. Matani, and G. Asadpour. 2018. Effect of alum and chitosan on the structure of white water out of paper mesh and paper properties.
 23. Nikkhah, F., F. Sefidkon, and E. Sharifi Ashoorabadi. 2009. The effect of distillation methods and plant growth stages on the essential oil content and composition of *Thymus vulgaris* L. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research 25 (3): 309-320. DOI: <https://dx.doi.org/10.22092/ijmapr.2009.7146>
 24. Niknejad, H., and A. Asgharian. 2015. Determination of antibacterial and antioxidant activity and identifying chemical compounds of *Urtica dioica* L. leaf essence as a potent antibacterial agent. Pajoohandeh Journal 20 (4): 234-239.
 25. Phillips, G. O., and P. A. Williams. 2009. Handbook of hydrocolloids, Elsevier.
 26. Razavizadeh, B. B. M., F. Khan Mohammadi, S. N. Azizi. 2014. Comparative study on properties of rice bran oil microcapsules prepared by spray drying and freeze drying. Research and Innovation in Food Science and Technology 3 (2): 97-114. DOI: <https://dx.doi.org/10.22101/jrifst.2014.08.23.321>
 27. Rowell, R. M. 1996. Opportunities for composites from agro-based resources, CRC Press Inc, Boca Raton, FL.
 28. Sanuja, S., A. Agalya, M. J. Umapathy. 2015. Synthesis and characterization of zinc oxide–neem oil–chitosan bionanocomposite for food packaging application. International Journal of Biological Macromolecules 74: 76-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.11.036>
 30. Shariat, E., H. Hoseyni, and A. Shariar. 2014. Antibacterial effect of aqueous extract of *Urtica dioica* on food spoilage bacteria. National Conference on Passive Defense in Agriculture.
 31. Shegokar, R., and R. H. Müller. 2010. Nanocrystals: industrially feasible multifunctional formulation technology for poorly soluble actives. International Journal of Pharmaceutics 399 (1-2): 129-139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.07.044>
 33. Sjostrom, E. 1993. Wood chemistry: fundamentals and applications, Gulf professional publishing.
 34. TAPPI test method – 1992-93 – TAPPI press
 35. Vickers, N. J. 2017. Animal communication: when i'm calling you, will you answer too? Current biology 27(14): R713-R715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.064>
 36. Von Bernuth, H. et al. 2008. Pyogenic bacterial infections in humans with MyD88 deficiency. Science 321(5889): 691-696. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1158298>
 37. World food situation, FAO cereal supply and demand brief. 2018. Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO). Available at: http://www.fao.org/world_food_situation/csdb/en/
 38. Van der Harst, E., J. Potting, C. Kroeze. 2014. Multiple data sets and modelling choices in a comparative LCA of disposable beverage cups. Science of the Total Environment 494: 129-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.084>



Evaluation of Different Methods of Sugarcane Hilling Up in Two Soil Textures and Three Forward Speeds

N. Monjezi^{1*}, M. Soleymani¹

1- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: n.monjezi@scu.ac.ir)DOI: [10.22067/jam.2021.58678.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.58678.0)

Received: 01-07-2020

Revised: 15-11-2020

Accepted: 18-01-2021

Available Online: 18-01-2021

How to cite this article:Monjezi, N., and M. Soleymani. 2022. Evaluation of Different Methods of Sugarcane Hilling Up in Two Soil Textures and Three Forward Speeds. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 265-280. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.2021.58678.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.58678.0)

Introduction

Sugarcane cultivation in Khuzestan province is in the form of planting in-furrow. Due to the fact that in a machine harvesting, the reaper is not able to fully harvest the straw in the furrow, in the planting in-furrow method, it is necessary to transfer the rows of straw to the stack. So one of the measures at the time was hilling up operations or stacking reeds planted in the furrow. Therefore, due to the salinity of irrigation water and high groundwater levels, which have increased the salinity of sugarcane fields in Khuzestan province, planting this product in summer to protect the seedlings against salinity is mandatory in the furrow. On one hand, due to the difficulty of harvesting operations in the furrow during the harvest season, and on the other hand, because of the reduction of waste during harvesting, the plant needs to be located on the ridge. Therefore, in sugarcane fields, when the seedlings are established and grown, the furrow and ridges are replaced, and to perform this operation special machines are required. According to the study, so far there has been no scientific and reasoned report on the study and evaluation of different types of hilling up devices and different speeds in sugarcane cultivation, and the use of machines in sugarcane cultivation and industry is based solely on objective observations. Therefore, in this study, three different types of devices have been evaluated in two soil textures and three different forward speeds as a step towards choosing the best type of machine and optimal speed of hilling up operations in sugarcane cultivation.

Materials and Methods

The purpose of this study was to evaluate three different methods of sugarcane hilling up in two soil textures and three different forward speeds. Research treatments include: soil texture (clay loam and silty clay loam), hilling up methods (6-shanks subsoil + 10-shanks subsoil, 8-shanks subsoil + hilling up device No. 1 and 8-shanks subsoil + hilling up device No. 2), and forward speeds (5, 6, and 7 kilometers per hour). Design of a factorial experiment based on randomized complete block design with three replications in Amirkabir field 208 (ALC 200 field 8) with clay loam texture and cultivar CP69-1062 and farm ARC14-22 with silty clay loam texture and cultivar CP69-1062, 15% moisture, and first-year cultivation was performed. The test plot includes 108 furrows. The area of each plot was two furrows. The length of each furrow was 250 meters (equal to the length of the sugarcane rows). To avoid affecting the interactions of the treatments, a distance was given between the treatments. The farms being tested were newly cultivated farms. The surface of the farm was furrowed and ridged. Care was taken in selecting the farm so that the humidity was similar in its different sections. After setting the right time for the hilling up and before starting the operation, soil sampling is required to determine the soil cone index and soil moisture. The physical properties of this study include Mean Weight Diameter (MWD), bulk density, soil surface uniformity, soil water permeability, and furrow depth (stack height). Analysis of variance and Duncan test were used to compare the treatments using SAS 9.4 software.

Results and Discussion

The results showed that there was a significant difference between soil Mean Weight Diameter, bulk density, soil surface uniformity, and soil water permeability in soil texture treatments, type of hilling up machine, and forward speed. Furrow depth index (stack height) was significantly different in treatments of type of machine and forward speed but not in soil texture treatments. The comparison of means showed that the whole loam texture treatment had 6-shanks + 10-shanks at a speed of 7 km h⁻¹ with the smallest mean weight diameter (16.06 mm). The use of 6-shanks subsoil + 10-shanks subsoil in hilling up in whole texture and speed of 5 km h⁻¹ significantly reduced soil bulk density. The lowest coefficient of variation of soil surface uniformity was

obtained with 8-shanks subsoil + hilling up device No. 1 in clay loam texture and 7 km h⁻¹ forward speed. The highest rate of water permeability in the soil was obtained after the hilling up operation with 6-shanks subsoil + 10-shanks subsoil in a total texture of 2.32 cm h⁻¹. Furrow depth index (stack height) was also within the acceptable range (10-15 cm) in all treatments. But in addition to height, the appearance of the ridges is also important. In the treatment of 6-shanks + 10-shanks in plant stacking and embankment operations, sometimes in fields, there are parts where this operation is not done well and the machine is not capable enough and is in the middle of the created ridges. Harvesting operations do not cause proper reed flooring. Therefore, to solve this problem, it is necessary to perform the hilling up operation at the appropriate speed and humidity so that the soil is well placed on the rows of reeds and the proper appearance of the ridge is maintained.

Conclusion

In this study, three different types of devices have been evaluated in two soil textures and three different forward speeds as a step towards choosing the best type of machine and optimal speed of hilling up operations in sugarcane cultivation. The physical properties of the soil, including the soil Mean Weight Diameter, bulk density, soil surface uniformity, soil water permeability, and the size of the furrow depth (ridge height) were measured, and the best treatments were identified. Considering the importance of hilling up operations in sugarcane cultivation and to complete the results of this experiment, the following items that could not be studied in this study are suggested. The effect of using different methods on hilling up should be investigated on the yield of sugarcane. The effect of using different devices on hilling up in terms of tensile strength, work efficiency, and time required to do the work, fuel consumption, cost of timely work, and maintenance costs in operations on sugarcane hilling up should be investigated.

Keywords: Bulk density, Hilling up, Soil mean weight diameter, Soil surface uniformity, Soil water permeability, Sugarcane

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۲۸۰-۲۶۵

ارزیابی روش‌های مختلف به روی پشته بردن نیشکر در دو بافت خاک و سه سرعت پیش‌روی

نسیم منجزی^{۱*}، محسن سلیمانی^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

چکیده

این تحقیق با هدف ارزیابی سه روش مختلف به روی پشته بردن نیشکر در دو بافت خاک و سه سرعت پیش‌روی متفاوت انجام شد. تیمارهای تحقیق عبارتند از: بافت خاک (رسی لومی و سیلتی رسی لومی)، روش‌های به روی پشته بردن (زیرشکن ۶ شاخه + زیرشکن ۱۰ شاخه، زیرشکن ۸ شاخه + دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۱ و زیرشکن ۸ شاخه + دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۲) و سرعت‌های پیش‌روی ماشین (۵، ۶ و ۷ کیلومتر بر ساعت). طرح آزمایشی در قالب آزمایش اسپلیت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در اراضی کشت و صنعت امیرکبیر استان خوزستان انجام شد. خصوصیات فیزیکی مورد نظر در این تحقیق شامل، قطر متوسط کلوخه‌ها، وزن مخصوص ظاهری، یکنواختی سطح خاک، نفوذپذیری آب در خاک و اندازه عمق جوی (ارتفاع پشته) بود. برای مقایسه تیمارها از تجزیه واریانس و آزمون دانکن با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده شد. نتایج نشان داد قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها و نفوذپذیری آب در خاک در تیمارهای بافت خاک، نوع ماشین و سرعت پیش‌روی دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد می‌باشند. شاخص‌های جرم مخصوص ظاهری خاک و یکنواختی سطح خاک در تیمار بافت خاک در سطح ۵ درصد و در تیمارهای نوع ماشین و سرعت پیش‌روی در سطح ۱ درصد دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشند. مقایسه میانگین‌ها نیز نشان داد تیمار بافت رسی لومی، زیرشکن ۶ شاخه + زیرشکن ۱۰ شاخه در سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت کوچک‌ترین قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها (۱۶/۰۶ میلی‌متر) را به خود اختصاص داده است. استفاده از زیرشکن ۶ شاخه + زیرشکن ۱۰ شاخه در عملیات به روی پشته بردن در بافت رسی لومی و سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت، جرم مخصوص ظاهری خاک را نیز به صورت معنی‌داری در سطح ۵ درصد کاهش می‌دهد. کمترین ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک مزرعه در تیمار عملیات به روی پشته بردن با زیرشکن ۸ شاخه + دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۱ در بافت رسی لومی و سرعت پیش‌روی ۷ کیلومتر بر ساعت به دست آمد (۱۷/۰۶ درصد). بیشترین سرعت نفوذپذیری آب در خاک پس از عملیات به روی پشته بردن با زیرشکن ۶ شاخه + زیرشکن ۱۰ شاخه در بافت رسی لومی ۲/۳۲ سانتی‌متر بر ساعت به دست آمد. شاخص اندازه عمق جوی (ارتفاع پشته) نیز در تمامی تیمارهای اندازه‌گیری شده در محدوده قابل قبول (۱۰-۱۵ سانتی‌متر) بود.

واژه‌های کلیدی: به روی پشته بردن، قطر متوسط کلوخه‌ها، نفوذپذیری آب در خاک، نیشکر، وزن مخصوص ظاهری، یکنواختی سطح خاک

مقدمه

عملیاتی در زراعت‌های دیگری مثل سیب‌زمینی نیز دیده می‌شود (Gutema, 2016; Sakadzo et al., 2019). به لحاظ این‌که پنجه‌زنی نیشکر معمولاً در نزدیکی سطح خاک انجام می‌شود و ریشه‌ی این پنجه‌ها به سطح خاک نزدیک‌تر و در عین حال، فضای کمتری جهت تغذیه و فعالیت خواهند داشت، عملیات خاک‌دهی پای بوته شرایط مناسبی را برای پنجه‌ها و استقرار و رشد بهتر آن‌ها فراهم می‌کند (Mhangu and Chiteka, 2010). به‌طور کلی، اهدافی را که می‌توان برای عملیات به روی پشته بردن ذکر نمود، عبارتند از: پوشش مناسب ریشه‌های سطحی نیشکر به‌ویژه ریشه پنجه‌ها، ممانعت از رویش پنجه‌های دیر موقع و پنجه‌زنی مازاد نیشکر، فراهم نمودن حجم خاک کافی جهت توسعه‌ی ریشه‌ها، کمک به تهویه خاک، کمک به استقرار بهتر ساقه اصلی و پنجه‌های اولیه، کاهش

کشت نیشکر به شکل «کاشت در کف جوی» انجام می‌شود. با توجه به این واقعیت که در برداشت ماشینی، دروگر توانایی برداشت کامل نی در کف جوی را ندارد، در روش «کاشت در کف جوی» لازم است ردیف‌های نی به روی پشته منتقل شوند. طی عملیات موسوم به «روی پشته بردن نیشکر»^۲، جای پشته و جوی عوض می‌شود و ردیف‌های نی از کف جوی به روی پشته انتقال می‌یابند. چنین

۱- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران
(*)- نویسنده مسئول
(Email: n.monjezi@scu.ac.ir)
DOI: [10.22067/jam.2021.58678.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.58678.0)
2- Hilling up

2000) در زمینه‌ی کنترل آفت شپشک در سیب‌زمینی شیرین و کنترل علف‌های هرز در تولید محصول سیب‌زمینی (Gutema, 2016) را نام برد. از طرفی تأثیر عملیات به روی پشته بردن بر افزایش عملکرد محصولات کشاورزی نیز اثبات شده است. از جمله می‌توان به تأثیر این عملیات در افزایش عملکرد محصول سیب‌زمینی (Dagne, 2015; Hossain, 2014; Svubure et al., 2015)، بادام زمینی (Ahmad et al., 2015; Fleissner, 2001; Ouedraogo et al., 2012) و نیشکر (Singh et al., 2019) اشاره کرد.

بنابراین با توجه به شوری آب آبیاری و بالا بودن آب‌های زیرزمینی که سبب افزایش شوری خاک مزارع نیشکر در استان خوزستان شده است، کاشت این محصول در فصل تابستان برای حفاظت گیاهچه در برابر شوری، در درون جوی الزامی است. از طرفی در فصل برداشت به دلیل سختی انجام عملیات برداشت در درون جوی و از طرفی کاهش ضایعات در هنگام برداشت، نیاز است که گیاه بر روی پشته مستقر باشد. بنابراین در مزارع نیشکر زمانی که گیاهچه استقرار یافت و رشد نمود، جای جوی و پشته تعویض می‌گردد. برای انجام این عملیات نیاز به ماشین‌های مخصوص می‌باشد. با توجه به بررسی انجام شده تاکنون گزارش علمی و مستدلی در زمینه‌ی بررسی و ارزیابی انواع دستگاه‌های به روی پشته بردن و سرعت‌های متفاوت انجام عملیات کاری در زراعت نیشکر در استان خوزستان انجام نشده است و کاربرد ماشین‌ها در کشت و صنعت‌های نیشکر صرفاً بر اساس مشاهدات عینی می‌باشد. بنابراین، در این مطالعه به ارزیابی سه نوع دستگاه متفاوت در دو بافت خاک و سه سرعت پیش‌روی مختلف پرداخته شده است تا گامی در جهت انتخاب بهترین نوع ماشین و سرعت بهینه‌ی انجام عملیات به روی پشته بردن در زراعت نیشکر باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت محل اجرای تحقیق

این تحقیق در سال زراعی ۱۳۹۸-۹۹ در شرکت کشت و صنعت امیرکبیر یکی از واحدهای هفت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان اجرا شد. این کشت و صنعت در ۴۵ کیلومتری جنوب اهواز و در غرب رودخانه کارون و شرق جاده اهواز به خرمشهر و در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۰ دقیقه قرار گرفته است و حداکثر ارتفاع از سطح دریا حدود ۷ متر می‌باشد. این واحد دارای ۴۸۰ مزرعه ۲۵/۵ هکتاری است. مزارع شرکت دارای طول ۱۰۰۰ متر و عرض ۲۵۰ متر می‌باشند.

اصول اجرای عملیات به روی پشته بردن نیشکر

احتمال وقوع خوابیدگی ساقه نیشکر، کنترل علف‌های هرز و برخی آفات مهاجم و در نتیجه کاهش مصرف سموم، هرس ریشه‌های مسن نیشکر و امکان کاربرد کودهای سرک، مواد اصلاح‌کننده خاک و یا آفت‌کش‌ها توأم با انجام عملیات (Ahmad et al., 2015; Rainaand Singh, 2018; Shrinivasa et al., 2017) در عملیات به روی پشته بردن، خاک‌برداری زیاد از جوی و مرتفع شدن پشته‌ها باعث افزایش مصرف آب و نیز عدم دسترسی مناسب ریشه به منبع رطوبتی می‌شود. همچنین خاک‌برداری کم از کف جوی، باعث عدم پوشش مناسب پای بوته‌ها، عدم نائل شدن به همه مزایای عملیات به روی پشته بردن و مشکلاتی در مدیریت آبیاری مزرعه می‌گردد (Patil et al., 2018). مطالعات نشان داده است که اجرای صحیح عملیات به روی پشته بردن در کشور نیشکرخیز هند تا بیش از ۵ درصد در افزایش محصول مؤثر بوده است (Dev et al., 2011). رضایی و زارعی (Rezaei and Zarei, 2013) در تحقیقی به مقایسه کاربرد علف‌کش شیمیایی و روش‌های رایج مبارزه‌ی پیش‌رویشی با علف‌هرز پنیرک در مزارع کشت جدید نیشکر پرداختند. نتایج نشان داد بعد از تیمار کاربرد علف‌کش شیمیایی، تیمار به روی پشته بردن در کنترل علف‌هرز پنیرک نقش مؤثری دارد. احمدپور و همکاران (Ahmadpour et al., 2010) به بررسی تلفیقی عملیات به روی پشته بردن و کولتواسیون با سمپاشی نواری در کنترل علف‌های هرز مزارع نیشکر پرداختند. نتایج نشان داد که در بین روش‌های مکانیکی، تیمار به روی پشته بردن توانست علف‌های هرز را تا ۷۵ درصد شاهد بدون سمپاشی کنترل کند. عبداللهی لرستانی و همکاران (Abdullahi Lorestani et al., 2012) به بررسی امکان استفاده از عملیات به روی پشته بردن در مدیریت علف‌های هرز مزارع نیشکر پرداختند. نتایج اجرای عملیات پشته‌سازی نشان داد که تیمار به روی پشته بردن با میانگین وزن کل خشک ۳/۹۶ گرم بر متر مربع در مقایسه با شاهد در مهار علف‌های هرز تا ۹۳/۷ درصد مؤثرتر بود. همچنین، در تایلند برای کنترل پس‌رویشی علف‌های هرز از عملیات به روی پشته بردن استفاده شد. این عملیات باعث افزایش محصول نیشکر به میزان حداقل ۷۰ درصد نسبت به تیمار وجین دستی شد. به طوری که در بررسی انجام شده، میزان عملکرد در تیمارهای وجین دستی ۵۱/۲ تن در هکتار و در تیمار کنترل تلفیقی ۹۵/۶ تن در هکتار بود (Suwanarak, 1990). مادو و همکاران (Madhu et al., 2017) در تحقیقی به بررسی اثر عملیات به روی پشته بردن بر افزایش عملکرد محصول نیشکر در کشور هند پرداختند. نتایج نشان داد که انجام عملیات به روی پشته بردن سبب افزایش عملکرد محصول نیشکر تا ۹۵/۷۹ تن در هکتار شده است. همچنین تاکنون تحقیقاتی زیادی در زمینه‌ی استفاده از عملیات به روی پشته بردن به‌منظور کنترل آفات و علف‌های هرز محصولات ریشه‌ای صورت گرفته است، از آن جمله می‌توان مطالعه حسینی و همکاران (Hossain et al.,

پشته بردن (دستگاه مخصوص به روی پشته بردن شماره یک) (شکل ۴) بود. دستگاه مخصوص به روی پشته بردن شماره یک شامل: شاسی (که از دو واحد تشکیل شده است)، سه شاخه (که در جلو یا پیشانی هر واحد قرار دارند)، صفحه‌ای جهت صاف کردن خاک در پشت شاخه‌ها، خیش دو طرفه در انتهای دستگاه به منظور ریختن خاک به پای بوته‌های نیشکر است. فاصله‌ی بین نوک خیش‌های دو واحد، ۱۸۳ سانتی‌متر است. روش سوم نیز در دو مرحله، عملیات تخریب پشته (زیرشکن ۸ شاخه) و عملیات اصلی به روی پشته بردن (دستگاه مخصوص به روی پشته بردن نیشکر شماره دو) (شکل ۵) انجام شد. دستگاه مخصوص به روی پشته بردن شماره دو نیز از دو واحد تشکیل شده است. هر واحد شامل یک جوی و پشته‌ساز (خیش دو طرفه) و شش شاخه کوتاه با طراحی خاص است که در جلو هر واحد قرار دارند و وظیفه‌ی آن‌ها از بین بردن کلوخه‌ها و هموار کردن خاک و استقرار دستگاه در خاک است.

عملیات به روی پشته بردن نیشکر در این تحقیق، به سه روش ارزیابی شد. روش اول شامل دو مرحله، عملیات تخریب پشته (زیرشکن ۶ شاخه، دو شاخه در ردیف جلو و چهار شاخه در ردیف عقب) (شکل ۱) و عملیات اصلی به روی پشته بردن (زیرشکن ۱۰ شاخه، چهار شاخه در ردیف جلو و شش شاخه در ردیف عقب) (شکل ۲) بود. با توجه به این که کار زیرشکن ۱۰ شاخه به صورت کاملاً سطحی است و هدف آن با زیرشکن ۶ شاخه متفاوت است، به همین دلیل، ساختمان شاخه‌های آن نیز متفاوت است. به طوری که این شاخه‌ها فاقد ناخن و دارای بالک‌های کوچکی است تا بتواند عملیات خرد کردن کلوخ و پخش کردن خاک را به خوبی انجام دهد. روش دوم شامل، عملیات تخریب پشته (زیرشکن ۸ شاخه، این دستگاه دارای دو دسته شاخه چهارتایی در دو طرف یک شاسی است که فاصله‌ی داخلی بین دو دسته، ۱۱۰ سانتی‌متر و فاصله‌ی بین هر شاخه در هر دسته ۲۳ سانتی‌متر است). (شکل ۳) و عملیات اصلی به روی



شکل ۲- زیرشکن ۱۰ شاخه
Fig.2. 10-shanks subsoil



شکل ۱- زیرشکن ۶ شاخه
Fig.1. 6-shanks subsoil



شکل ۴- دستگاه مخصوص به روی پشته بردن نیشکر شماره یک
Fig.4. Hilling up device No. 1



شکل ۳- زیرشکن ۸ شاخه
Fig.3. 8-shanks subsoil



شکل ۵- دستگاه مخصوص به روی پشته بردن نیشکر شماره دو

Fig.5. Hilling up device No. 2

روش اجرای طرح

به منظور مقایسه و ارزیابی روش‌های به روی پشته بردن نیشکر، با بررسی اثر سه روش متفاوت (زیرشکن ۶ شاخه + زیرشکن ۱۰ شاخه، زیرشکن ۸ شاخه + دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۱ و زیرشکن ۸ شاخه + دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۲) در سه سطح سرعت ۵، ۶ و ۷ کیلومتر بر ساعت و دو بافت مختلف (رسی لوم و سیلتی رسی لومی) روی برخی خواص فیزیکی خاک شامل قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها، جرم مخصوص ظاهری، یکنواختی سطح خاک و نفوذپذیری آب و همچنین پارامترهای عمق جوی و ارتفاع پشته‌های تشکیل شده، در قالب آزمایش اسپلینت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی (بافت خاک (A₁): بافت رسی لومی، A₂: بافت سیلتی رسی لومی)، کرت اصلی؛ ترکیب ماشین‌های به روی پشته بردن (B) در سرعت‌های متفاوت (C)، کرت فرعی (BC)) و ۳ تکرار در اراضی کشت و صنعت امیرکبیر مزرعه ۲۰۸ (۲۰۰ ALC مزرعه ۸) با بافت رسی لومی (۲۹/۲ درصد بافت غالب مزارع کشت و صنعت امیرکبیر) و رقم ۱۰۶۲-CP۶۹ و مزرعه ۲۲-۱۴ ARC با بافت سیلتی رسی لومی (۲۱/۶ درصد بافت غالب مزارع کشت و صنعت امیرکبیر) و رقم ۱۰۶۲-CP۶۹ اجرا شد. میزان شاخص مخروطی خاک قبل از اجرای طرح و انجام عملیات به روی پشته بردن، اندازه‌گیری شد.

تعداد کرت‌های آزمایش ۵۴ عدد بود. هر کرت شامل ۲ جوی بود. طول هر جوی ۲۵۰ متر (برابر طول ردیف‌های نیشکر) بود (فاصله‌ی دو ردیف نیشکر از یکدیگر ۱/۸۳ متر بود). مزارع مورد آزمایش مزرعه‌ی تازه کشت شده بودند. سطح مزرعه به صورت جوی و پشته بود. در انتخاب مزرعه دقت گردید تا رطوبت در نقاط مختلف آن مشابه باشد. پس از تعیین زمان مناسب به روی پشته بردن توسط اداره‌ی تهیه زمین شرکت کشت و صنعت امیرکبیر (ارتفاع نیشکر حدود ۲۵-۳۰ سانتی‌متر است و ارتفاع نی‌ها نه آن قدر بلند است که

زیر چرخ‌های تراکتور بشکنند و نه آن قدر کوچک که زیر خاک مدفون شوند) و قبل از شروع عملیات، برای تعیین شاخص مخروطی خاک و رطوبت خاک نیاز به نمونه‌برداری از خاک است. با توجه به این‌که مسیر انجام عملیات به روی پشته بردن گیاه نیشکر بر روی پشته‌ها می‌باشد، نمونه‌برداری از هر تیمار بر روی پشته انجام گردید. برای نمونه‌گیری از کیت نمونه‌گیری استفاده گردید. حجم سیلندرهای نمونه‌گیر ۱۰۰ سی‌سی بود. نمونه‌برداری از خاک در سه عمق ۱۰-۱۰۰، ۲۰-۲۰۰ و ۳۰-۳۰۰ سانتی‌متری انجام شد. نمونه‌های تهیه شده در آزمایشگاه آب و خاک مدیریت مطالعات کابردی شرکت کشت و صنعت امیرکبیر مورد ارزیابی قرار گرفتند. خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده در این تحقیق، عبارتند از:

۱- وزن مخصوص ظاهری خاک: برای تعیین میزان وزن مخصوص ظاهری خاک از حلقه‌های فلزی مخصوص جهت نمونه‌برداری استفاده شد. نمونه‌ها بعد از خشک شدن طی ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد وزن شده و وزن به دست آمده بر حجم استوانه که حجم نمونه محسوب شد، تقسیم گردید تا مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک در عمق مورد نظر به دست آید (Afzalinia and Ziaee, 2020):

$$BD = \frac{Ws}{V} \quad (1)$$

BD = وزن مخصوص ظاهری خاک (gr.cm^{-3})، Ws = وزن خاک خشک (gr)، V = حجم کل خاک (cm^3).

۲- شاخص مخروطی خاک: میزان مقاومت نفوذی خاک به وسیله‌ی دستگاه نفوذسنج مخروطی الکترونیکی ساخت شرکت Eijkel kamp (ساخت کشور هلند) اندازه‌گیری گردید. شاخص نفوذ نصب شده روی نفوذسنج بر طبق استاندارد انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا^۱ به شماره S313.3 و EP542 انتخاب و مورد

1- American Society of Agricultural Engineering (ASAE)

خاک نمونه‌برداری شد. جدول ۱ خصوصیات اولیه خاک مورد مطالعه قبل از اعمال تیمارهای عملیات به روی پشته بردن نیشکر و سرعت پیش‌روی (میانگین تکرارهای آزمایش) را نشان می‌دهد. این نمونه‌برداری از این جهت انجام گرفت که همگن بودن شرایط آزمایش برای تیمارها رعایت گردد. نتایج بررسی نمونه‌های گرفته شده از مزارع مورد نظر نشان داد که خاک مورد مطالعه از یکنواختی خوبی برخوردار بوده و این مزارع جهت اجرای طرح مورد نظر مناسب می‌باشند.

بررسی اثر بافت خاک، نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک در عملیات به روی پشته بردن نیشکر

نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات این آزمایش در جدول ۲ آمده است. بر اساس این جدول، اثرات متقابل بافت خاک و نوع ماشین، نوع ماشین و سرعت پیش‌روی، بافت خاک و سرعت پیش‌روی و اثر متقابل بافت خاک، نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. اثر بلوک (تکرار) معنی‌دار نشده است که بدین معنی است که بین تکرارهای موجود در هر تیمار اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. همچنین، اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر جرم مخصوص ظاهری خاک در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است. اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک بعد از عملیات به روی پشته بردن نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است. اثر متقابل نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر اندازه‌ی عمق جوی (ارتفاع پشته) نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است. در ادامه، با توجه به معنی‌دار شدن اثرات متقابل به مقایسه میانگین این اثرات با استفاده از آزمون دانکن پرداخته شد.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از این شکل، تیمار زیرشکن ۸ شاخه+ دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۲ در بافت خاک سیلتی-رسی لومی (A2B3) دارای بزرگترین میانگین قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها (۲۱/۸۵ میلی‌متر) و تیمار زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه در بافت رسی-لومی (A1B1) دارای کوچکترین میانگین قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها (۱۵/۳۴ میلی‌متر) است. همچنین، نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و سرعت پیش‌روی بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد در شکل ۷ نمایش داده شده است.

استفاده قرار گرفت (Abbaspour Gilandeh and Shayegani Soltan pour; 2014).

۳- درصد رطوبت خاک مزرعه: سیلندره‌های محتوی نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، توزین شد. پس از توزین، سیلندرها در آون به مدت ۲۴ ساعت با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد تا رطوبت خاک از بین برود. پس از خشک شدن خاک، سیلندرها دوباره توزین گردید و طبق رابطه (۲) رطوبت وزنی خاک بر حسب درصد تعیین شد (Aghilinategh et al., 2019):

$$MC = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2)$$

MC = رطوبت وزنی خاک بر مبنای وزن خاک خشک (%)،
 W_w = وزن خاک مرطوب (gr)، W_d = وزن خاک خشک (gr).

۴- قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها^۱ (MWD): برای محاسبه قطر کلوخه‌ها از سری غربال‌های پنج‌تایی استفاده گردید. برای نمونه‌گیری از قاب ۵۰×۵۰ سانتی‌متر مربعی در سه نقطه تصادفی از هر تکرار و در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متر و ۱۵-۳۰ سانتی‌متر و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر استفاده شد. داده‌های به‌دست آمده به روش قطر متوسط وزنی تحلیل شدند (Adam, and Erbach, 1992).

۵- نفوذپذیری آب در خاک: به‌منظور اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب در خاک که عامل مهمی در ذخیره‌سازی رطوبت و به‌موقع آماده‌شدن خاک می‌باشد، از روش استوانه‌های مضاعف استفاده گردید (Eskandari and Feiziasl, 2017).

۶- یکنواختی سطح خاک: جهت اندازه‌گیری همواری سطح خاک از آزمون یکنواختی سطح (پستی و بلندی) استفاده شد (Sedaghat Hosseini and Saebi Fard, 2006).

۷- اندازه عمق جوی (ارتفاع پشته): پس از عملیات به روی پشته بردن نیشکر، به‌وسیله‌ی متر عمق جوی (ارتفاع پشته‌ها) به‌طور تصادفی اندازه‌گیری شد.

تجزیه واریانس طرح

محاسبات آماری داده‌های این طرح با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 انجام شد. همچنین برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های اولیه خاک مورد مطالعه

پس از تعیین زمان مناسب عملیات به روی پشته بردن نیشکر توسط اداره تهیه زمین و قبل از شروع عملیات، بر اساس روش نمونه‌برداری، نمونه‌هایی از خاک مزرعه جهت تعیین خصوصیات اولیه

جدول ۱- خصوصیات اولیه خاک مورد مطالعه قبل از اعمال تیمارهای آزمایش

Table 1- Preliminary characteristics of the studied soil before applying the test treatments

واحد	مقدار میانگین	پارامترهای اندازه‌گیری شده
Unit	Value of average	Measured parameters
MPa	1.4	شاخص مخروطی خاک Cone index
%	15	رطوبت خاک Soil moisture

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات اثر بافت خاک، نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر متغیرهای تحقیق

Table 2- Results of variance analysis of soil texture, type of machine and the forward speed on the research variables

میانگین مربعات Mean of squares						
منابع تغییرات Sources	درجه آزادی d.f.	قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها Mean Weight Diameter (MWD) (mm)	جرم مخصوص ظاهری خاک Bulk density (gr.cm ⁻³)	ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک Soil surface uniformity (%)	نفوذپذیری آب در خاک Soil water permeability (cm.hr ⁻¹)	اندازه عمق جوی (ارتفاع پشته) Furrow depth (stack height) (cm)
تکرار (بلوک) Replication	2	246.37 ^{ns}	18.52 ^{ns}	7.99 ^{ns}	0.36 ^{**}	6.46 ^{ns}
بافت خاک Soil texture	1	9299.94 ^{**}	40.72 [*]	12.56 [*]	0.26 ^{**}	9.88 ^{ns}
خطای a	2	581.94	34.22	18.84	0.08	14.25
کرت‌های اصلی	5	2191.31	29.24	13.25	0.23	10.26
نوع ماشین Type of machine	2	7864.51 ^{**}	54.53 ^{**}	25.74 ^{**}	0.16 ^{**}	56.53 ^{**}
سرعت پیش‌روی Forward speed	2	5151.05 ^{**}	46.23 ^{**}	38.27 ^{**}	0.14 ^{**}	38.22 ^{**}
اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین Soil texture* Type of machine	2	3046.16 ^{**}	27.61 [*]	11.80 [*]	0.11 ^{**}	7.55 ^{ns}
اثر متقابل نوع ماشین و سرعت پیش‌روی Type of machine* Forward speed	4	1678.21 ^{**}	19.36 ^{ns}	6.64 ^{ns}	0.09 ^{**}	8.87 [*]
اثر متقابل بافت خاک و سرعت پیش‌روی Soil texture* Forward speed	2	2927.07 ^{**}	23.10 ^{ns}	8.53 ^{ns}	0.14 ^{**}	5.04 ^{ns}
اثر متقابل بافت خاک، نوع ماشین و سرعت پیش‌روی Soil texture* Type of machine* Forward speed	4	804.66 ^{**}	7.19 ^{ns}	1.38 ^{ns}	0.05 ^{ns}	3.63 ^{ns}
خطای bc	32	94.12	6.15	1.88	0.01	2.20
کرت‌های فرعی	48	1060.85	12.62	5.44	0.04	6.98

ns: None significant

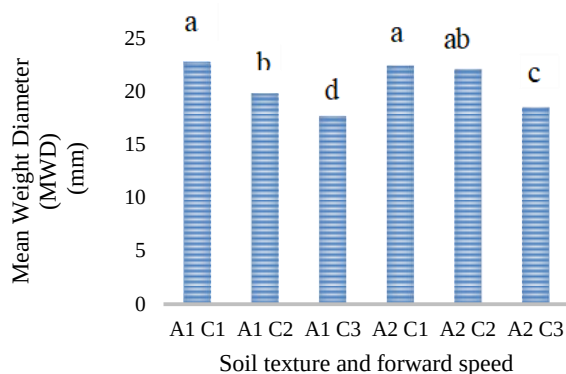
**Significant at the probability level of 1%

ns: عدم وجود تفاوت معنی‌دار

** تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد

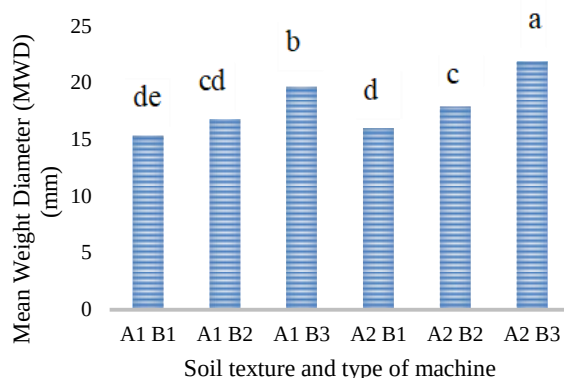
کوچکترین میانگین قطر متوسط کلوخه‌ها در تیمار بافت رسی لومی و سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت (A1C3) برابر ۱۷/۶۷ میلی‌متر است.

بزرگترین میانگین قطر متوسط کلوخه‌ها در تیمار بافت رسی لومی با سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت (A1C1) برابر ۲۲/۷۵ میلی‌متر است.



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و سرعت پیش‌روی بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها

Fig.7. Means comparison of interaction between soil texture and forward speed on Mean Weight Diameter



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها

Fig.6. Means comparison of interaction between soil texture and type of machine on Mean Weight Diameter

مناسب را برای رشد مجدد گیاه نیشکر فراهم کرده است. همان‌طور که در شکل ۱۰، نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی سرعت پیش‌روی ماشین بر جرم مخصوص ظاهری خاک نشان می‌دهد، استفاده از سرعت پیش‌روی ۵ کیلومتر بر ساعت، جرم مخصوص ظاهری را به‌صورت معنی‌داری کاهش می‌دهد. میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک در سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت برابر ۱/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است در حالی که با سرعت پیش‌روی ۷ کیلومتر بر ساعت این مقدار به ۱/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش یافته است. علت آن است که با افزایش سرعت پیش‌روی، قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه، جرم مخصوص ظاهری خاک افزایش می‌یابد.

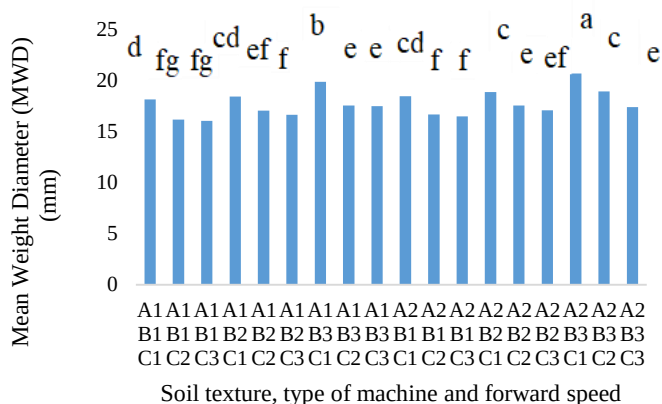
نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر جرم مخصوص ظاهری خاک در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بیشترین جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار بافت سیلتی رسی لومی و زیرشکن ۸ شاخه+ دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۲ (A2B3) با مقدار ۱/۴۸ گرم در سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد و کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری نیز در تیمار بافت رسی لومی و زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه (A1B1) برابر ۱/۰۹ گرم در سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. رنگیه و همکاران (Rangiah et al., 1998) دریافتند که عملکرد نیشکر در وزن مخصوص ظاهری بین ۱/۵ تا ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش پیدا می‌کند. نتایج مشابهی توسط سریووستوا (Srivastava, 1990) در وزن مخصوص ظاهری ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب قبلاً گزارش شده بود. لرزاده و همکاران (Lorzadeh et al., 2002)، حد بحرانی جرم مخصوص ظاهری خاک برای ریشه نیشکر را ۱/۸-۱/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آوردند که با این حد از فشردگی خاک، ریشه‌ها به‌صورت سطحی و محدود رشد می‌کنند. با توجه به مقادیر ذکر شده در این

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد (شکل ۸) نشان داده شده است. بزرگترین میانگین قطر متوسط کلوخه‌ها در تیمار زیرشکن ۸ شاخه+ دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۲ در سرعت پیش‌روی ۵ کیلومتر بر ساعت (B3C1) برابر ۱۹/۳۳ میلی‌متر است. کوچکترین میانگین قطر متوسط کلوخه‌ها در تیمار زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه در سرعت پیش‌روی ۷ کیلومتر بر ساعت (B1C3) برابر ۱۴/۵۵ میلی‌متر است.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک، نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد در شکل ۹ ارائه شده است. بزرگترین قطر متوسط کلوخه‌ها در تیمار بافت سیلتی رسی لومی، زیرشکن ۸ شاخه+ دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۲ در سرعت پیش‌روی ۵ کیلومتر بر ساعت (A2B3C1) برابر ۲۰/۶۸ میلی‌متر مشاهده شد و کوچکترین قطر متوسط کلوخه‌ها در تیمار بافت رسی لومی، زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه در سرعت پیش‌روی ۷ کیلومتر بر ساعت (A1B1C3) برابر ۱۶/۰۶ میلی‌متر به‌دست آمد. سرعت پیش‌روی بالا موجب ضربه به خاک و افزایش عکس‌العمل بین ابزار و خاک می‌شود که مسلماً خرد شدن بیشتر را به دنبال دارد. کارتر (Carter, 2000) نیز نشان داد که میانگین قطر خاکدانه‌ها متأثر از سرعت پیش‌روی است. همچنین نتایج سایر محققین از جمله (Namdari et al., 2010; Khaffaf and Khadr, 2008; Ming et al., 2008) تأییدکننده این مطلب است که افزایش سرعت پیش‌روی بر میانگین وزنی قطر کلوخه‌ها اثر کاهنده دارد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که به روی پشته بردن نیشکر با دستگاه زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه از نظر شاخص قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها نسبت به روش‌های دیگر بهتر عمل کرده است و خاکی با دانه‌بندی

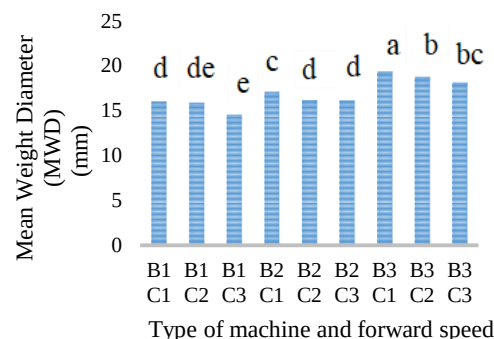
ریشه قرار دارد.

تحقیقات، مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک بعد از عملیات به روی پشته بردن نیشکر در مزارع مورد مطالعه در محدوده‌ی مناسب رشد



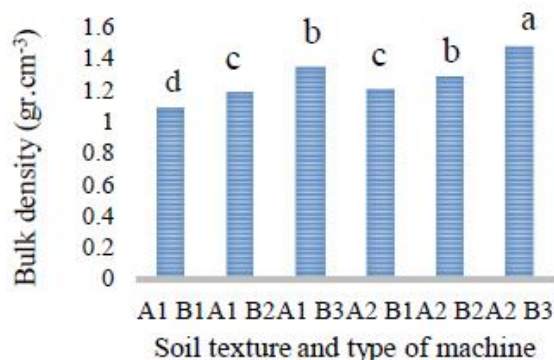
شکل ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک، نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها

Fig.9. Means comparison of interaction between soil texture, type of machine and forward speed on Mean Weight Diameter



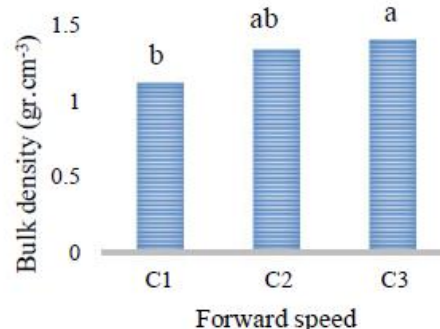
شکل ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها

Fig.8. Means comparison of interaction between type of machine and forward speed on Mean Weight Diameter



شکل ۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر جرم مخصوص ظاهری خاک

Fig.11. Means comparison of interaction between soil texture and type of machine on soil bulk density



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثر سرعت پیش‌روی بر جرم مخصوص ظاهری خاک

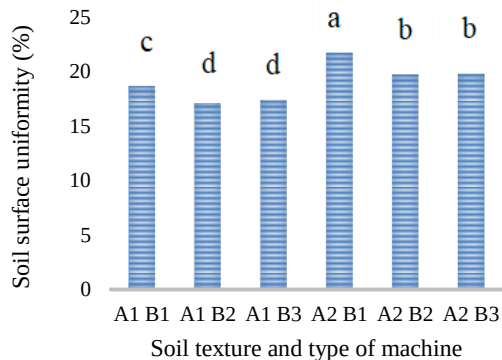
Fig.10. Means comparison of effect of forward speed on soil bulk density

ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک در مزرعه نیشکر در تیمار بافت رسی لومی و زیرشکن ۸ شاخه+ دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۱ (A1B2) برابر ۱۷/۰۶ درصد به دست آمد. بیشترین ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک در تیمار بافت سیلتی رسی لومی و زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه (A2B1) برابر ۲۱/۶۹ درصد اندازه‌گیری شد. طبق نظر زند و کیلی و همکاران (Zandvakili et al., 2015)، میزان قابل قبول ضریب تغییرات در آزمایش همواری سطح عملیات خاک‌ورزی ۲۰ تا ۲۵ درصد است. بنابراین نتایج آزمون

نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی سرعت پیش‌روی بر ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک بعد از عملیات به روی پشته بردن نیشکر نشان داد که کمترین ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک به تیمار سرعت پیش‌روی ۷ کیلومتر بر ساعت (۱۸/۲۲ درصد) و بیشترین ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک به تیمار سرعت پیش‌روی ۵ کیلومتر بر ساعت (۲۲/۵۰ درصد) تعلق دارد (شکل ۱۲). همچنین بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک (شکل ۱۳)، کمترین

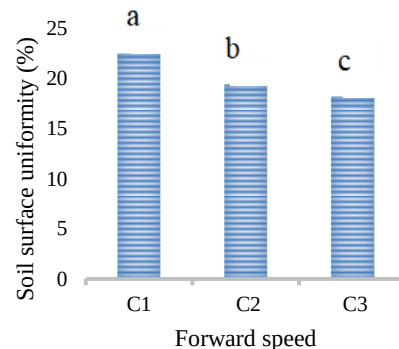
که دلایلی از قبیل سرعت پیش‌روی نامناسب و بی‌تجربگی کاربران تراکتور و عدم توجه به تنظیمات تراز طولی و عرضی گاوآهن مورد استفاده را علت آن دانست.

نشان از وضعیت مطلوب همواری سطح خاک در تیمارهای مورد مطالعه می‌دهد. عمرانی (2012, Omrani)، متوسط ضریب تغییرات همواری سطح عملیات خاک‌ورزی نیشکر را ۴۴/۲ درصد به‌دست آورد



شکل ۱۳- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر ضریب یکنواختی سطح خاک

Fig.13. Means comparison of interaction between soil texture and type of machine on soil surface uniformity



شکل ۱۲- مقایسه میانگین اثر سرعت پیش‌روی ماشین بر ضریب یکنواختی سطح خاک

Fig.12. Means comparison of effect of forward speed on soil surface uniformity

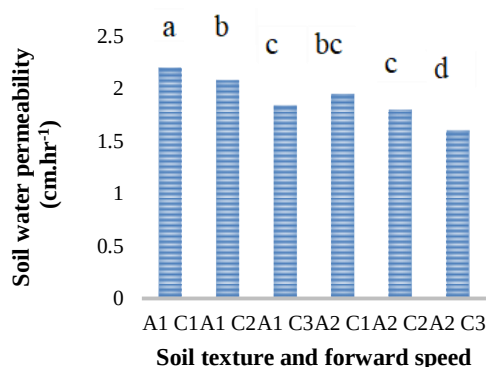
کمترین میزان نفوذپذیری آب در خاک در تیمار بافت سیلتی‌رسی‌لومی و سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت (A2C3) به‌ترتیب برابر ۲/۲۰ و ۱/۶۰ سانتی‌متر بر ساعت رخ داده است.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر نفوذپذیری آب در خاک نیز در شکل ۱۶ آمده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین و کمترین سرعت نفوذ آب در خاک در تیمارهای زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه و سرعت پیش‌روی ۵ کیلومتر بر ساعت (B1C1) و زیرشکن ۸ شاخه+ دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۱ و سرعت پیش‌روی ۷ کیلومتر بر ساعت (B2C3) به‌ترتیب برابر ۲/۱۵ و ۱/۶۰ سانتی‌متر بر ساعت بود. علت کاهش نفوذپذیری آب در سرعت‌های بالاتر به این خاطر است که شیارهای ایجاد شده در سرعت بالای دستگاه به‌وسیله‌ی ریزش دیواره‌های شیار سریع‌تر پر می‌گردند، در حالی که ثبات این شیارها در سرعت‌های پایین حرکت دستگاه در خاک ماندگارتر است. از طرفی دستگاه‌های به روی پشته بردن نیشکر شماره ۱ و ۲ به‌خاطر شکل هندسی خاص و فشردگی که در کف جوی به‌وجود می‌آورند، باعث کاهش سرعت نفوذ آب در خاک می‌شوند.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر اندازه عمق جوی (ارتفاع پشته) در شکل ۱۷ ارائه شده است. ارتفاع مناسب برای پشته‌های ساخته شده در عملیات معمولاً بین ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۱۸). در تیمارهای مورد بررسی نیز میانگین ارتفاع پشته‌های ساخته شده بین ۹/۲۲ تا ۱۵/۴۶ سانتی‌متر متغیر بود

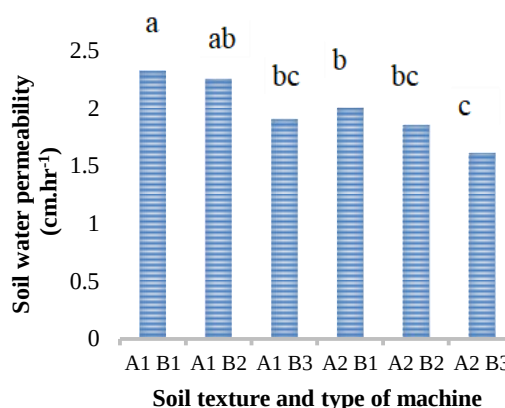
نتیجه‌ی مقایسه میانگین اثر بافت خاک و نوع ماشین بر نفوذپذیری آب در خاک در شکل ۱۴ نشان داده شده است. بر این اساس، بیشترین و کمترین سرعت نفوذ آب در خاک پس از عملیات در تیمارهای بافت رسی‌لومی و زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه (A1B1) و بافت سیلتی‌رسی‌لومی و زیرشکن ۸ شاخه+ دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۲ (A2B3) به‌ترتیب برابر ۲/۳۲ و ۱/۶۱ سانتی‌متر بر ساعت به‌دست آمد. به عبارتی طبق جدول شاخص نفوذپذیری (جدول ۳)، استفاده از دستگاه زیرشکن ۶ شاخه+ زیرشکن ۱۰ شاخه در عملیات به روی پشته بردن نیشکر موجب تغییر نفوذپذیری از نسبتاً کند به متوسط گردیده است؛ این مطلب را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که به‌دلیل حرکت زیرشکن ده شاخه شدت پراکنش خاک بیشتر گردیده است. حرکت ساقه زیرشکن باعث ایجاد شکاف در محل عبور ساقه در کف جوی‌ها گردیده که در نتیجه موجب بیشتر شدن میزان نفوذپذیری آب در خاک گردیده است. علت آن است که در استفاده از زیرشکن، به دلیل شکسته شدن و خرد شدن لایه‌های سطحی و عمقی در خاک و تشکیل فضاهای بزرگ بین کلوخه‌ها و ترک‌های حاصله در عمق و کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک، ضمن افزایش حجم ذخیره آب در خاک، نفوذ آب در خاک به‌راحتی انجام می‌گیرد (Bouma, 1996). نتیجه مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و سرعت پیش‌روی بر نفوذپذیری آب در خاک در شکل ۱۵ نشان داده شده است. بیشترین سرعت نفوذ آب در خاک در بافت رسی‌لومی و سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت (A1C1) و

شکل ظاهری پشته‌ها نیز اهمیت دارد.



شکل ۱۵ - مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و سرعت پیش‌روی بر نفوذپذیری آب در خاک
Fig.15. Means comparison of interaction between soil texture and forward speed on soil water permeability

که نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی مناسب آن‌ها است. بنابراین از نظر ارتفاع پشته‌های ساخته شده مشکل خاصی وجود ندارد. اما علاوه بر ارتفاع،



شکل ۱۴ - مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک و نوع ماشین بر نفوذپذیری آب در خاک
Fig.14. Means comparison of interaction between soil texture and type of machine on soil water permeability

جدول ۳ - شاخص و میزان نفوذ پذیری آب در خاک (نصیریان، ۱۳۸۷)

Table 3- Index of soil water permeability (Nasirian, 2008)

شاخص نفوذپذیری	نفوذپذیری
Inex of permeability	Soil water permeability (cm.hr ⁻¹)
خیلی کند	Very slow < 0.127
کند	Slow 0.127-0.5
نسبتاً کند	Relatively slow 0.5-2
متوسط	Medium 2-6.35
نسبتاً سریع	Relatively fast 6.35-12.7
سریع	Fast 12.7-25

انتقال می‌یابند. این آزمایش به منظور ارزیابی سه روش مختلف به روی پشته بردن نیشکر در دو بافت خاک و سه سرعت پیش‌روی متفاوت روی خواص فیزیکی خاک شامل قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها، وزن مخصوص ظاهری خاک، همواری سطح خاک، نفوذپذیری آب در خاک و اندازه عمق جوی (ارتفاع پشته) در مزارع کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر خوزستان انجام گردید. نتایج نشان داد، استفاده از زیرشکن ۶ شاخه + زیرشکن ۱۰ شاخه در عملیات به روی پشته بردن نیشکر در بافت رسی‌لومی و سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت، جرم مخصوص ظاهری خاک را نیز به صورت معنی‌داری کاهش می‌دهد. کمترین ضریب تغییرات یکنواختی سطح خاک مزرعه در تیمار به روی پشته بردن نیشکر با زیرشکن ۸ شاخه + دستگاه به روی پشته بردن نیشکر شماره ۱ در بافت رسی‌لومی و سرعت پیش‌روی ۷ کیلومتر بر ساعت به دست آمد. بیشترین سرعت نفوذپذیری آب در

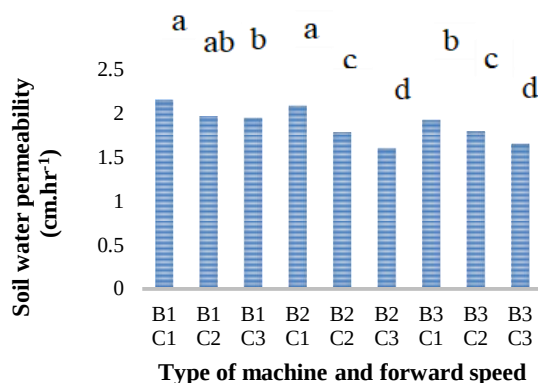
در تیمار زیرشکن ۶ شاخه + زیرشکن ۱۰ شاخه در عملیات پشته‌سازی و خاک‌ریزی پای بوته گاه‌ها در مزارع، قسمت‌هایی وجود دارد که این عملیات به خوبی انجام نمی‌شود و دستگاه از توانایی کافی برخوردار نیست و وسط پشته‌های ایجاد شده گود می‌باشد (شکل ۱۹) که خود در عملیات برداشت باعث عدم کف‌بری مناسب نیشکر می‌گردد. به همین خاطر برای رفع این مشکل لازم است عملیات به روی پشته بردن نیشکر در سرعت پیش‌روی و رطوبت مناسب انجام شود تا خاک به خوبی روی ردیف‌های نیشکر قرار گیرد و شکل ظاهری مناسب پشته، حفظ گردد.

نتیجه‌گیری

طی عملیات به روی پشته بردن نیشکر، جای پشته و جوی در مزرعه عوض می‌شود و ردیف‌های نی از کف جوی به روی پشته

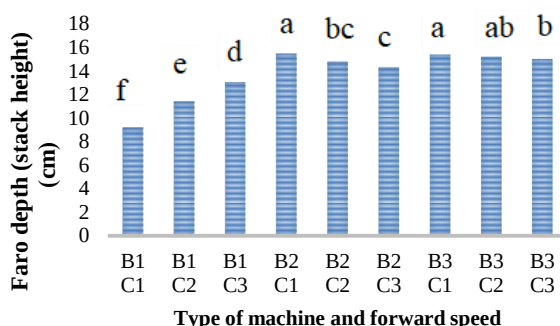
نیشکر و به منظور تکمیل نتایج این آزمایش، موارد ذیل که امکان بررسی آن‌ها در این پژوهش وجود نداشت، پیشنهاد می‌گردد.

خاک پس از عملیات به روی پشته بردن با زیرشکن ۶ شاخه + زیرشکن ۱۰ شاخه در بافت رسی لومی ۲/۳۲ سانتی‌متر بر ساعت به‌دست آمد. با توجه اهمیت عملیات به روی پشته بردن در زراعت



شکل ۱۶- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر نفوذپذیری آب در خاک

Fig. 16. Means comparison of interaction between type of machine and forward speed on soil water permeability



شکل ۱۷- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماشین و سرعت پیش‌روی بر اندازه‌ی عمق جوی

Fig. 17. Means comparison of interaction between type of machine and forward speed on furrow depth



شکل ۱۹- عدم خاک‌ریزی مناسب پای بوته در عملیات به روی پشته بردن نیشکر

Fig. 19. Lack of proper embankment of the plant's foot in the hilling up operation



شکل ۱۸- اندازه مناسب عمق جوی (ارتفاع پشته)

Fig. 18. Suitable size of furrow depth (stack height)

افزایش بازدهی عملیات به روی پشته بردن نیشکر یک فاکتور بسیار مهم باشد.

- در آزمایش‌های مشابه ارقام دیگر نیشکر که در خوزستان کشت می‌شوند، مورد آزمایش قرار گیرند. زیرا همان‌طور که گیاهان مختلف نسبت به سطوح مختلف عملیات به روی پشته بردن عکس‌العمل‌های مختلفی دارند، شاید این عکس‌العمل‌ها در ارقام مختلف نیشکر نیز متفاوت باشد.

- آزمایش‌های مشابهی با بافت‌های خاک متفاوت می‌تواند نتایج متفاوتی را برجای بگذارد. بنابراین این آزمایش‌ها در بافت‌های مختلف موجود در کشت و صنعت‌های نیشکر انجام شوند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره ۱۳۳۰ از محل اعتبارات پژوهانه واحد پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز می‌باشد. بنابراین نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز بابت تأمین هزینه‌های این پژوهش سپاسگزاری می‌نمایند.

- تأثیر استفاده از روش‌های مختلف به روی پشته بردن، در بازدهی محصول نیشکر بررسی شود.

- تأثیر استفاده از دستگاه‌های مختلف به روی پشته بردن در میزان توان کششی، راندمان کار و زمان مورد نیاز برای انجام کار، میزان مصرف سوخت، هزینه به موقع انجام شدن کار و هزینه نگهداری و تعمیرات در عملیات به روی پشته بردن نیشکر بررسی شود.

- با افزایش رطوبت خاک میزان تأثیر عملیات به روی پشته بردن نیشکر در بهبود خواص فیزیکی خاک کمتر می‌گردد، بنابراین پیشنهاد می‌گردد عملیات به روی پشته بردن در رطوبت‌ها و زمان مناسب مورد مطالعه قرار گیرد و در این خصوص بهتر است با انجام آزمایش، حد بهینه‌ی رطوبت خاک جهت انجام این عملیات مشخص گردد.

- با توجه به این که استقرار علف‌های هرز چند ساله ریزوم‌دار (حلفه، خیزران و غیره) از مشکلات روز کشت و صنعت‌های نیشکر می‌باشد، تأثیر عملیات به روی پشته بردن نیشکر در کنترل آن‌ها به عنوان مبارزه مکانیکی، ضمن انجام عملیات مورد مطالعه قرار گیرد.

- طراحی، ساخت و استفاده از دیگر ماشین‌ها نیز می‌تواند در

References

1. Abbaspour Gilandeh, Y., and A. R. Shayegani Soltan pour. 2014. Soil cone index prediction using artificial neural networks model and its comparison with regression models. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 4 (2): 187-204. (In Persian).
2. Abdullahi Lorestani, S., Sh. Lorzadeh, and Q. Fathi. 2012. Investigation of the possibility of using helping operations in the management of weeds in sugarcane fields. 12th Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding of Iran, September 6-14, Islamic Azad University, Karaj Branch. (In Persian).
3. Adam, K. M., and D. C. Erbach. 1992. Secondary tillage tool effect on soil aggregation. *Transactions of the ASAE*, 35 (6): 1771-1776.
4. Afzalnia, S., and A. Ziaee. 2020. Cotton yield and water productivity affected by conservation tillage and irrigation methods in cotton-wheat rotation. *Journal of Agricultural Machinery* 10 (1): 103-114. DOI: <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v10i1.76229>.
5. Aghilinategh, N., M. Rezaei, and R. Tabatabaei kolor. 2019. Effect of depth and puddling intensity on engineering properties of clay loam soil. *Iranian Journal of Biosystem Engineering* 50 (2): 367-374. (In Persian). DOI: [10.22059/ijbse.2018.225241.665068](https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.225241.665068).
6. Ahmad, N., A. Zada, A. Ali, and M. Junaid. 2015. Effect of earthing up procedure on enhancement in yield of different groundnut varieties planted under agro-climatic conditions of Malakand division. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences* 4 (1): 181-184. DOI: [10.15640/jaes.v4n1a22](https://doi.org/10.15640/jaes.v4n1a22).
7. Ahmadpour, S. R., H. Alizadeh, and N. Majnoon Hosseini. 2010. Integrating of Hilling up and Cultivation with Banded Spraying in Weed Management in Sugarcane Fields. *Iranian Journal of Crop Science* 41 (4): 719-729. (In Persian).
8. Bouma, H. 1996. Compaction and subsoiling effects on sugarcane yield and physical properties. *Transactions of the ASAE* 39 (5): 1641-1649.
9. Carter, M. R. 2000. Soil sampling and methods of analysis. *Canadian Society of Soil Science*, 823 p.
10. Dagne, Z. 2015. Effect of seed tuber size and plant spacing on yield and quality of potato in Holetta. MSc Thesis Submitted to Haramaya University.
11. Dev, C. M., R. N. Meena, A. Kumar, and G. Mahajan. 2011. Earthing up and nitrogen levels in sugarcane ratoon under subtropical Indian condition. *Indian Journal of Sugarcane Technology* 26 (1): 1-5.
12. Eskandari, I., and V. Feizias. 2017. Influence of conservation tillage on some soil physical properties and crop yield in vetch-wheat rotation in Dryland Cold region. *Journal of Agricultural Machinery* 7 (2): 451-467. (In

- Persian). DOI: <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v7i2.50933>.
13. Fleissner, K. 2001. Management practices and preferences of Bambara groundnut producers in Oshana Region, North Central Namibia. In: Sesay, A., Edje, O. T. and Cornelissen, R. (Eds.). Proceedings of a mid-project workshop, University of Swaziland. Pp.47-53.
14. Gutema, C. 2016. Effect of earthing up frequencies and tuber seed form on yield and profitability of potato (*Solanum Tuberosum*) production in Bale Highlands. Agricultural Research & Technology 2 (4): 96-101. DOI: [10.19080/ARTOAJ.2016.02.555592](https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2016.02.555592).
15. Hossain, I. 2014. Effect of whole and cut seed tubers on the growth and yield of eight germplasm of potato. MSc Thesis Submitted to Bangladesh Agricultural University.
16. Hossain, M. A., M. A. Mrnnan, M. I. Nazrul, and M. A. Larma. 2000. Barthing up as a cultural practice for the management of sweet potato weeyil (*Cylaf Formtcartus* f.). Journal of Agricultural Science and Technology 1 (1): 71-73.
17. Khaffaf, A., and A. Khadr. 2008. Effect of some primary tillage implement on soil pulverization and specific energy. Misr Journal of Agricultural Engineering 25 (3): 731-745.
18. Lorzadeh, Sh., H., Nadiyan, A., Bakhshandeh, Gh. Noormohamadi, and F. Darvish. 2002. Effects of different levels of soil compaction on yield, yield components and sucrose in sugarcane cv. CP 48-103, in Khuzestan. Iranian Journal of Crop Sciences 4 (1): 36-47. (In Persian). DOR: [20.1001.1.15625540.1381.4.1.4.5](https://doi.org/20.1001.1.15625540.1381.4.1.4.5).
19. Madhu, G., S. I. Halikatti, R. B. Khandagave, and M. P. Potdar. 2017. Effect of methods of fertilizer applications, fertilizer levels and split application of potassium on available nutrient status and nutrient use efficiency in sugarcane. International Journal of Chemical Studies 5 (6): 1043-1051.
20. Mhungu, S. and Z. A. Chiteka. 2010. The effect of timing of earthing up on the performance of four Bambara groundnut landrace cultivars in the Mutasa District of Manicaland Province in Zimbabwe. Second RUFORUM Biennial Meeting 20-24 September 2010, Entebbe, Uganda.
21. Ming, G., L. You-Jin, W. Zi-Fang, T. Xiao-Hong, and W. Chao-Fu. 2008. Effect of tillage system on distribution of aggregates and organic carbon in a hudragric anthrosol Pedosphere. Pedosphere 18 (5): 574-58. DOI: [10.1016/S1002-0160\(08\)60051-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60051-X).
22. Namdari, M., Sh. Rafiei, and A. Jafari. 2010. Investigation of the effect of tractor depth and speed on plowing characteristics. 6th National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering. (In Persian).
23. Nasirian, A. 2008. Evaluation of the application of conventional submersibles and vibration on porosity, penetration resistance and soil permeability and conducting operations of reconnaissance operations in agriculture and industry of Dabal Khazaei Khuzestan. Master Thesis in Agricultural Mechanization Engineering, Islamic Azad University, Shushtar Branch. (In Persian).
24. Omrani, A. 2012. Investigation of the situation of agricultural machinery management in sugarcane cultivation (Case study of Amirkabir agro-industry). Master Thesis in Agricultural Mechanization Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian).
25. Ouedraogo, M., B. Zagre, S. Thorndal, and F. Liu. 2012. Effect of mounding times on yield of Bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.) landraces in Sahel-Burkina Faso. African Journal of Agricultural Research 7: 4505-4511. DOI: [10.5897/AJAR12.974](https://doi.org/10.5897/AJAR12.974).
26. Patil, P. B., V. A. Kamble, and S. V. Chavan. 2018. Effect of soil forces on ridger plough under different working conditions during earthing up operation of sugarcane. International Research Journal of Engineering and Technology 5 (5): 4081- 4083.
27. Raina, S., and J. P. Singh. 2018. Design and development of weeding-cum-earthing-up equipment. International Journal of Agricultural Engineering 11 (2): 324-327. DOI: [10.15740/HAS/IJAE/11.2/324-327](https://doi.org/10.15740/HAS/IJAE/11.2/324-327).
28. Rangiah, P. K., R. Duraj, and S. Renugo palan. 1988. Biofertilizer for suger cane proc-51st. Ann. Conv sugar tech- Assoc.india, 101-107 pp.
29. Rezaei, Gh., and H. Zarei. 2013. Comparison of the application of herbicidal PVC herbicides and common methods of progressive control with cheese herbicide in new sugarcane farms. 5th Iranian Weed Science Conference. September. Agricultural Campus of Tehran University. (In Persian)
30. Sakadzo, N., F. Tafirenyika, and K. Makaza. 2019. Effects of time of earthing up on yield and yield parameters of Irish potato (*Solanum Tuberosum* L.) in Zaka district. Zimbabwe. Agricultural Science 1 (1): 39-46. DOI: <https://doi.org/10.30560/as.v1n1p39>.
31. Sedaghat Hosseini, M., and H. Saebi Fard. 2006. Testing and evaluation of agricultural machinery and equipment: principles and applications. Written by Frank M. Inz. Fourth Edition, Agricultural Education Publishing, Tehran, Pages 326-334. (In Persian).
32. Shrinivasa, D. J., V. D. Paradkar, and S. L. Rathod. 2018. Development and evaluation of mechanical earthing up equipment for groundnut crop. International Journal of Agricultural Engineering 10 (1): 118-123. DOI: [10.15740/HAS/IJAE/10.1/118-123](https://doi.org/10.15740/HAS/IJAE/10.1/118-123).
33. Singh, P., S. N. Singh, A. K. Tiwari, S. K. Pathak, A. K. Singh, S. Srivastava, and N. Mohan. 2019. Integration of sugarcane production technologies for enhanced cane and sugar productivity targeting to increase farmers' income:

- strategies and prospects. *Biotech* 9 (48): 1-15. DOI: [10.1007/s13205-019-1568-0](https://doi.org/10.1007/s13205-019-1568-0).
34. Srivastava, H. 1990. Compaction effect on root growth in sugarcane tropical agriculture, 67: 382-383.
35. Suwanarak, K. 1990. Weed management in sugarcane in Thailand. *BIOTROP Special Publication*, 38: 199-214.
36. Svubure, O., P. C. Struik, A. J. Haverkort, and J. M. Steyn. 2015. Yield gap analysis and resource footprints of Irish potato production systems in Zimbabwe. *Field Crops Research* 178: 77-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.002>.
37. Zandvakili, B., A. Bahadori, J. Saudi, A. Saeedi, Sh. Heydarian, and A. Karami. 2015. Sugarcane from experience to standard. First edition, Kordgar Publishing, Ahvaz, Pp. 56-93. (In Persian).



Experimental Evaluation of Heat Transfer of MF 285 Tractor Radiator, using Nano-fluid Al_2O_3 + Water

B. Rahmatinejad¹, M. Abbasgholipour^{2*}, B. Mohammadi Alasti³

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystem Mechanical engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

3- Assistant Professor, Department of Biosystem Mechanical engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

(*- Corresponding Author Email: Abbasgholipour@bonabiau.ac.ir)

DOI: [10.22067/jam.2020.58870.0](https://doi.org/10.22067/jam.2020.58870.0)

Received: 19-10-2020

Revised: 22-11-2020

Accepted: 19-12-2020

Available Online: 19-12-2020

How to cite this article:

Rahmatinejad, B., M. Abbasgholipour, and B. Mohammadi Alasti. 2022. Experimental Evaluation of Heat Transfer of MF 285 Tractor Radiator, using Nano-fluid Al_2O_3 + Water. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 281-299. (In Persian).

DOI: [10.22067/jam.2020.58870.0](https://doi.org/10.22067/jam.2020.58870.0)

Introduction

More than 30% of the heat energy generated by the engine is transferred by the cooling system. If this heat transfer is not accomplished properly, then the engine heat will increase and it will wear the parts by removing oil film between the pieces. A cooling system is used to remove this heat. The radiator is an important component of this system. Increasing heat transfer in the car engine by the cooling system is possible by using two methods of changing the radiator geometry and optimizing it and using fluids with high thermal properties. In this research, we investigated the improvement of radiator thermal performance using nanofluids using a laboratory model. The effect of nanoparticle volume fraction and cooling flow rate on heat transfer rate, and heat transfer coefficient was investigated.

Materials and Methods

In this research, a laboratory model was designed and manufactured to evaluate the thermal performance of the MF 285 tractor radiator using nanofluid. In this laboratory model, water was combined and used as a base fluid with nanoparticles Al_2O_3 . 20 nm nanoparticles with volume percentages of 1 to 4% were used. An electric stirrer and magnetic stirrer were used to prepare the nanofluid. For the produced fluid to be usable, add SDBS surfactant to it. The temperature of the inlet fluid to the radiator was 85 °C and the cooling fluid flow rate was 3.18 to 15.08 ($lit\ min^{-1}$) and the airflow rate was 3.2 to 6.4 ($m\ s^{-1}$). Two T-type thermocouples are installed to measure the inlet and outlet temperature of the radiator and two other front and rear fans to measure the inlet and outlet air temperature and four more are installed on the radiator to measure the radiator body temperature.

Results and Discussion

The results show that in nanofluid with a 4% volume fraction compared to a 1% volume fraction, it can be seen an increase of 8.7% in density, 7.7% in viscosity, and 9.1% in thermal conductivity, and also a decrease of 8.8% in specific heat. The maximum temperature difference between the inlet and outlet sensors of the radiator when the thermostat is open and the cooling fluid flows through the radiator is 12 to 15 °C. By increasing the speed of the electromotor from 40 Hz to 50 Hz, the temperature of the water cooling fluid at the outlet part becomes 4.7 °C cooler and the air temperature at the outlet part becomes 7.3 °C warmer. As the speed of the electromotor increases, the rate of heat transfer increases. At the maximum value of airflow and cooling fluid, by adding 4% by volume of nanoparticles to the base fluid, the rate of heat transfer can be increased about 37% compared to the base fluid. Compared to water, nanofluid containing 4% by volume of Al_2O_3 at maximum speed has a 28% increase in heat transfer coefficient. Also, by increasing the electric motor speed from 20 Hz to 40 Hz, the heat transfer coefficient of pure water shows about 26% increase and the nanofluid shows an average of 29% increase.

Conclusion

Increasing the volume fraction of nanoparticles suspended Al_2O_3 in the base fluid increases the density, viscosity, and thermal conductivity, which increases the heat transfer rate and reduces the outlet temperature of the radiator. The presence of nanofluid in the engine cooling system increases the heat transfer from the radiator, and despite this feature, the size and weight of the radiator can be reduced without affecting its heat transfer

performance. It can also improve heat transfer performance by increasing the cooling flow rate and the airflow rate.

Keywords: Air flow speed, Fluid flow rate, Laboratory Model, Nanoparticles, Thermal performance

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۲۹۹-۲۸۱

ارزیابی تجربی انتقال حرارت رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از نانوسیال $Al_2O_3 + Water$

بهمن رحمتی نژاد^۱، مهدی عباسقلی‌پور^{۲*}، بهزاد محمدی السی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد حرارتی رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از نانو سیال، مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. در این مدل آزمایشگاهی آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال‌های پایه با نانوذرات Al_2O_3 ترکیب و مورد استفاده قرار گرفتند. از نانوذرات 20 nm با درصد‌های حجمی ۱ الی ۴ درصد استفاده شد. دمای سیال ورودی به رادیاتور حداکثر ۸۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان سیال خنک‌کننده $(3/18 \text{ lit min}^{-1})$ تا $(15/08 \text{ lit min}^{-1})$ و سرعت جریان هوا از $(3/2 \text{ m s}^{-1})$ تا $(6/4 \text{ m s}^{-1})$ متغیر بود. نتایج نشان داد افزایش سرعت جریان مایع خنک‌کننده و سرعت جریان هوا می‌تواند عملکرد انتقال حرارت را بهبود دهد همچنین افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش دمای خروجی می‌گردد. بنابراین با افزایش دور الکتروموتور از ۲۰ Hz به ۴۰ Hz ضریب انتقال حرارت آب خالص به طور متوسط ۲۶٪ و نانو سیال ۲۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. با افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می‌توان نرخ انتقال حرارت را به طور متوسط ۳۷٪ و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را ۲۸٪ نسبت به سیال پایه افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: سرعت جریان سیال، سرعت جریان هوا، عملکرد حرارتی، مدل آزمایشگاهی، نانوذرات

مقدمه

مشخص رسید ترموستات اجازه ورود آب گرم را به رادیاتور می‌دهد. دمای آب از بدنه رادیاتور به روش هدایتی و از سطح آن به هوای اطراف به روش جابه‌جایی منتقل می‌شود. افزایش انتقال حرارت در موتور خودرو به وسیله سیستم خنک‌کاری (رادیاتور خودرو) با استفاده از دو روش تغییر هندسه رادیاتور و بهینه‌سازی آن و استفاده از سیالاتی با خواص حرارتی بالا امکان‌پذیر است. تحقیقاتی در زمینه ایجاد تنوع هندسی در رادیاتور با استفاده از فین‌ها یا لوله‌های مختلف با سطوح زبر و صاف انجام شده است. اگرچه طراحی ساختار هندسی مناسب می‌تواند باعث افزایش انتقال حرارت شود ولی به علت محدودیت‌های فضا و کاربری خاص رادیاتور، تغییر ساختار هندسی چندان کارآمد نمی‌باشد. بنابراین استفاده از سیالات با انتقال حرارت بالا توصیه می‌شود. علاوه بر این، افزایش حرارت در رادیاتور خودرو با استفاده از سیالات آب به همراه اتیلن گلیکول به عنوان ضدیخ به علت ضریب انتقال حرارت پایین امکان‌پذیر نبوده و استفاده از سیالاتی با ضریب انتقال حرارتی بالاتر، متخصصین را بر آن داشته تا به دنبال سیالاتی با ویژگی‌های مناسب بروند (Peyghambarzadeh et al., 2011a). یکی از آثار طراحی آبرودینامیکی خودروها، کوچک شدن فضای جلوی خودروها و محدودیت هندسی چیدمانی اجزای سیستم خنک‌کننده است که نتیجه آن، کاهش فاصله میان رادیاتور، موتور و فن می‌باشد. کاهش این فاصله موجب می‌شود تا جریان هوای خروجی از فن به صورت شعاعی حرکت کند و از آن‌جا که نوع فن در

احتراق مخلوط سوخت و هوا در موتورهای احتراق داخلی تولید قدرت نموده که بخشی از آن مفید بوده و بخش دیگر آن توسط سیستم خنک‌کننده و اگزوز تلف می‌شود. تقاضا برای موتورهای قدرتمند در فضای کوچک‌تر موتور و سیستم‌های خنک‌کاری مشکلاتی در میزان تلفات گرما در رادیاتور خودرو به وجود آورده است. بیش از ۳۰ درصد انرژی حرارتی تولید شده موتور توسط سیستم خنک‌کاری منتقل می‌شود. و در صورتی که این انتقال حرارت به درستی صورت نگیرد گرمای موتور افزایش یافته و با از بین رفتن فیلم روغن بین قطعات باعث ساییدگی قطعات می‌شود. برای از بین بردن این حرارت از سیستم خنک‌کننده استفاده می‌شود. رادیاتور جزء مهمی از این سیستم است. زمانی که سیال خنک‌کننده از میان موتور حرکت می‌کند گرمای تولید شده در آن را جمع نموده و زمانی که به یک حد

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Abbasgholipour@bonabiau.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.2020.58870.0

سیستم خنک‌کاری خودرو غالباً جریان محوری است، این شرایط سبب می‌شود تا فن در حالتی غیر از شرایط طراحی کار کند. به همین جهت، طراحی بهینه‌ی سیستم خنک‌کاری خودرو اهمیت ویژه‌ای دارد. صبرعلیلو و همکاران شدت صوت پروانه محوری رادیاتور تراکتور در تونل باد را اندازه‌گیری کرده و با نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه کردند (Sabralilou, 2020). تاکنون مطالعات تجربی و تئوری گسترده‌ای جهت افزایش هدایت حرارتی سیال با استفاده از ذرات معلق بسیار ریز انجام شده که به‌عنوان راهکار جدیدی جهت افزایش انتقال حرارت شناخته شده است. در این راستا ماکسول در سال ۱۹۸۱ تحقیقاتی در این زمینه انجام داد که در آن ذرات افزودنی به سیال در مقیاس میلی‌متر و میکرومتر بود (Maxwell, 1891). این روش دارای مشکلاتی، از جمله ته‌نشین شدن ذرات، کند شدن جریان سیال، ساییدگی لوله‌ها و افت فشار شدید جریان بود. در مقابل میکروذرات، نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، این مشکلات را نداشت. افزودن مواد فلزی با ابعاد نانومتر به سیال عامل معمولی مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن صنعتی، نخستین بار توسط چوی پیشنهاد شد (Choi, 1995). داس و همکاران به بررسی جامع از مطالعات انجام شده در زمینه کاربرد نانوسیالات درون مبدل‌های حرارتی برای به‌دست آوردن یک تئوری جامع پرداختند. در این تحقیق رفتار حرارتی نانو ذرات درون سیالات پایه بررسی شد و دریافتند که نانو سیال‌ها هدایت حرارتی را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (Das et al., 2006). محققین متعددی در زمینه‌ی بررسی رفتار حرارتی رادیاتورها در سیستم خنک‌کننده‌ی خودرو، تحقیق نموده‌اند. گیفورد و همکاران تاثیر اجزای پایین‌دست فن، نظیر موتور را بر روی فن‌های محوری در سیستم خنک‌کاری خودرو مورد بررسی قرار داده و مشخص نمودند که اجزای پایین دست فن، در افزایش افت فشار و در نتیجه، کاهش دبی جریان، نقش موثری دارند (Gifford et al., 2006). اولایت و همکاران با توسعه یک مدل ریاضی دقیق برای مبدل حرارتی، تاثیر پارامترهای مختلف، نظیر دبی جریان عبوری از رادیاتور را بر روی عملکرد سیستم خنک‌کاری به‌صورت عددی بررسی نموده و نشان دادند که با افزایش دبی هوای عبوری، ظرفیت خنک‌کنندگی افزایش می‌یابد. به‌صورتی که گرادیان منحنی ظرفیت خنک‌کنندگی با افزایش دبی کاهش پیدا می‌کند (Oliet et al., 2007). موریس و همکاران با استفاده از جریان سنج سیم داغ، توزیع سرعت در پایین دست فن را در یک سیستم خنک‌کاری خودرو اندازه‌گیری نموده و نشان دادند که جریان خروجی فن، چرخشی بوده و در اطراف تویی و پره، پروفیل جریان کاملاً متفاوت می‌باشد (Morris et al., 1998). چيو تاثیر غيريكناختي جريان را بر ميزان انتقال حرارت در سيستم خنك‌كاري خودرو مورد مطالعه قرار داده و نشان داد غيريكناختي سرعت در

جریان ورودی رادیاتور، به شدت عملکرد حرارتی آن را کاهش می‌دهد (Chiou, 1980). لونگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار رادیاتور ماشین را با استفاده از نانوذرات مس در اتیلن گلیکول به‌عنوان خنک‌کننده بررسی کردند. آن‌ها اثر کسر حجمی نانوذرات مس و تاثیر عدد رینولدز هوا و خنک‌کننده را بر روی عملکرد حرارتی رادیاتور و نیز افت فشار خنک‌کننده و توان پمپ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که شدت انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی نانوسیالات زیاد می‌شود. علاوه بر این عملکرد حرارتی رادیاتور با استفاده از نانوسیال با خنک‌کننده اتیلن گلیکول با اعداد رینولدز هوا و خنک‌کننده افزایش می‌یابد. همچنین گزارش کردند حدود ۱۲/۱۳ درصد افزایش در توان پمپ در غلظت ۲ درصد نانوذرات مس در دبی حجمی ۰/۲ متر مکعب بر ثانیه نسبت به سیال پایه لازم است (Leong et al., 2010). پیغمبرزاده و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی نانوذرات اکسید آلومینیوم را به آب خالص در یک نمونه رادیاتور خودرو پراید اضافه کردند. با توجه به نتایج آن‌ها با جایگزین کردن نانوسیال به‌جای آب خالص، ضریب انتقال حرارت سیال خنک‌کننده ۴۵ درصد افزایش یافت (Peyghambarzadeh et al., 2011a). پیغمبرزاده و همکاران در سال ۲۰۱۱ در تحقیق دیگری نانو ذرات اکسید آلومینیوم را به مخلوط آب و اتیلن گلیکول اضافه کردند. با توجه به نتایج آن‌ها با افزودن یک درصد نانوذرات اکسید آلومینیوم به مخلوط آب و اتیلن گلیکول، میزان ضریب انتقال حرارت سیال خنک‌کننده ۴۰ درصد افزایش یافت (Peyghambarzadeh et al., 2011b). راجا و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی بر مشخصات نانوسیال‌ها، مشخصات انتقال حرارتی و کاربردهای آن پرداختند. آن‌ها مطالعات اخیر محققان را بررسی نمودند و متوجه شدند جنبه‌های مختلف نانوسیال‌ها از جمله رسانایی گرمایی، ویسکوزیته، مطالعات تجربی، مطالعات عددی انتقال حرارت و کاربردهای نانوسیال‌ها مورد توجه بوده است (Raja et al., 2016). بزرگ بیگدلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی به بررسی بر انتقال پدیده انتقال حرارت و جرم نانو سیال خنک‌کننده با تمرکز ویژه برای استفاده در خودرو پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تعلیق مهندسی نانوذرات (نانوسیال) می‌تواند مشخصه خواص حرارتی را افزایش دهد. با توجه به افزایش نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده عملکرد فوق‌العاده بالا، اخیراً نانوسیال‌ها به‌عنوان ماده سردکننده رادیاتور ماشین شناخته می‌شوند. با این حال طبیعت چند مقیاسی نانوسیال دلالت بر روابط کوچک اما با اهمیت بین ویژگی‌های طراحی، در نتیجه خواص فیزیکی حرارتی که کاملاً شناخته شده نیست می‌باشد (Bozorg Bigdeli et al., 2016). حیدریگی در تحقیقی به بررسی تاثیر استفاده از نانوسیال مس، نانوسیال نقره و اکسید آلومینیوم بر میزان انتقال حرارت رادیاتور موتور تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ پرداخته و نشان داد در شرایط کاری

بررسی تحت شرایط آماده‌سازی اولیه قرار گرفت بدین منظور از ساده‌ترین روش آماده‌سازی نمونه‌ها، یعنی روش خرد کردن استفاده شد. پس از آن، با تهیه سوسپانسیون مایع از ذرات و رسوب دادن بر روی گرید، برای انجام مطالعات توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری نمونه ارسال گردید.

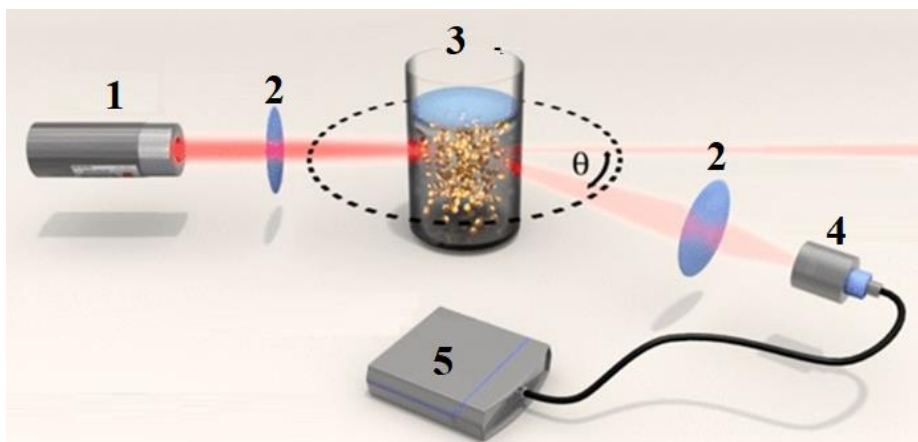
برای اندازه‌گیری قطر نانوذرات از روش پراکنش نور استفاده شد. در این روش یک پرتو لیزر به سوسپانسیون تابانده می‌شود و پراکندگی نور لیزر توسط یک آشکارساز نوری ثبت می‌شود. ذرات با اندازه‌های مختلف، نور را به صورت‌های مختلفی پراکنده می‌کنند. ذرات بزرگ‌تر، نور را در زوایای کوچک‌تری پراکنده می‌کنند، در حالی که ذرات کوچک‌تر، در محدوده زوایای وسیع‌تری نور را پراکنده می‌سازند. پراکندگی نور توسط ذرات جامد باعث ایجاد یک الگو از نقاط روشن و تاریک روی آشکارساز می‌شود. این الگوهای روشن و تاریک با حرکت ذرات تغییر می‌کنند و باعث می‌شوند که الگوی ایجاد شده با زمان تغییر کند. نرم‌افزار دستگاه DLS با بررسی تغییرات این الگو با زمان می‌تواند توزیع اندازه ذرات را مشخص کند. ذرات بزرگ‌تر سرعت کمتری در محلول نسبت به ذرات کوچک‌تر دارند. از این رو تغییرات الگوی پراش در سوسپانسیونی با ذرات بزرگ‌تر کندتر از سوسپانسیونی با ذرات ریزتر تغییر می‌کند.

موتور و شرایط مزرعه‌ای شخم با گاوآهن به عمق ۲۰ سانتی‌متر انتقال حرارت با غلظت‌های ۸ و ۱۲ درصد از نانوسیال مس و نقره و دی‌اکسید آلومینیوم به ترتیب ۱۶، ۳۲، ۱۱/۳ و ۱۳ درصد افزایش یافت (Heydarbeigi, 2017). در تحقیق حاضر به کمک مدل آزمایشگاهی طراحی شده ارزیابی انتقال حرارت بر روی رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از نانوسیال $Al_2O_3 + Water$ با دو روش نظری و تجربی انجام شد. نظر به این که تاکنون برای بررسی انتقال حرارت رادیاتور مسی فرگوسن ۲۸۵ از مدل آزمایشگاهی استفاده نشده است تحقیق حاضر انجام گرفت. بی‌شک بررسی مقدار انتقال حرارت بر روی مدل آزمایشگاهی و شرایط محیطی ثابت باعث استخراج اطلاعات دقیق انتقال حرارت خواهد شد.

مواد و روش‌ها

تهیه نانو سیال

در این تحقیق ابتدا نانوذرات Al_2O_3 توسط دستگاه PNC1k-C شرکت پیام‌آوران نانو فن‌آوری فردانگر به روش انفجار الکتریکی سیم به‌صورت نانوکلوئیدهای فلزی تولید شد. برای عکس‌برداری از نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی عبوری^۱ مدل H9500 شرکت HITACHI استفاده شد. برای دستیابی به نتایج مطلوب نمونه مورد



شکل ۱- اندازه‌گیری قطر نانو ذرات به روش DLS

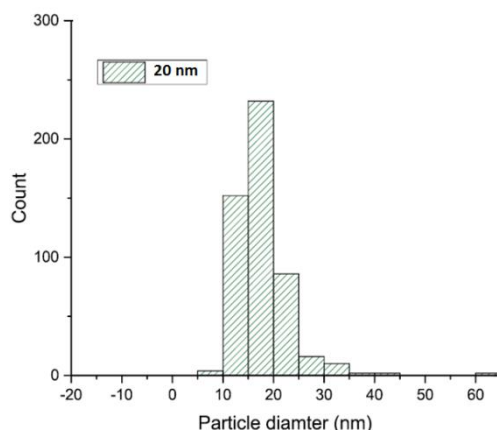
Fig.1. Measurement of nanoparticle diameter by DLS method

$$d_H = \frac{KT}{3\pi\eta D} \quad (1)$$

d_H : قطر هیدرودینامیکی ذره، K : ثابت بولتزمن، η : ویسکوزیته دینامیکی حلال است که به دما وابسته بوده و به چگالی و فشار سیستم مرتبط نیست، T : دمای مطلق و D : ضریب نفوذ است (Pecora, 1985). در شکل ۲ هیستوگرام اندازه‌گیری قطر ذرات آورده شده است.

اجزای سیستم اندازه‌گیری قطر نانو ذرات به روش DLS مطابق شکل ۱ به ترتیب نشان‌دهنده: ۱- لیزر، ۲- عدسی، ۳- نمونه، ۴- آشکارگر و ۵- ارتباط‌سنج می‌باشد. ارتباط بین اندازه ذرات و سرعت حرکت براونی توسط رابطه استوکس انیشتین برقرار می‌شود (رابطه ۱).

1- Transmission Electron Microscope (TEM)



شکل ۲- هیستوگرام اندازه‌گیری قطر نانو ذرات AL_2O_3

Fig.2. The measurement histogram the diameter of nanoparticles AL_2O_3

کارهای مهندسی مناسب باشد از ۱٪ وزنی مواد فعال‌کننده سطحی (سدیم دودسیل بنزن سولفونات) استفاده شد. مشخصات مواد فعال‌کننده سطحی در جدول ۱ آورده شده است.

برای تهیه نانو سیال از یک هم‌زن برقی با قابلیت تنظیم دور از ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. و سپس از یک تکان‌دهنده مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه و قدرت گرمایش ۴۰۰W استفاده شد. به منظور حفظ پایداری محلول برای این که برای

جدول ۱- مشخصات مواد فعال‌کننده سطحی

Table 1- Specifications of surfactants

دانشیه Density ($g \cdot cm^{-3}$)	وزن مولکولی Molecular Weight ($g \cdot mol^{-1}$)	ساختار فرمولی Formula structure	فرمول مولکولی Molecular formula	ماده فعال سطحی Surfactant
1.02	348.48		$C_{18}H_{29}NaO_3S$	سدیم دودسیل بنزن سولفونات Sodium dodecyl benzene (Kong and Bao, 2017) sulfonate

و همچنین بررسی سرعت پروانه خنک‌کننده در یک موتور، ابتدا طرحواره‌ای از آن در (شکل ۳) طراحی شد.

سپس براساس طرحواره طراحی شده اقدام به ساخت نمونه اولیه آزمایشگاهی جهت بررسی انتقال حرارت رادیاتور شد. دستگاه ساخته شده دارای یک مخزن، المنت گرمکن، پمپ گریز از مرکز، فلومتر، ترموستات و محل نشیمنگاه آن، شیرهای کنترل جریان، فن، ترموکوپل‌های اندازه‌گیری دما، رادیاتور، الکتروموتور سه فاز (دور حداکثر ۱۳۸۵ RPM)، اینورتر، ترموستات گرمایی و لامپ پیلوت می‌باشد (شکل ۴)

جرم نانو ذرات (m_p) و جرم سیال پایه (m_f) با دقت (0.01 gr) اندازه‌گیری شد برای تخمین درصد وزنی از رابطه (۲) می‌توان استفاده نمود (Das et al., 2003).

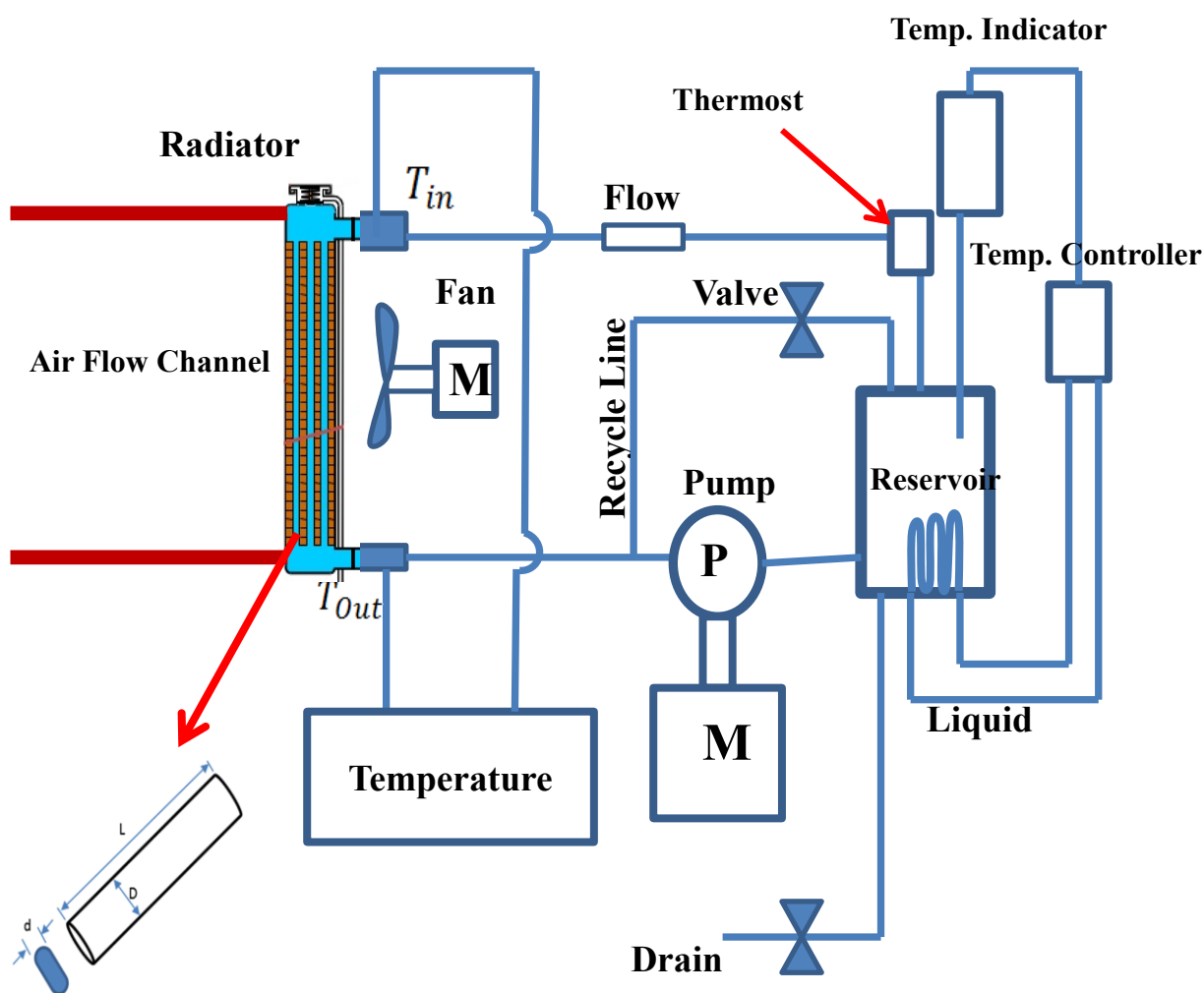
$$\phi = \left(\frac{m_p}{m_p + m_f} \right) \times 100 \quad (2)$$

اگر چگالی نانو ذرات را (ρ_p) و چگالی سیال پایه را با (ρ_f) نشان دهیم می‌توان از رابطه (۳) درصد حجمی نانو ذرات (Φ) در ۲۵ درجه سانتی‌گراد را برآورد نمود (Wang and Leon, 2010).

$$\Phi = \frac{\frac{m_p}{\rho_p}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_f}{\rho_f}} \quad (3)$$

تشریح دستگاه آزمایش

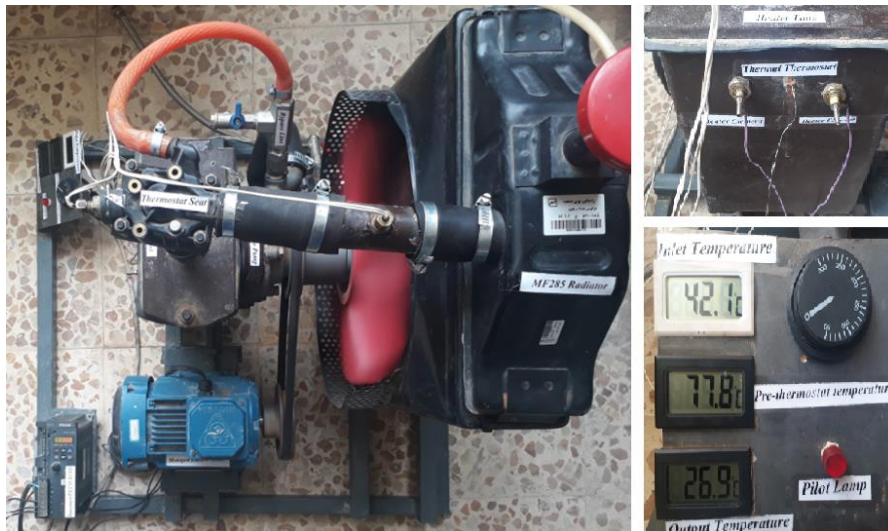
به منظور ساخت یک مدل آزمایشگاهی جهت تست مقدار انتقال حرارت در رادیاتور با سیال‌های متفاوت و در دبی سیال‌های مختلف



شکل ۳- شماتیک سیستم طراحی شده
Fig.3. Schematic of designed system

دبی سنج پیستونی PD – SDC برای اندازه‌گیری دبی استفاده شد. از دو عدد ترموکوپل نوع T برای اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی به رادیاتور و دو عدد دیگر جلو و عقب فن برای اندازه‌گیری دمای هوای ورودی و خروجی و ۴ عدد دیگر بر روی رادیاتور نصب شد تا دمای بدنه رادیاتور اندازه‌گیری شود. با توجه به هدایت حرارتی بالای مس و ضخامت کم لوله‌ها می‌توان دمای بیرون و داخل لوله‌ها را یکسان فرض نمود. کالیبراسیون ترموکوپل‌ها انجام شد و دقت اندازه‌گیری: $\pm 1^\circ\text{C}$ (0 to 150°C) برآورد گردید. مشخصات رادیاتور استفاده شده در این تحقیق در جدول ۲ آورده شده است.

حجم کل مایع در گردش ۱۰ lit است و در کل مراحل آزمایش ثابت می‌باشد. برای این که پمپ گریز از مرکز و فن بتواند دوره‌های متغیر داشته باشد الکتروموتور سه فاز که محرک پمپ می‌باشد با یک اینورتر راه‌اندازی می‌شود. با توجه به اندازه مخزن و مقدار انرژی مورد نیاز از دو عدد گرمکن ۶۰۰۰ W استفاده شد. برای اطمینان از این که دما از یک حدی بالاتر نرود از یک ترموستات گرمایی داخل مخزن استفاده شد. برای ثابت نگه داشتن دمای سیال ورودی به رادیاتور بین ۴۰ الی ۸۵ درجه سانتی‌گراد از یک PID کنترلر استفاده شد. این کنترل‌کننده دما را روی Set Point ثابت نگه می‌دارد. از ترموکوپل قبل از ترموستات برای ورودی PID کنترلر استفاده شد. از



شکل ۴- مدل آزمایشگاهی ساخته شده

Fig.4. Made laboratory model

جدول ۲- مشخصات رادیاتور استفاده شده در این تحقیق

Table 2- Specifications of the radiator used in this research

جنس مخزن رادیاتور Radiator tank material	جنس شبکه رادیاتور Radiator network material	تعداد ردیف لوله رادیاتور Number of rows of radiator pipes	سایز لوله رادیاتور Radiator pipe size	اندازه شبکه رادیاتور Radiator grille size	نام محصول Product name
ورق برنجی Brass sheet CuZn30	مسی - برنجی Copper-brass CuSn	۶ ردیف 6 rows	12.5 mm	487 × 380 × 50	MF رادیاتور تراکتور مسی فرگوسن 285 Messi Ferguson Tractor Radiator MF 285

استفاده می‌کنند (Xiang and Arun, 2008).

(۵)

$$\begin{aligned}
 (\rho C_p)_{eff} &= \rho_{eff} \left(\frac{Q}{m \Delta T} \right)_{eff} = \rho_{eff} \frac{Q_b + Q_p}{(m_b + m_p) \Delta T} \\
 &= \rho_{eff} \frac{(m C_p)_b \Delta T + (m C_p)_p \Delta T}{(m_b + m_p) \Delta T} \\
 &= \rho_{eff} \frac{(\rho C_p)_b V_b + (\rho C_p)_p V_p}{\rho_b V_b + \rho_p V_p} \\
 &= (1 - \phi_p)(\rho C_p)_b + \phi_p(\rho C_p)_p
 \end{aligned}$$

که می‌تواند به صورت رابطه (۶) نوشته شود.

$$C_{p,eff} = \frac{(1 - \phi_p)(\rho C_p)_b + \phi_p(\rho C_p)_p}{(1 - \phi_p)\rho_b + \phi_p\rho_p} \quad (۶)$$

$C_{p,eff}$ گرمای ویژه فشار ثابت نانو سیال، اندیس P برای نانوذرات و اندیس b برای سیال پایه است. پارامترهایی چون حجم نانوذرات، اندازه و شکل آن‌ها، سیال پایه، ضخامت نانولایه، تکنیک‌های پراکندگی، دما و مقدار pH و حرکت برآنی نانوذرات در تعیین ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نقش دارند (Masuda et al.,

خواص ترموفیزیکی نانو سیال

با فرض این که نانو ذرات به خوبی درون سیال پایه پخش شده باشد و غلظت ذرات در کل سیستم یکنواخت باشد خواص فیزیکی موثر مخلوط‌های مورد مطالعه را می‌توان با استفاده از برخی فرمول‌های کلاسیک که معمولاً برای مایعات دو فاز استفاده می‌شود را به دست آورد. از این روابط برای پیش‌بینی خصوصیات نانوسیالات مانند چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته دینامیکی و هدایت حرارتی در دماها و غلظت‌های مختلف استفاده شده است. در این مقاله از روابط زیر برای نانوسیال استفاده شده است.

بر اساس رابطه (۴) دانسیته یا چگالی نانوسیالات بر اساس قانون مخلوط‌ها از رابطه پاک و چو محاسبه می‌کنند (Pak and Cho, 1998).

$$\rho_{eff} = \left(\frac{m}{V} \right)_{eff} = \frac{m_b + m_p}{V_b + V_p} = \frac{\rho_b V_b + \rho_p V_p}{V_b + V_p} = \frac{(1 - \phi_p)\rho_b + \phi_p\rho_p}{(۴)}$$

ρ_{eff} چگالی نانو سیال، V_b حجم سیال پایه و V_p حجم نانوذرات است. اکثر محققان از رابطه (۵) جهت تعیین ظرفیت گرمایی ویژه

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال پیشنهاد شده است. که از میان این تئوری‌ها مدل ماکسول-گارنت (Maxwell Garnett, 1904) که تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد (Nisar, 2019) برای این تحقیق در نظر گرفته شد (رابطه ۸).

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{(K_p + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_p)}{(K_p + 2K_f) + \phi(K_f - K_p)} \quad (۸)$$

ϕ کسر حجمی ذرات نانو، ρ دانسیته، اندیس p نشان‌دهنده‌ی نانوذرات، b نشان‌دهنده‌ی سیال پایه و nf نشان‌دهنده‌ی نانو سیال می‌باشد.

ویژگی‌های فیزیکی Al_2O_3 و سیال پایه استفاده شده در این تحقیق در جدول ۳ آورده شده است. در این تحقیق از نانوذرات کروی ۲۰ nm با درجه خلوص ۹۹ درصد استفاده شد.

1993; Turgut et al., 2009; Bahiraei et al., 2012; Fan et al., 2008; Ghadimi and Metselaar, 2013; Yiamsawas et al., 2013). مدل‌های تئوری مختلفی برای محاسبه ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات ارائه شده اند از میان این مدل‌ها از رابطه انیشتین برای محاسبه ویسکوزیته استفاده شد (Einstein, 1906) این رابطه برای نانو ذرات کروی و درصد حجمی‌های پایین پیشنهاد شده است (رابطه ۷).

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - 2.5\phi) \quad (۷)$$

ϕ کسر حجمی ذرات نانو، μ_f ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه و μ_{nf} ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال می‌باشد.

تئوری‌های مختلفی از جمله تئوری ماکسول، مدل همیلتون-کراسر، ماکسول-گارنت، براگمن و غیره برای محاسبه

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانو ذرات (Wen et al., 2009)

Table 3- Thermophysical properties of base fluid and nanoparticles (Wen et al., 2009)

خاصیت Properties	واحد Unit	Al_2O_3	اتیلن گلیکول Ethylene glycol	آب Water
گرمای ویژه (Specific heat)	$c_p (J kg^{-1} K^{-1})$	765	2420.6	4179
چگالی (Density)	$\rho (kg m^{-3})$	3970	1110.2	997.1
ضریب هدایت حرارتی (Thermal conductivity coefficient)	$K (W m^{-1} K^{-1})$	40	0.253	0.613
ضریب β (Coefficient β)	$\beta \times 10^{-5} (K^{-1})$	0.85	57	21

که در آن $\eta = \frac{N}{m}$ و N یک خاصیت گسترده (مانند جرم، انرژی یا مومنتم) سیستم است. همچنین پایین نویس CV برای حجم کنترل و CS برای سطح کنترل استفاده می‌شود.

حال اگر با توجه به معادله انتقال رینولدز معادله پیوستگی را بنویسیم یعنی به جای N از جرم m استفاده کنیم رابطه (۱۴) حاصل می‌شود.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho V dA = 0 \quad (۱۴)$$

این معادله بیان می‌کند که نرخ افزایش جرم داخل حجم کنترل به‌علاوه نرخ خالص خروجی جرم از سطح کنترل صفر است. چون جریان دائمی در لوله داریم پس دبی جرمی خالص خروجی از سطح کنترل صفر است (رابطه ۱۵)

$$\int_{cs} \rho V dA = 0 \quad (۱۵)$$

برای جریان دائمی در یک لوله جریان، معادله پیوستگی بین دو مقطع از رابطه (۱۶) به‌دست می‌آید (White, 2002).

$$m^0 = \rho_1 V_{av1} A_1 = \rho_2 V_{av2} A_2 \Rightarrow m^0 = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (۱۶)$$

چون $A_1 = A_2$ است و سیال در کل سیکل ثابت است پس در حالت کلی میزان جرم جریان خنک‌کننده از رابطه (۱۷) به‌دست می‌آید.

تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی

بر اساس قانون سرمایش نیوتن انتقال حرارت جابه‌جایی از رابطه (۹) به‌دست می‌آید (Hussein et al., 2014).

$$Q = hA\Delta T = hA(T_b - T_w) \quad (۹)$$

که در آن Q گرمای منتقل شده، A مساحت لوله‌ها، ΔT اختلاف دما و T_b دمای کلی می‌باشد. که T_b از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید.

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (۱۰)$$

(T_{out} , T_{in}) دمای ورودی و خروجی می‌باشد و T_w دمای لوله‌ها می‌باشد که از طریق چهار عدد ترموکوپل و توسط رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید.

$$T_w = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a T_i \quad (۱۱)$$

و میزان انتقال حرارت از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید.

$$Q = m^0 \times c_p \times (T_{in} - T_{out}) \quad (۱۲)$$

در این رابطه Q گرمای منتقل شده، c گرمای ویژه و m^0 دبی جرمی جریان می‌باشد.

برای به‌دست آوردن دبی جرمی نیاز است ابتدا معادله رینولدز با توجه به رابطه (۱۳) برای سیستم نوشته شود (White, 2002):

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{system} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \eta \rho dV + \int_{cs} \eta \rho V dA \quad (۱۳)$$

$$Re = \frac{\rho \times D_H \times u}{\mu} \quad (23)$$

u سرعت سیال در قسمت ورودی رادیاتور است که با توجه به دبی (Q) و سطح مقطع لوله رادیاتور (A) از رابطه (۲۴) به دست می‌آید.

$$u = \frac{Q}{A} \quad (24)$$

ضریب اصطکاک (f) با توجه به ΔP به دست آمده از مانومتر از رابطه (۲۵) به دست می‌آید.

$$f = \frac{2 \times \Delta P}{D_H \times \rho \times u^2} \quad (25)$$

ضریب اثربخشی ε برای رادیاتور از رابطه (۲۶) به دست می‌آید.

$$\varepsilon = \frac{(m \cdot c_p)_h (T_{in} - T_{out})}{(m \cdot c_p)_c (T_{in} - T_{air})} \quad (26)$$

در این رابطه h و c به ترتیب سیال گرم و سرد را توصیف می‌کند و T_{air} دمای محیط را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

بررسی زمان ته‌نشینی

برای بررسی زمان ته‌نشینی آزمایش عکس برداری از رسوب انجام گرفت نتایج نشان از پایداری Al_2O_3 در ۲۲ روز اول بود و بعد از آن کم کم ته‌نشینی آغاز می‌شود (شکل ۵). نکته قابل ذکر آن است که در این مرحله اگر از هم‌زن برقی و تکان‌دهنده مغناطیسی دوباره استفاده شود مخلوط حالت سوسپانسیونی خود را دوباره به دست می‌آورد. نتایج به دست آمده با منبع (Kouloulis, 2016) ارزیابی و مورد تایید قرار گرفت.

$$m^0 = \rho \times Q \quad (17)$$

در این رابطه m^0 دبی جرمی با واحد $(kg \cdot s^{-1})$ ، ρ چگالی با واحد $(kg \cdot m^{-3})$ و Q دبی حجمی با واحد $(m^3 \cdot s^{-1})$ می‌باشد.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (رابطه ۱۸) از تساوی دو رابطه (۹) و (۱۲) به دست می‌آید.

$$h_{exp} = \frac{m^0 \times c_p \times (T_{in} - T_{out})}{A \times (T_b - T_w)} \quad (18)$$

برای جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته با درجه حرارت ثابت در سطوح لوله عدد نوسلت از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود (Holman, 1989).

$$Nu = \frac{h D_H}{K} = 3.66 \quad (19)$$

در این رابطه D_H قطر هیدرولیکی است که از رابطه (۲۰) به دست می‌آید (Hussein et al., 2014).

$$D_H = \frac{4 \times [\frac{\pi}{4} d^2 + (D-d) \times d]}{\pi \times d + 2 \times (D-d)} \quad (20)$$

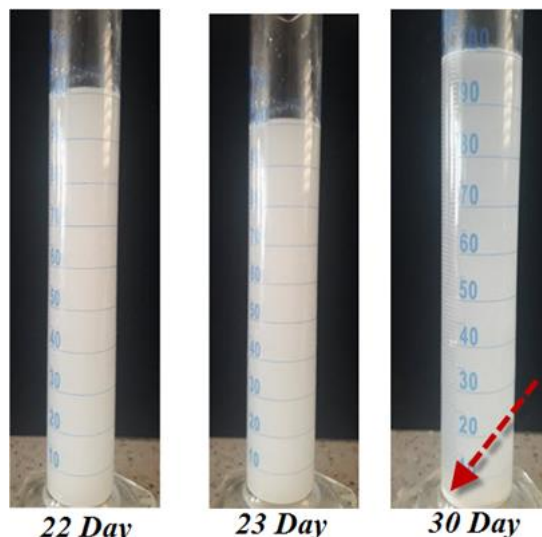
برای محاسبه عدد نوسلت موضعی در جریان متلاطم کاملاً توسعه‌یافته در لوله‌های صاف از تشابه چیلتون کولبرن می‌توان استفاده کرد. که در نهایت به شکل رابطه (۲۱) تحت عنوان رابطه کولبرن ساده می‌شود (Holman, 1989).

$$Nu = 0.023 Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

Nu عدد نوسلت، Re عدد رینولدز و Pr عدد پراتل است که توسط رابطه (۲۲) محاسبه شد.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (22)$$

Pr عدد پراتل، c_p گرمای ویژه در فشار ثابت، μ ویسکوزیته دینامیکی و k ضریب هدایت حرارتی است. عدد رینولدز از رابطه (۲۳) به دست می‌آید.



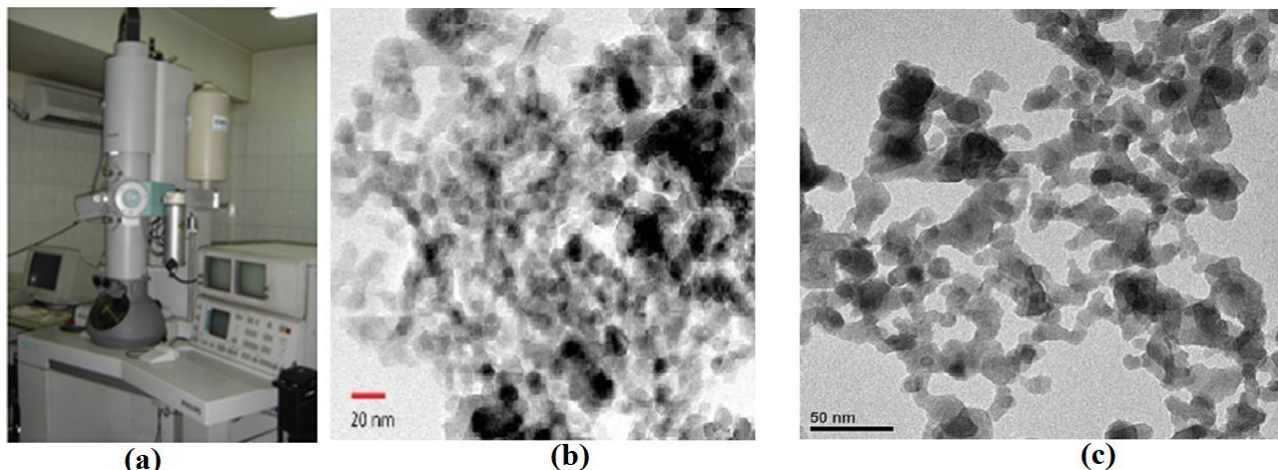
شکل ۵- آزمایش پایداری نانو سیال Al_2O_3 (استفاده از هم‌زن برقی و تکان‌دهنده مغناطیسی به همراه سولفکتانت)

Fig.5. Nanofluid stability test Al_2O_3 (Use electric stirrer and magnetic stirrer with sulfate)

به دست آوردن ساختار مورفولوژی

برای به دست آوردن ساختار مورفولوژی نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده شد. این دستگاه ابزاری ویژه در مشخص نمودن ساختار و مورفولوژی مواد محسوب می شود که

مطالعات ریزساختاری مواد با قدرت تفکیک بالا و بزرگنمایی خیلی زیاد را امکان پذیر می سازد. بعد از آماده سازی نمونه تصور TEM از نانوذرات تهیه گردید. تفاوت شکل ظاهری نانو ذرات ۲۰ nm و ۵۰ nm در شکل ۶ نشان داده شد.



شکل ۶- (a) دستگاه TEM، (b) تصویر TEM از نانو ذرات Al_2O_3 (۲۰ nm)، (c) تصویر TEM از نانو ذرات Al_2O_3 (۵۰ nm)
Fig.6. (a) TEM Device, (b) TEM image of Al_2O_3 nanoparticles (20 nm), (c) TEM image of Al_2O_3 nanoparticles (50 nm)

کسرهای حجمی صفر تا ۴ درصد مقادیر چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه به دست آمد. این مقادیر در جدول ۴ گزارش شده است.

به دست آوردن چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته دینامیکی، نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه، ضریب اصطکاک و ضریب اثربخشی در این قسمت ابتدا بر اساس روابط تخمینی ارائه شده برای

جدول ۴- چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال نسبت به سیال پایه

Table 4- Density, specific heat, viscosity and thermal conductivity of nanofluids compared to base fluid

ماکسول گارنت Maxwell-Garnett (K_{nf}/K_f)	$\mu (kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$ (T=30)	$c_p (J kg^{-1} K^{-1})$	$\rho (kg m^{-3})$	درصد حجمی (%) Volumetric percentage
1	0.79	4179	997.1	0
1.03	0.77	4050	1026	1
1.061	0.75	3924	1056	2
1.092	0.73	3805	1086	3
1.124	0.71	3693	1116	4

(Masuda et al., 1993; Wang and Choi, 1999; Nguyen et al., 2008; Williams et al., 2008) و ماکسول-گارنت با منبع (Maxwell, 1904) مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب اصطکاک با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه افزایش و با افزایش عدد رینولدز کاهش یافت. همچنین با افزایش دبی و کسر حجمی ضریب

نتایج به دست آمده نشان می دهد در نانو سیال با ۴٪ کسر حجمی نسبت به ۱٪ کسر حجمی شاهد افزایش ۸/۷٪ چگالی، ۷/۷٪ ویسکوزیته دینامیکی و ۹/۱٪ ضریب هدایت حرارتی و همچنین کاهش ۸/۸٪ گرمای ویژه هستیم. مقادیر به دست آمده برای چگالی با منابع (Pak and Cho, 1998; Heyhat et al., 2012)، گرمای ویژه با منابع (Pak and Cho, 1998; Pandey

الکتروموتور یا فرکانس کاری آن مشخص شود (جدول ۵). در این مدل برای بررسی دبی از فلومتر مدل پیستونی PD-SDC استفاده شد.

در ادامه بر اساس اطلاعات جدول ۵ می‌توان نمودار سرعت الکتروموتور بر اساس فرکانس کاری را ترسیم نمود که بر اساس این نمودار می‌توان به صورت تقریبی دور الکتروموتور را زمانی که فرکانس کاری را توسط اینورتر اعمال می‌کنیم در دست داشته باشیم این نمودار در شکل ۷ آورده شده است.

اثر بخشی رادیاتور افزایش را نشان داد. این موارد با منبع (Hussein, 2014) ارزیابی و تایید شد.

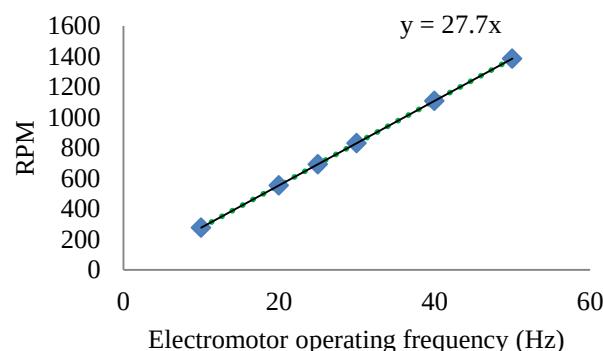
بررسی انتقال حرارت در مدل آزمایشگاهی طراحی شده.
اندازه‌گیری دبی سیال بر اساس فرکانس کاری الکتروموتور

به منظور بررسی مقدار انتقال حرارت در مدل آزمایشگاهی ساخته شده ابتدا نیاز است دبی سیال عبوری به صورت تقریبی بر اساس دور

جدول ۵- اندازه‌گیری دبی سیال در فرکانس‌های کاری متفاوت الکتروموتور

Table 5- Measurement of fluid flow at different operating frequencies of the electromotor

دبی (lit min ⁻¹ Flow)	دور الکتروموتور Electromotor speed (RPM)	فرکانس کاری Operating frequency (HZ)
15.08	1385	50
11.9	1108	40
9.53	831	30
8.1	692.5	25
6.46	554	20
3.18	277	10



شکل ۷- نمودار تعیین سرعت الکتروموتور بر اساس فرکانس کاری آن

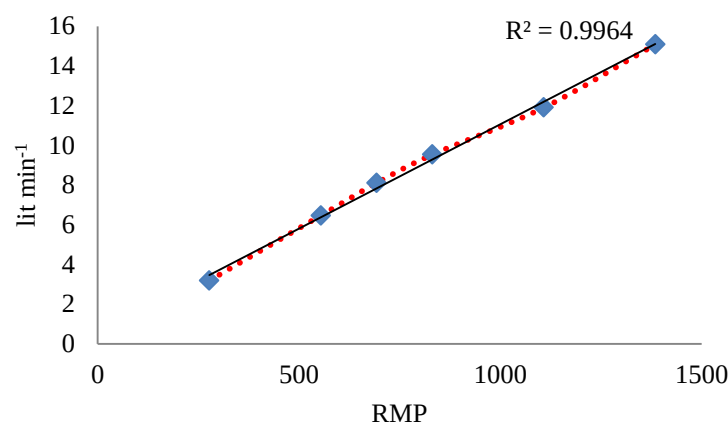
Fig.7. Determination of electromotor speed based on its operating frequency

باشد هوای بیشتری به بدنه مخزن برخورد نموده و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بیشتری در آن انجام می‌شود. بنابراین بین ۱۰ دقیقه (زمانی که الکتروموتور خاموش است) تا حدوداً ۲۵ الی ۳۰ دقیقه (زمانی که الکتروموتور با سرعت حداکثر کار می‌کند) طول می‌کشد تا ترموستات برای اولین بار باز شود. در شکل ۱۰ بعد از این که سنسور قبل از ترموستات که می‌تواند دمای فعال و غیرفعال شدن ترموستات را گزارش کند به دمای حداکثر رسید. شروع به ترسیم نمودار برای دورهای مختلف الکتروموتور نمودیم (شکل ۹).

با این کار می‌توان دبی سیال در حال عبور از سیستم را بر اساس فرکانس کاری یا دور الکتروموتور حدس زد همچنین می‌توان بر اساس داده‌های جدول ۵، نمودار ۸ را ترسیم نمود. که در آن دبی سیال بر اساس سرعت الکتروموتور تعیین می‌شود.

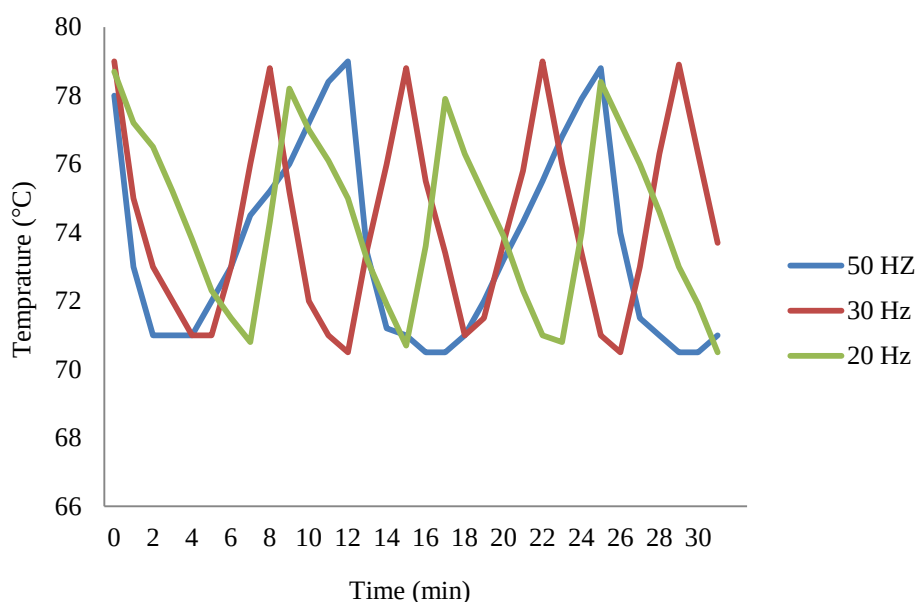
بررسی دمای باز و بسته شدن ترموستات در دورهای مختلف الکتروموتور

در هنگام آزمایش با توجه به دور الکتروموتور زمان اولین باز شدن ترموستات تغییر پیدا می‌کند. چون هرچه قدر سرعت الکتروموتور زیاد



شکل ۸- نمودار تعیین دبی سیال بر اساس سرعت الکتروموتور

Fig.8. Fluid flow chart based on electromotor speed

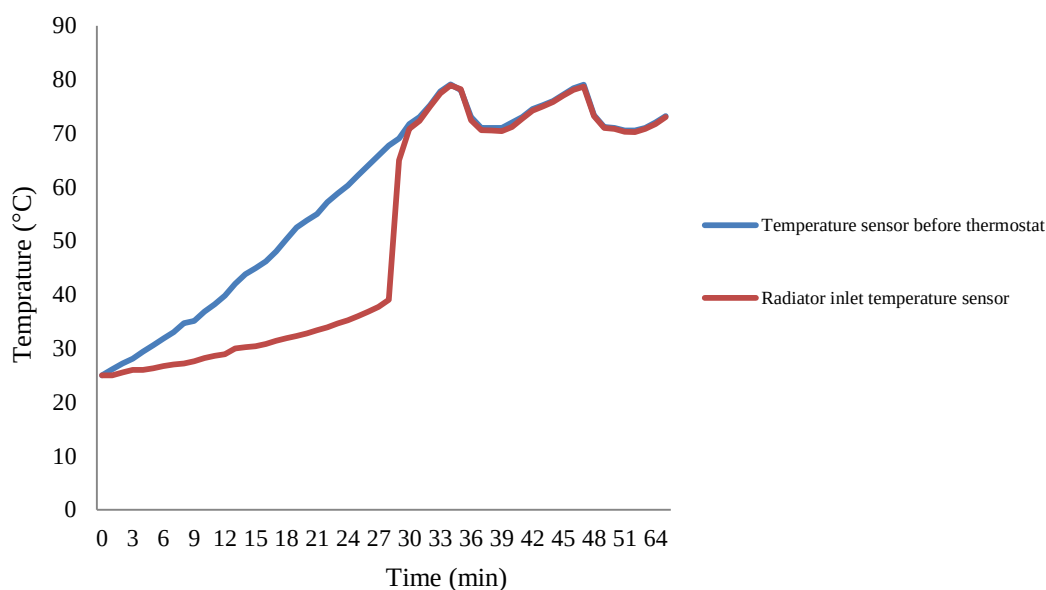


شکل ۹- بررسی دمای باز و بسته شدن ترموستات با سه دور مختلف الکتروموتور

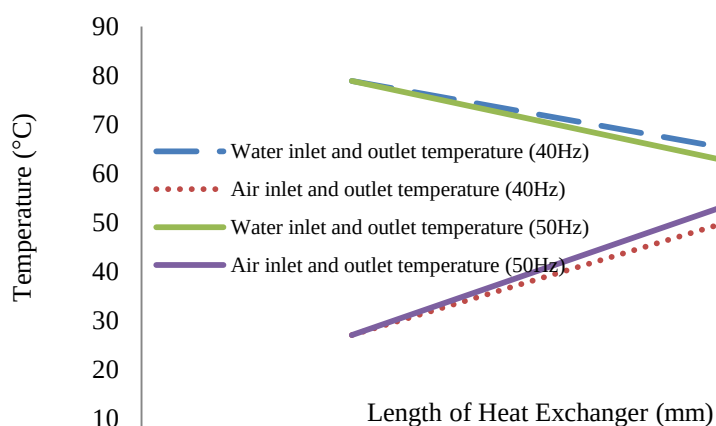
Fig.9. Evaluation of opening and closing temperature of the thermostat with three different electromotor circuits

حداکثر با شیب کندتری اتفاق می‌افتد. با کاهش سرعت این عملیات برعکس می‌شود. یعنی شیب نمودار بسته شدن بیشتر و فرآیند باز شدن حداکثر ترموستات در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. در ادامه سرعت الکتروموتور در حالت حداکثر قرار داده (فرکانس کاری ۵۰ HZ) و دمای سنسورهای قبل ترموستات، ورودی و خروجی رادیاتور در مدل آزمایشگاهی بررسی شده است (شکل ۱۰).

زمانی که سرعت الکتروموتور زیاد است اولاً سیال خنک‌کننده با سرعت بیشتری عبور نموده و دوماً سیال هوا با سرعت بیشتری انتقال حرارت اجباری را انجام می‌دهد. هرچه قدر سرعت الکتروموتور زیاد باشد سرعت خنک شدن سیال سریع‌تر و در نتیجه سرعت بسته شدن سریع‌تر (شیب نمودار نزولی از حداکثر دما به حداقل دما تندتر) می‌باشد. همچنین با باز شدن ترموستات زمان رسیدن به دمای



شکل ۱۰- بررسی دمای سنسورهای قبل ترموستات، ورودی و خروجی رادیاتور در مدل آزمایشگاهی طراحی شده
Fig.10. Evaluation of sensors temperature before the thermostat, radiator inlet and outlet in the designed laboratory model

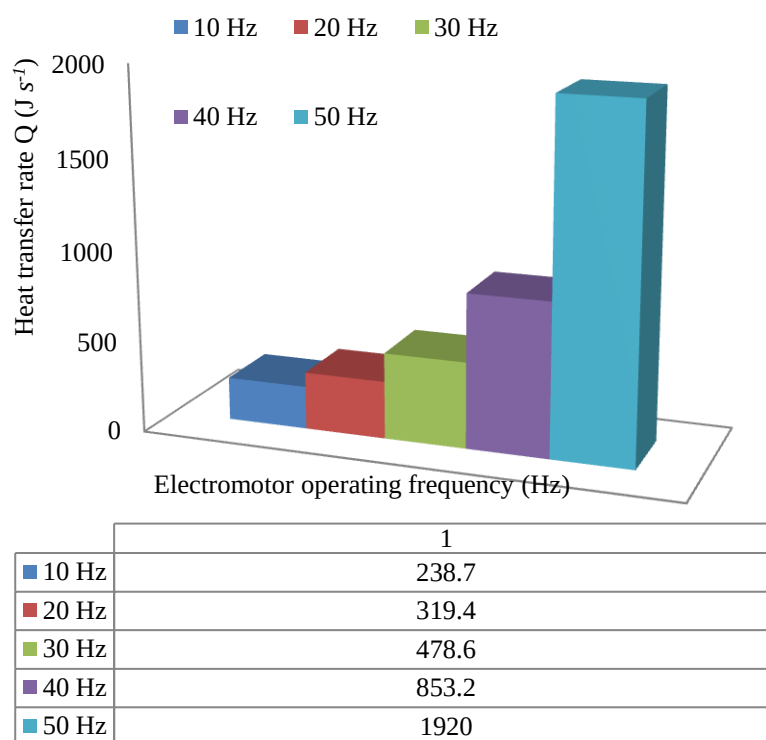


	1	2
Water inlet and outlet temperature (40Hz)	78.9	63.5
Air inlet and outlet temperature (40Hz)	27	52.8
Water inlet and outlet temperature (50Hz)	78.9	60.6
Air inlet and outlet temperature (50Hz)	27	56.7

شکل ۱۱- تغییرات دما در طول رادیاتور در دوره‌های ۴۰ Hz و ۵۰ Hz
Fig.11. Temperature changes during the radiator length in 40 Hz and 50 Hz cycles

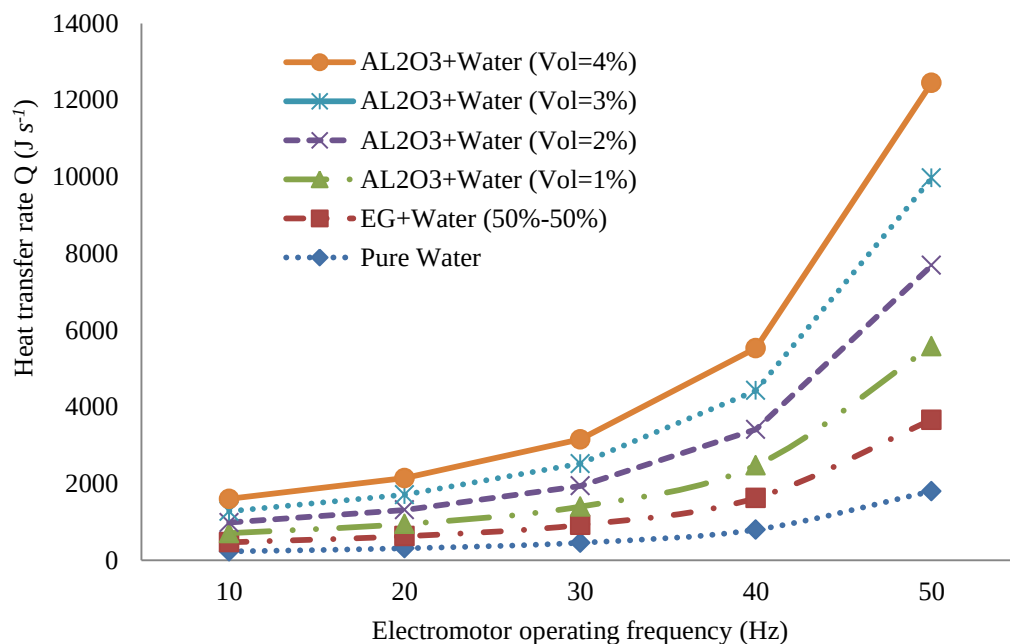
روی سنسور خروجی تاثیر می‌گذارد. با شروع باز شدن ترموستات دمای ورودی رادیاتور یک افزایش سریع و با شیب تند را دریافت نموده و دمای خود را به دمای سنسور قبل ترموستات می‌رساند. از این لحظه به بعد دمای این دو سنسور تقریباً با هم برابر بوده و اختلاف آن‌ها کمتر از یک درجه سانتی‌گراد می‌شود. همچنین با عبور سیال گرم از رادیاتور دمای سنسور خروجی نیز با شیب تندی افزایش یافته و سپس با رسیدن به دمای حداکثر خود با الگوی مناسبی از سنسور دمای ورودی تبعیت می‌کند. اختلاف دمای بین این دو سنسور در مواقعی که ترموستات باز بوده و سیال از رادیاتور عبود می‌کرد به‌طور متوسط بین ۱۲ الی ۱۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. تغییرات دمای هوا و سیال خنک‌کننده آب در طول رادیاتور در دوره‌های ۴۰ Hz و ۵۰ Hz الکتروموتور مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در نمودار شکل ۱۱ گزارش گردید.

با شروع آزمایش با توجه به بسته بودن ترموستات دمای سنسور قبل از ترموستات با یک شیب تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کند. تند بودن یا کند بودن این شیب به توان حرارتی تولید شده المنت‌های حرارتی بستگی دارد. تا قبل از باز شدن ترموستات سنسور بعد از ترموستات تغییرات دمایی کمی را دارد. افزایش دمای کمی که در سنسور ورودی رادیاتور قبل از باز شدن ترموستات ملاحظه می‌شود به خاطر عبور سیال از سوراخ تعبیه شده بر روی ترموستات است و درضمن هرچه قدر دما افزایش پیدا می‌کند جیوه داخل مخزن ترموستات افزایش حجم پیدا کرده و به فنر ترموستات فشار وارد می‌کند و کوچک‌ترین فشاری می‌تواند باعث باز شدن قسمتی از ترموستات و نهایتاً عبور مقداری از سیال خنک‌کننده شود. در این میان سنسور دمای خروجی ترموستات از دمای اولیه هم کمی کمتر را نشان می‌دهد. چون هیچ جریانی با توجه به بسته بودن ترموستات از رادیاتور عبور نکرده و از طرفی چون سیال داخل رادیاتور در حال خنک شدن توسط هوا می‌باشد. دمای داخل رادیاتور کم شده و بر



شکل ۱۲- تاثیر سرعت الکتروموتور بر میزان نرخ انتقال حرارت (در یک درصد حجمی نانو ذرات)

Fig.12. The effect of electromotor speed on heat transfer rate (In one percentage by volume of nanoparticles)



شکل ۱۳- تاثیر سرعت الکتروموتور بر میزان نرخ انتقال حرارت
Fig.13. The effect of electromotor speed on heat transfer rate

به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت. سرعت جریان سیال خنک کننده توسط دی سنج پیستونی PD-SDC از ۱۸/۳ تا ۰/۸/۱۵ لیتر در دقیقه و سرعت جریان هوا توسط فلومتر جریان هوا مدل KIMO LV130 از ۲/۳ تا ۴/۶ متر بر ثانیه اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد در حداکثر مقدار سرعت جریان هوا و سیال خنک کننده با افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می توان نرخ انتقال حرارت را به طور متوسط ۳۷ درصد نسبت به سیال پایه افزایش می یابد (شکل ۱۴).

ضریب انتقال حرارت جابه جایی

در این آزمایش دمای هوای خنک کننده ۲۷ درجه سانتی گراد و اختلاف دمای سیال خنک کننده در قسمت ورودی و خروجی رادیاتور حداکثر مقدار بود. ضریب انتقال حرارت جابه جایی در نانو سیالات با توجه به سرعت جریان و جزء حجمی نانو ذرات تغییر کرده و در صورت وجود شرایط یکسان بیشتر از مقدار مشابه در سیال پایه می باشد (شکل ۱۵).

به طور مثال در مقایسه با آب، نانو سیال حاوی ۴٪ حجمی از Al_2O_3 در دور حداکثر دارای افزایش ۲۸ درصدی در ضریب انتقال حرارت جابه جایی است. همچنین با افزایش دور الکتروموتور از ۲۰ Hz به ۴۰ Hz ضریب انتقال حرارت آب خالص به طور متوسط ۲۶٪ و نانو سیال ۲۹٪ افزایش را نشان می دهد.

نتایج نشان می دهد با افزایش سرعت الکتروموتور از ۴۰ Hz به ۵۰ Hz دمای سیال خنک کننده آب در قسمت خروجی به مقدار ۴/۷ درجه سانتی گراد خنک تر شده و دمای هوای در قسمت خروجی ۷/۳ درجه سانتی گراد گرم تر می شود.

تاثیر سرعت الکتروموتور بر نرخ انتقال حرارت

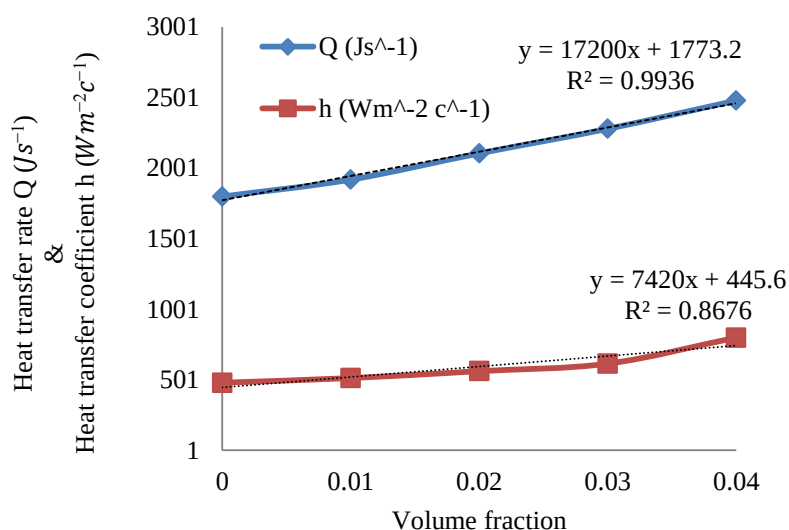
در این آزمایش ترموستات از روی سیستم برداشته شد. تا سیال بدون محدودیت در سیکل دوران داشته باشد. برای حالتی که مقدار نانوذرات یک درصد حجمی می باشد و برای حداکثر اختلاف دمای ورودی و خروجی رادیاتور (۱۵ درجه) مقادیر نرخ انتقال حرارت محاسبه و در نمودار ۱۲ نشان داده شد. نتایج نشان می دهد با افزایش سرعت الکتروموتور از ۱۰ Hz به ۲۰ Hz نرخ انتقال حرارت به طور متوسط ۳۳ درصد افزایش می یابد.

در شکل ۱۳ نرخ انتقال حرارت برای سیال پایه آب و نانو سیال با کسر حجمی مختلف ترسیم شد.

نتایج نشان می دهد در دور حداکثر الکتروموتور، زمانی که کسر حجمی نانو ذرات ۴ درصد است نسبت به زمانی که یک درصد می باشد نرخ انتقال حرارت متوسط ۲۹ درصد بیشتر می شود.

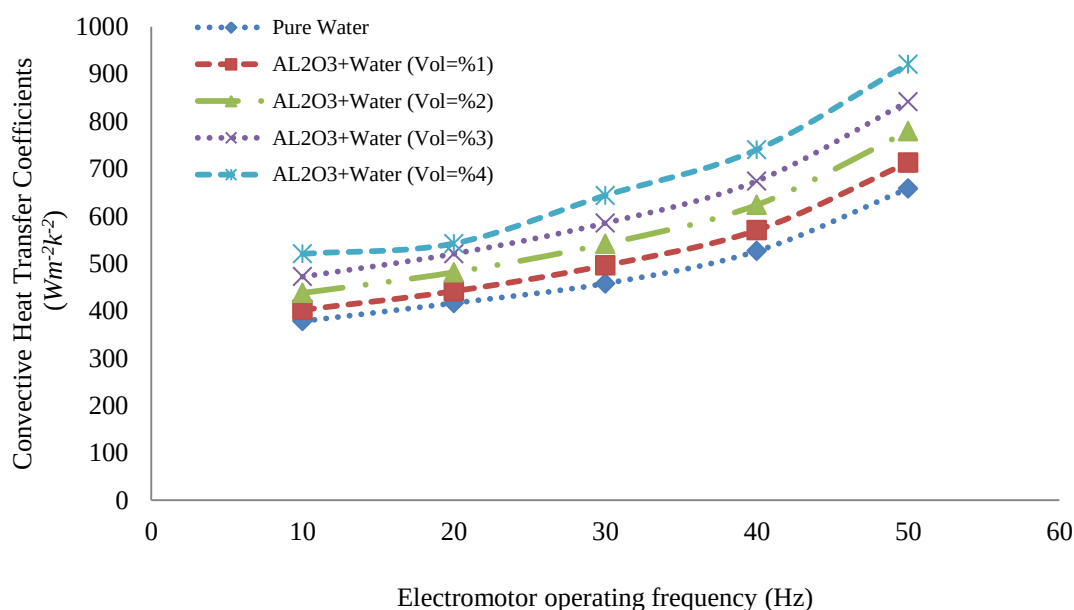
تاثیر کسر حجمی نانو ذرات بر نرخ انتقال حرارت

افزایش انتقال حرارت در رادیاتور با استفاده از نانوذرات Al_2O_3 به قطر ۲۰ nm در سیال پایه آب با درصد های حجمی ۱، ۲، ۳ و ۴



شکل ۱۴- تاثیر درصد حجمی نانو ذرات بر نرخ انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

Fig.14. The effect of volume percentage of nanoparticles on heat transfer rate and heat transfer coefficient



شکل ۱۵- تاثیر افزایش سرعت الکتروموتور بر روی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در درصد حجمی‌های مختلف

Fig.15. The effect of increasing the motor speed on the displacement heat transfer coefficient in different volume percentages

نتیجه‌گیری

۹/۱٪ ضریب هدایت حرارتی و همچنین کاهش ۸/۸٪ گرمای ویژه شد. حداکثر اختلاف دمای بین سنسور ورودی و خروجی رادیاتور زمانی که ترموستات باز است و سیال خنک‌کننده از داخل رادیاتور جریان دارد ۱۲ الی ۱۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. با افزایش

نتایج نشان داد در نانو سیال با ۴٪ کسر حجمی نسبت به ۱٪ کسر حجمی افزایش ۸/۷٪ چگالی، ۷/۷٪ ویسکوزیته دینامیکی و

افزایش ۲۸ درصدی در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. همچنین با افزایش دور الکتروموتور از ۲۰ Hz به ۴۰ Hz ضریب انتقال حرارت آب خالص به‌طور متوسط ۲۶٪ و نانو سیال ۲۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. وجود نانوسیال در سیستم خنک‌کننده موتور باعث افزایش انتقال حرارت از رادیاتور شده و با وجود این خصوصیت، اندازه و وزن رادیاتور می‌تواند کاهش یابد بدون این‌که بر عملکرد انتقال حرارت آن تأثیر بگذارد.

سرعت الکتروموتور از ۴۰ Hz به ۵۰ Hz دمای سیال خنک‌کننده آب در قسمت خروجی به مقدار ۴/۷ درجه سانتی‌گراد خنک‌تر شده و دمای هوای در قسمت خروجی ۷/۳ درجه سانتی‌گراد گرم‌تر می‌شود. با افزایش سرعت الکتروموتور نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد در حداکثر مقدار سرعت جریان هوا و سیال خنک‌کننده با افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه می‌توان نرخ انتقال حرارت را به‌طور متوسط ۳۷ درصد نسبت به سیال پایه افزایش داد. در مقایسه با آب، نانوسیال حاوی ۴٪ حجمی از Al_2O_3 در دور حداکثر دارای

References

1. Bahiraei, M., S. M. Hosseinalipour, K. Zabihi and E. Taheran. 2012. Using neural network for determination of viscosity in water-TiO₂ nanofluid. *Advances in Mechanical Engineering* 4: 1-10. <https://doi.org/10.1155/2012/742680>.
2. Bozorg Bigdeli, M., M. Fasano, A. Cardellini, E. Chiavazzo, and P. Asinari. 2016. A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 1615-1633. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.027>.
3. Chiou, J. P. 1980. The effect of the flow nonuniformity on the sizing of the engine radiator. SAE paper no.800035, Society of Automotive Engineers 91: 250-260. DOI: <https://doi.org/10.4271/800035>.
4. Choi, S. U. S. 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *International Mechanical Engineering Congress & Exposition (ASME)* 66: 99-105.
5. Das, S. K., N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel. 2003. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of Heat Transfer* 125 (4): 567-574. <https://doi.org/10.1115/1.1571080>.
6. Das, S., S. Choi, and H. Patel. 2006. Heat transfer in nanofluids – a review. *Heat Transfer Engineering* 27 (10): 3-19. <https://doi.org/10.1080/01457630600904593>.
7. Einstein, A. 1906. Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. *Annalen der Physik* 324 (2): 289-306. <https://doi.org/10.1002/andp.19063240204>.
8. Fan, X., H. Chen, Y. Ding, P. K. Plucinski, and A. A. Lapkin. 2008. Potential of 'nanofluids' to further intensify microreactors. *Green Chemistry* 10 (6): 670-677.
9. Ghadimi, A., and I. H. Metselaar. 2013. The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science* 51: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.06.001>.
10. Gifford, N. L., A. G. Hunt, E. Savory, and R. J. Martinuzzi. 2006. Experimental study of low-pressure automotive cooling fan Aerodynamics under blocked Conditions. *Canadian Society for Mechanical Engineering* 1: 1-8.
11. Heydarbeigi, G. 2017. Investigation of the effect of using copper nanofluid, silver nanofluid and aluminum oxide on the heat transfer rate of Ferguson 285 copper tractor engine radiator. *First International Conference on Applied Research in Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment*. <https://civilica.com/doc/673996>.
12. Heyhat, M. M., F. Kowsary, A. M. Rashidi., S. Alem Varzane Esfehiani, and A. Amrollahi. 2012. Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime. *International Communication in Heat and Mass Transfer* 39 (8): 1272-1278. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.06.024>.
13. Hussein, A. M., R. A. Bakar, and K. Kadirgama. 2014. Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. *Case Studies Thermal Engineering* 2: 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2013.12.001>.
14. Holman, J. P. 1989. *Heat Transfer*. McGraw-Hill Book Co., New York.
15. Kong, L., J. Sun, and Y. Bao. 2017. Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids. *Royal Society of Chemistry Advances* 7: 12599-12609. <https://doi.org/10.1039/C6RA28243A>.
16. Kouloulas, K., A. Sergis, and Y. Hardalupas. 2016. Sedimentation in nanofluids during a natural convection experiment. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 101: 1193-1203. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.113>.
17. Leong, K. Y., R. Saidur, S. N. Kazi, and A. H. Mamun. 2010. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). *Applied Thermal Engineering* 30: 2685-2692. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.019>.

18. Masuda, H., A. Ebata, and K. Teramae. 1993. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles. *Netsu Bussei* 7: 227-233.
19. Maxwell, J. C. 1891. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, Oxford, UK.
20. Maxwell Garnett, J. 1904. Colours in metal glasses and in metallic films. *Philosophical Transactions the Royal Society* 203: 385-420. <https://doi.org/10.1098/rsta.1904.0024>.
21. Morris, S. C., J. J. Goad, and J. F. Fess. 1998. Velocity measurements in the wake of an automotive cooling fan. *Experimental Thermal and Fluid Science* 7: 100-106. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(97\)10054-1](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(97)10054-1).
22. Nguyen, C., F. Desgranges, G. Roy, N. Galanis, T. Mare, S. Boucher, and H. A. Mintsu. 2008. Viscosity data for Al_2O_3 -water nanofluid-hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?. *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2): 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.01.033>.
23. Nisar, K. S., D. Khan, A. Khan, W. A. Khan, I. Khan, and A. M. Aldawsari. 2019. Entropy Generation and Heat Transfer in Drilling Nanoliquids with Clay Nanoparticles. *Entropy* 21 (12): 1226. <https://doi.org/10.3390/e21121226>.
24. Oliet, C., A. Oliva, J. Castro, and C. D. Pe' rez-Segarra. 2007. Parametric studies on automotive radiators. *Applied Thermal Engineering* 27: 2033-2043. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.006>.
25. Pak, B. C., and Y. I. Cho. 1998. Hydraulic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer* 11 (2): 151-170. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>.
26. Pandey, S. D., and V. K. Nema. 2012. Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science* 38: 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.12.013>.
27. Pecora, R. 1985. *Dynamic Light Scattering. Applications of Photon Correlation Spectroscopy*. Springer.
28. Peyghambarzadeh, S. M., S. H. Hashemabadi, M. Seiji Jamnani, and S. M. Hoseini. 2011 a. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al_2O_3 /water nanofluid. *Applied Thermal Engineering* 31 (10): 1833-1838. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.02.029>.
29. Peyghambarzadeh, S. M., S. H. Hashemabadi, S. M. Hoseini, and M. Seiji Jamnani. 2011 b. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (9): 1283-1290. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001>.
30. Raja, M., R. Vijayan, P. Dineshkumar, and M. Venkatesan. 2016. Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64: 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.079>.
31. Sabralilou, B., A. Mohebbi, E. Akbarian, and A. Rezvanivand fanaei. 2020. Aero-acoustical study of axial fan using computational fluid dynamics. *Journal of Agricultural Machinery* 10 (2): 255-264. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.v10i2.74963](https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.74963).
32. Turgut, A., I. Tavman, M. Chirtoc, H. P. Schuchmann, C. Sauter, and S. Tavman. 2009. Thermal conductivity and viscosity measurements of waterbased TiO_2 nanofluids. *International Journal of Thermophysics* 30 (4): 1213-1226.
33. Xiang-Qi, W., and A. Mujumdar, S. 2008. A review on nanofluids- Part I: theoretical and numerical investigations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 25 (4): 613-630. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000400001>.
34. Wang, X., X. Xu, S. U. S. Choi. 1999. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13: 474-480. <https://doi.org/10.2514/2.6486>.
35. Wen, D., G. Lin, and S. Vafaei. 2009. Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology* 7: 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.01.007>.
36. White, F. M. 2002. *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill; 5th ed.
37. Williams, W. C., J. Buongiorno, and W. L. Hu. 2008. Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes. *Journal of Heat Transfer* 130 (4): 042412. <https://doi.org/10.1115/1.2818775>.
38. Wong, K. V., and O. D. Leon. 2010. Applications of nanofluids. Current and future. *Advances in Mechanical Engineering* Article ID 519659: 1-11. <https://doi.org/10.1155/2010/519659>.
39. Yiamsawas, T., A. S. Dalkilic, O. Mahian, and A. Wongwises. 2013. Measurement and correlation of the viscosity of waterbased Al_2O_3 and TiO_2 nanofluids in high temperatures and comparisons with literature reports. *Journal of Dispersion Science and Technology* 34 (12): 1697-1703. <https://doi.org/10.1080/01932691.2013.764483>.



Experimental and Numerical Study of the Moisture Loss Rate in Conditioned Alfalfa Stem using Computational Fluid Dynamics

M. Dana¹, P. Ahmadi Moghaddam^{2*}

1- MSc student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: p.ahmadi@urmia.ac.ir)

DOI: [10.22067/jam.2021.67096.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.67096.0)

Received: 08-11-2020

Revised: 04-02-2021

Accepted: 06-02-2021

Available Online: 06-02-2021

How to cite this article:

Dana, M., and P. Ahmadi Moghaddam. 2022. Experimental and Numerical Study of the Moisture Loss Rate in Conditioned Alfalfa Stem using Computational Fluid Dynamic. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 301-317. (In Persian).
DOI: [10.22067/jam.2021.67096.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.67096.0)

Introduction

Today, the development of the livestock industry and feed supply is a vital issue due to the growing world population, the importance of animal protein supply, and the growing requirement for livestock products.

A porous medium refers to a solid-void (pore) space that is occupied by a fluid (gas or liquid). Generally, many of these pores are interconnected which makes the transportation of mass and heat possible through the pores and this contributes to a faster transportation process through the solid matrix. Porosity is the fraction of void space to total volume.

While the pores are large enough, water vapor and air in the porous media can be transported by molecular diffusion. Molecular diffusion of a gas species (e.g., vapor) in a gas mixture (e.g., vapor and air) is described by Fick's law.

Materials and Methods

In this study, the samples were classified into four categories, including control, 3-impacts (low conditioning), 8-impacts (average conditioning), and 13-impacts (high conditioning). Each category included six samples (50-grams) that were used to measure different characteristics at different stages. All samples were weighed every two hours using a digital scale (0.001 gr precision). The leaf-stem separation force then was extracted using a texture analyzer. All experiments were repeated three times, and finally, the mean of these three repetitions was reported as the final value for the intended parameter.

The geometry of the alfalfa stem was drawn in Gambit software and after meshing and applying boundary conditions; it was transferred to ANSYS Fluent software. Then, while the solver was selected, adjusted under relaxation factors were applied. In the following, mesh independency was checked and the results were reported.

Results and Discussion

To ensure numerical accuracy, the experimental data should be validated with the simulation results. For this purpose, experimental moisture losses were compared to the software results and showed a good agreement. Then, the moisture ratio curves (kinetics of drying) and force-time chart were presented.

The impact of the moisture content of the tissue was evaluated on the value of force per time. Therefore, three samples of alfalfa with different relative humidity in terms of leaf-stem separation force were reported.

The results of the numerical simulations were presented as two main contours: the velocity magnitude and moisture (water vapor) mass fraction. The simulation results were provided for all different modes and compared to the experimental data. Finally, errors between both results were presented in a table.

Conclusion

Regarding the quality and losses of the final product and comparisons between four different modes (control, 3 impacts, 8 impacts, and 13 impacts), the mode with 8 impacts was selected as the best mode.

The Force-time chart illustrated two peaks due to the special multi-layer texture of the alfalfa. Regarding reducing the moisture ratio of the alfalfa as compared to the optimal, the force required to separate the leaves from the alfalfa stem was significantly decreased. Also, a significant increase in the losses was observed for impacts modes higher than 8.

Keywords: Alfalfa, Conditioning, Drying, Leaf separation force

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۰۱-۳۱۷

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی سینتیک خشک شدن یونجه ساقه‌کوبی شده به روش دینامیک

سیالات محاسباتی

مریم دانا^۱، پرویز احمدی مقدم^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

چکیده

در این پژوهش تأثیر شدت ساقه‌کوبی بر فرآیند خشک شدن یونجه و همچنین ماکزیمم نیروی مورد نیاز برای جدا کردن برگ از ساقه مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی صورت گرفت. متغیرهای مستقل، شدت ساقه‌کوبی در ۳ شدت (کم، متوسط و شدید)، زمان در ۷ سطح برای آزمایش اول و ۴ سطح برای آزمایش دوم و همچنین متغیرهای وابسته دو آزمایش به ترتیب نسبت رطوبت محصول و ماکزیمم مقدار نیروی مورد نیاز جدا کردن برگ از ساقه بودند. از دستگاه بافت‌سنج با سرعت پروب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه برای اندازه‌گیری نیروی جدایش برگ از ساقه در رطوبت‌های مختلف استفاده گردید. همچنین برای شبیه‌سازی نرخ از دست‌دادن رطوبت ساقه از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در تخمین زمان خشک شدن یونجه، همبستگی بالایی (اختلاف زیر ۱۰٪) را با نتایج داده‌های تجربی نشان داد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که با کاهش رطوبت محصول و افزایش شدت ساقه‌کوبی، میزان نیروی جدایش برگ از ساقه به طور معنی‌داری (۰/۹۹) کاهش یافت. در پایان نتایج، با در نظر گرفتن کیفیت محصول نهایی و تلفات کم‌تر برگ و همچنین در نظر گرفتن زمان مناسب خشک شدن علوفه، ساقه‌کوبی با شدت متوسط (۸ ضربه) به عنوان بهترین حالت انتخاب گردید.

واژه‌های کلیدی: خشک شدن، عملیات ساقه‌کوبی، نیروی جدایش برگ، یونجه

مقدمه

نقل این محصول مشاهده شده است. یکی از مراحل مهم در زراعت یونجه، برداشت آن بوده و تلفات در این مرحله یکی از دغدغه‌های عمده کشاورزان است (Wu, 2004).

تفاوت‌های هندسی و ساختاری بین ساقه و برگ در گیاهان زراعی وجود دارد، (برگ با نرخ بیش‌تری نسبت به ساقه خشک می‌شود). بنابراین، برای افزایش نرخ خشک شدن ساقه و هم‌زمانی خشک شدن آن با برگ، می‌توان از روش‌های مختلف مکانیکی که با جابجا کردن، خراش، له کردن یا شکستن ساقه راهی برای خروج رطوبت فراهم می‌کنند، استفاده کرد. به واسطه حساسیت موجود در مورد خشک شدن یکنواخت برگ و ساقه، بایستی حداقل امکان سطح رطوبت برگ و ساقه مقدار نسبتاً یکسانی داشته باشند. دلیل این الزام این است که در صورت صرف زمان برای رسیدن رطوبت ساقه به مقدار مناسب بسته‌بندی (حدود ۱۲ الی ۱۴ درصد) به واسطه خشک شدن بیش از حد برگ، افزایش شدید ریزش برگ رخ خواهد داد (Siles et al., 2015). برعکس، اگر ساقه رطوبت بالایی داشته باشد و رطوبت برگ برای بسته‌بندی ملاک قرار گیرد، به واسطه رطوبت بالای ساقه، احتمال فساد محصول بسته‌بندی شده بالا خواهد بود

یونجه با نام علمی *Medicago sativa* با توجه به وجود تنوع اقلیمی در مناطق مختلف آب و هوایی کشت می‌شود. یونجه با دارا بودن عملکرد خوب در واحد سطح و خوش‌خوراکی مطلوب به عنوان ماده اصلی تأمین‌کننده پروتئین، مواد معدنی، ویتامین A و عوامل رشد، جایگاهی ویژه در تغذیه دام و صنعت دامپروری دارد. با در نظر گرفتن روند رو به افزایش جمعیت جهان و اهمیت تأمین پروتئین حیوانی و نیاز روزافزون به فرآورده‌های دامی، توسعه صنعت دامپروری از اهمیت زیادی برخوردار بوده و در این رابطه تأمین خوراک دام یک مسئله حیاتی است (Aboltins and Kic, 2018). بعد از سال ۱۹۷۰، افزایش قابل ملاحظه‌ای در فرآوری یونجه برای تولید محصولات ماند پلت‌ها و بسته‌بندی‌های مکعبی شکل به خاطر راحتی حمل و

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(Email: p.ahmadi@urmia.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.2021.67096.0

همکاران (Patil et al., 1993) یونجه تازه بریده شده (۶۵ تا ۸۰ درصد نسبت رطوبتی) را به دو صورت مکانیکی و شیمیایی تیمار داده و سپس در یک خشک‌کن خشک کردند. ساقه‌های خرد شده بین سطوح نرم و صاف و یا بین دو غلتک شیاردار طولی سه برابر سریع‌تر از ساقه‌های فشرده خشک شدند. از نظر سطوح رطوبتی، برگ‌ها دو برابر سریع‌تر از ساقه‌های خرد شده و چهار برابر سریع‌تر از ساقه‌های خرد نشده خشک شدند. مدل‌سازی گذر هوای سرد از روی پلت‌های یونجه توسط فاسینا و سخن‌سنج (Fasina and Sokhansanj, 1995) انجام شده است. در مدل آن‌ها از معادلات جرم و حرارت توزیع شده برای توصیف دما و رطوبت پلت‌ها استفاده شد. همچنین کوپل کردن^۳ فرآیندهای انتقال جرم و حرارت انجام گردید. فرهنگ و همکاران (Farhang et al., 2010) یک آون میکروویو آزمایشگاهی را برای خشک کردن یونجه با اعمال توان مایکروویو در پنج سطح (۱۸۰، ۳۶۰، ۵۴۰، ۷۲۰ و ۹۰۰ وات) استفاده کردند. برازش^۴ داده‌های تجربی با سه مدل لوئیس^۵، هندرسون-پایس^۶ و وانگ-سینگ^۷ نشان‌دهنده این بود که منحنی‌های خشک شدن به‌وسیله مدل وانگ-سینگ، بهتر توصیف شدند. شبیه‌سازی سینماتیکی و مطالعه تجربی بر روی جریان هوای چرخشی برای خشک کردن یونجه توسط چه و همکاران (Che et al., 2015) انجام گردید؛ محققان یک مدل آیرودینامیکی برای یونجه براساس نتایج تجربی چرخش یونجه در جریان هوا ایجاد کردند. در این مطالعه، تاثیر سرعت جریان هوای خشک، سرعت اولیه و زاویه جریان هوا بررسی گردید. سیلس و همکاران (Siles et al., 2015) محتوای رطوبتی و دما را برای سینتیک خشک کردن یونجه به‌طور همزمان مدل‌سازی کردند. طبق نتایج به‌دست آمده، ۹۵٪ از نتایج تجربی مربوط به تغییر دما در داخل ساقه با زمان شبیه‌سازی شدند. یک مطالعه تجربی در مورد خشک کردن مایکروویو یونجه در دستگاه خشک‌کن مداوم^۸ انجام شده است. حفظ کاروتن در این فرآیند مهم‌ترین هدف پژوهش بود. شدت پایین تخریب کاروتن در فرآیند خشک کردن مایکروویو با این واقعیت تفسیر می‌شود که استفاده از خلاء امکان خشک کردن در دمای پایین‌تر را فراهم می‌کند و باعث کاهش اکسیداسیون آن می‌شود (Ivanov et al., 2018).

با پیشرفت کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در بخش‌های مرتبط کشاورزی با صنعت، پژوهش‌های متنوعی در این بخش انجام شده است. یک رویکرد مدل‌سازی عددی برای خشک کردن زیست‌توده ارائه شده بود. مدل CFD توسعه‌یافته با استفاده از مدل تحلیلی موجود که بر اساس تبخیر است، اعتبارسنجی شد. توافق

(Kung et al., 1987). لذا بایستی ترتیبی اتخاذ گردد که سطوح رطوبتی ساقه و برگ نزدیک به یکدیگر باشند.

با پیشرفت علوم محاسباتی، شبیه‌سازی و مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی همچون خشک شدن گیاهان بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. دلیل این عمل، مزیت‌های مختلف شبیه‌سازی از جمله کاهش هزینه‌ها، کنترل دقیق فرآیند و هم‌چنین زمان کم‌تر شبیه‌سازی نسبت به شرایط واقعی می‌باشد. طیف وسیعی از مواد غذایی و محصولات کشاورزی از جمله بافت‌های گیاهی، غلات ذخیره شده در انبارها و مواد غذایی بسته‌بندی شده در سردخانه را می‌توان به‌عنوان مواد متخلخل در نظر گرفت. یک ماده متخلخل^۱ به یک ساختار نسبتاً جامد اطلاق می‌شود که دارای مجاری و منافذی بوده که با سیال (گاز یا مایع) پر می‌گردد. به‌طور کلی، بسیاری از این منافذ به‌صورت داخلی به یکدیگر متصل هستند؛ به‌طوری که انتقال جرم از طریق منافذ امکان‌پذیر است و در واقع فرآیند انتقال سریع‌تر از طریق ساختار جامد انجام می‌پذیرد. در سیستم‌های غذایی، بخش عظیمی از فرآیندها می‌توانند به‌عنوان انتقال جرم و گرما از طریق محیط متخلخل مشاهده شوند (Datta, 2007a; Datta, 2007b). انتشار مولکولی گونه‌های گازی (به‌عنوان مثال بخار) در یک مخلوط گازی (به‌عنوان مثال، بخار و هوا) توسط قانون فیک (رابطه ۱) توصیف می‌شود:

$$n_g^{diff} = -D_g \frac{\partial c_g}{\partial s} \quad (1)$$

که g نشان‌دهنده گونه‌های گاز، n_g^{diff} شار جرمی گاز با توجه به انتشار، D_g قابلیت انتشار مولکولی گاز در محیط متخلخل، c_g غلظت گاز و s مسافت است. قابلیت انتشار مولکولی گاز در حالت توده‌ای به قابلیت انتشار مولکولی گاز داخل ماده متخلخل با استفاده از انحنای^۲ τ و تخلخل ϕ مربوط می‌گردد (رابطه ۲):

$$D_g = \frac{D}{\tau} \phi \quad (2)$$

که D قابلیت انتشار گاز در توده است. همچنین مخلوط بخار آب و هوا به‌عنوان گاز ایده‌آل فرض می‌گردد (Datta, 2007b).

از جمله اولین مطالعات انجام شده در مورد مدل خشک کردن یونجه در شرایط مزرعه‌ای می‌توان به کار انجام شده توسط روتز و چن (Rotz and Chen, 1985) اشاره کرد؛ در این مطالعه نرخ خشک شدن یونجه را بین نسبت رطوبت ۲۰ تا ۸۰ درصد (بر پایه تر) اندازه‌گیری کرده و از همبستگی خطی برای تعیین فاکتورهای محیطی نرخ خشک شدن استفاده کردند. در مطالعه‌ای دیگر پاتیل و

3- Coupling

4- Fitting

5- Lewis

6- Henderson - Pabis

7- Wang- Singh

8- Continuous dryer

1- Porous medium

2- Tortuosity

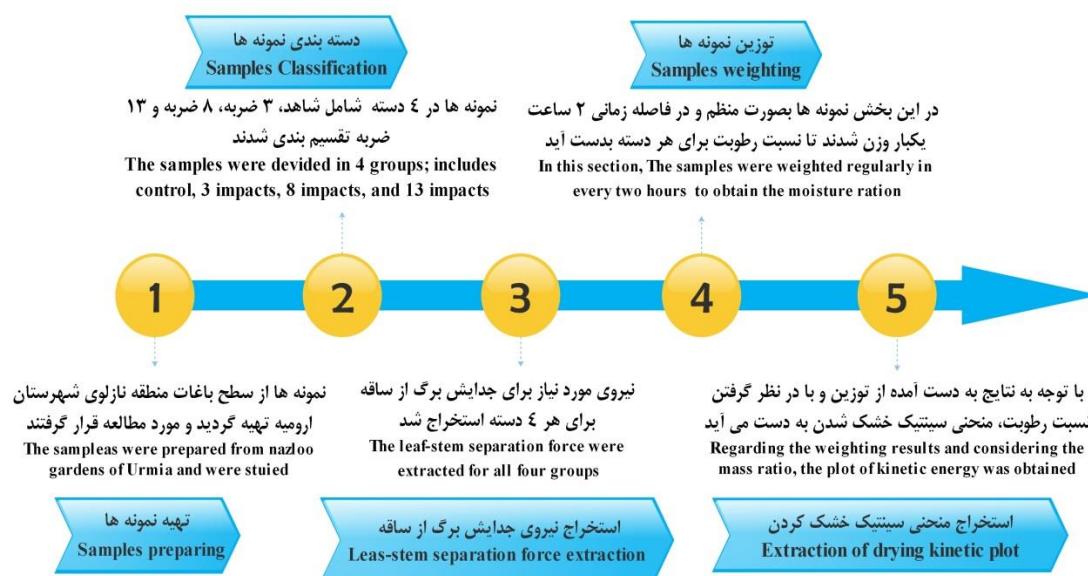
مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در دو بخش داده‌برداری تجربی و شبیه‌سازی عددی انجام گرفته است. روندنمای داده‌برداری تجربی در این تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است. در ابتدا، نمونه‌های یونجه از مزارع کشاورزی منطقه نازلوی شهرستان ارومیه در آذربایجان غربی تهیه گردیدند؛ سپس نمونه‌ها در ۴ تیمار مختلف شدت ساقه‌کوبی (شاهد، ساقه‌کوبی با شدت کم، متوسط و شدید) دسته‌بندی شدند و نیروی مورد نیاز برای جدایش برگ از ساقه در تیمارهای مختلف با دستگاه آنالیز بافت اندازه‌گیری شد. در مطالعات قبلی از دستگاه بافت‌سنج برای اندازه‌گیری کیفیت بافت میوه عنب تازه (Zhao et al., 2018) و همچنین برای اندازه‌گیری نیروی برشی گوشت پخته شده استفاده شده است (Hopkins et al., 2011). به‌منظور به دست‌آوردن نرخ از دست دادن رطوبت، نمونه‌ها وزن گردیدند و در نهایت منحنی سینتیک خشک کردن استخراج گردید. با توجه به حساسیت محتوای پروتئینی موجود در یونجه، خشک شدن نمونه‌ها به‌صورت طبیعی و بدون استفاده از حرارت انجام شد که برای شبیه‌سازی خشک شدن یونجه در شرایط مزرعه از این روش استفاده شده است.

شدت ساقه‌کوبی به‌صورت تعداد ضربات وارد به ساقه تعریف می‌گردد. در این تحقیق تأثیر شدت ساقه‌کوبی بر سینتیک خشک کردن یونجه و ماکزیمم نیروی مورد نیاز برای جدا کردن برگ از ساقه مورد مطالعه قرار گرفته است. از نظر آماری، آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل با طرح بلوک‌های کامل تصادفی طراحی گردید. متغیرهای مستقل آزمایش‌ها، شامل شدت ساقه‌کوبی یونجه و زمان می‌باشد. شدت ساقه‌کوبی در سه شدت، ساقه‌کوبی با شدت کم (ساقه در ۳ محل ضربه خورده)، ساقه‌کوبی با شدت متوسط (ساقه در ۸ محل ضربه خورده) و ساقه‌کوبی شدید (ساقه در ۱۳ محل ضربه خورده) و زمان نیز در فواصل زمانی ۲ ساعته (۱۵ نمونه‌برداری ۲ ساعته) تا خشک شدن کامل یونجه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تعداد ضربه در شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی با توجه به محدوده سرعت پیشروی تراکتور در منابع (۵ تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت) و با در نظر گرفتن سرعت غلتک‌ها، قطر آن‌ها و زوایای وارد شدن علوفه یونجه در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی اثر ساقه‌کوبی بر روی ساقه یونجه، از لاستیک‌های مشابه غلتک‌های ماشین ساقه‌کوبی برای ایجاد لهیدگی بر روی ساقه و به‌صورت دستی استفاده شد (شکل ۲). این شبیه‌ساز قابلیت تغییر غلتک‌های با تعداد تیغه مختلف را دارا می‌باشد. همچنین یک دیمر برای تغییر سرعت دورانی محور در نظر گرفته شده است.

قابل‌قبولی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده محتوای آب به‌دست آمد (Bartzanas et al., 2012). در مطالعه‌ای با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر قطر ذرات مواد غذایی بر روی پارامترهای عملکردی سیکلون جداکننده شامل افت فشار و سرعت مورد مطالعه قرار گرفت (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015). صبرعلیلو و همکاران (Sabralilou et al., 2019) مطالعه‌ای را بر روی پروانه‌ی ۶ پره موتور تراکتور ITM399 با استفاده از روش حجم محدود و مدل تعیین نویز جریان نویز پهن باند موجود در نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام دادند. طبق نتایج، بیشینه مقدار نویز در نوک پره‌ها گزارش شد که به علت وجود سرعت و فشار دینامیکی بالا در این ناحیه بود. همچنین یک مطالعه عددی به بررسی جداسازی گندم با استفاده از سیکلون استرماند بازده بالا انجام شد. در مطالعه آن‌ها در ۶ سرعت مختلف ورودی مواد (۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر بر ثانیه) و همچنین ۳ دبی جرمی مختلف (۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ متر بر ثانیه)، مشخصات داخل سیکلون از جمله بازده جداسازی و افت فشار به‌صورت کامل مورد بررسی قرار گرفت (Naimi et al., 2019). در مطالعه دیگری اثر تیغه انحرافی بر ویژگی‌های جریان در محفظه جداسازی نخود به‌صورت عددی و تجربی مطالعه گردید. در این پژوهش از مدل k-ε استاندارد برای شبیه‌سازی جریان آشفته و از حلگر بر مبنای فشار برای حلگر جریان بهره گرفته شد. همچنین نتیجه نشان داد که مدل آشفته مورد نظر از توانایی بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در جداکننده‌های ثقلی برخوردار است (Zobeiri et al., 2019). در بخش فرآوری چغندر قند در یک کارخانه تولید شکر، شبیه‌سازی ترموکمپرسور بخار به‌منظور کاهش مصرف انرژی در بخش کریستالیزاسیون مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه بخار مرده به‌وسیله یک ترموکمپرسور احیا شده و برای مصرف دوباره مورد مصرف قرار گرفت (Rezvanivandefanayi et al., 2019).

با توجه به بررسی منابع و در نظر گرفتن حساسیت مواد پروتئینی موجود در یونجه به حرارت، تاکنون مطالعه جامعی در جهت بررسی شدت ساقه‌کوبی یونجه در شرایط بدون استفاده از خشک‌کن صنعتی انجام نشده است. همچنین، مطالعه عددی در قالب شبیه‌سازی فرآیند انتقال جرم به هنگام خشک شدن یونجه صورت نگرفته است. هدف از این تحقیق توسعه یک مدل عددی به‌منظور دستیابی به یک روش دقیق و سریع برای بررسی فرآیند خشک کردن یونجه و نیز بررسی کیفیت آن با استفاده از داده‌های تجربی می‌باشد. همچنین نمودار سینتیک خشک کردن در شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی استخراج شده است. سپس با ارزیابی نمودن زمان مناسب برای رسیدن به مقدار رطوبت بهینه جهت بسته‌بندی یونجه و بررسی تلفات در شدت‌های مختلف، بهترین حالت برای ساقه‌کوبی پیشنهاد گردیده است.



شکل ۱- روندنمای انجام کارهای تجربی
Fig. 1. Diagrams of experimental works



شکل ۲- شبیه ساز ساقه کوب مورد استفاده

Fig.2. Used simulator for conditioning

که در آن D_p وزن ماده خشک، W_w وزن نمونه تر قبل از قرار دادن در کوره و W_d وزن نمونه خشک بعد از خارج کردن از کوره می باشد. تمامی نمونه ها به ازای هر دو ساعت با استفاده از ترازوی دیجیتال AND مدل DJ-V320A با دقت ۰/۰۰۱ گرم، وزن شده و سپس با به دست آمدن مقدار رطوبت محصول، برای استخراج ماکزیمم نیروی جدایش برگ از ساقه توسط دستگاه بافت سنج^۱ مدل TA XT plus استفاده شد. برای داده برداری ها، از گیره های کششی متصل به پروب و از یک نیروسنج ۵ کیلوگرمی استفاده شد که در آن

هر تیمار شامل ۶ نمونه ۵۰ گرمی بودند که برای اندازه گیری ویژگی های محصول در مراحل مختلف مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳-الف). متغیرهای وابسته آزمایش ها شامل رطوبت محصول و نیروی جدایش برگ از ساقه می باشند. به منظور به دست آوردن مقدار ماده خشک محصول، دو نمونه از محصول طبق استاندارد، در کوره تحت دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و مدت زمان ۲۴ ساعت طبق استاندارد ASAE S355.2 خشک شدند.

در ادامه، محصول خشک شده وزن گردید و مقدار ماده خشک آن طبق رابطه (۳) حاصل شد (Wiersma et al., 1993):

$$D_p = W_w - W_d \quad (3)$$

1- Texture Analyzer

برای ساقه یونجه در سه سطح ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد (Nazari et al., 2009). در مطالعه‌ای دیگر از یک دستگاه بافت‌سنج برای به‌دست آوردن مقاومت نهایی، چقرمگی و همچنین مدول یانگ پوست انگور سفید بی‌دانه استفاده کردند (Hassanpour et al., 2011).

دقت اندازه‌گیری نیرو و جابه‌جایی به‌ترتیب برابر ± 0.001 گرم و ± 0.001 میلی‌متر می‌باشد (شکل ۴). سرعت پروپ دستگاه بافت‌سنج بر روی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. در مطالعه‌ای، نویسندگان تاثیر محتوای رطوبتی و نرخ بارگذاری بر روی مقاومت کششی یونجه را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، نرخ بارگذاری پروپ کششی



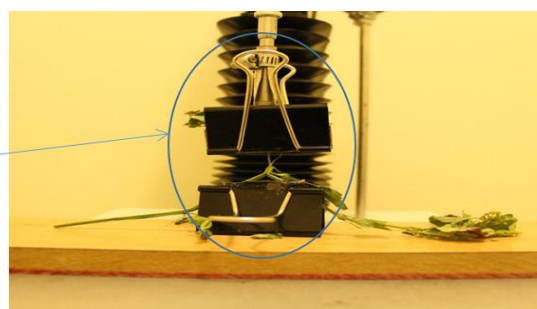
(الف)
(a)



(ب)
(b)

شکل ۳- (الف): دسته‌بندی‌های مختلف برای محصول یونجه، (ب) نمایی از یک ساقه کوبیده شده

Fig.3. Alfalfa crop (a) various classifications, (b) a view of a conditioned stem



شکل ۴- دستگاه بافت‌سنج TA XT plus

Fig.4. TA XT plus texture Analyzer

نتایج استخراج شده در نرم‌افزار SPSS 23 Statistics 23 از نظر آماری مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت. همچنین برای مطالعه معنی‌داری از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده گردید.

شبیه‌سازی عددی

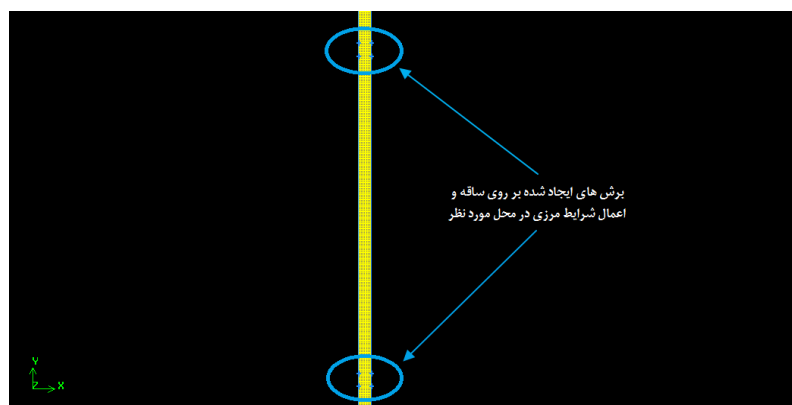
در پژوهش حاضر، هندسه ساقه یونجه در نرم‌افزار گمبیت ۲،۴،۶ رسم گردید و پس از شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی به نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۵ منتقل گردید. سپس نوع حلگر به‌صورت حلگر بر مبنای فشار انتخاب شد و پس از تنظیم موارد مربوط به حل از جمله تعیین باقی‌مانده و اعمال فاکتورهای زیرتخفیف، شبکه از نظر استقلال شبکه بررسی شد و نتایج مربوطه استخراج گردید.

برای به‌دست آوردن نسبت رطوبت از رابطه (۴) استفاده شد (Doymaz, 2007):

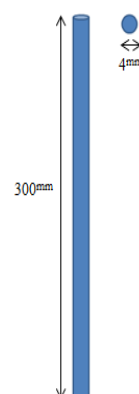
$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4)$$

که در آن، MR نسبت رطوبت، M_t میزان رطوبت در هر لحظه M_e ، (kg_{water}/kg_{ms}) رطوبت تعادلی (kg_{water}/kg_{ms}) و M_0 محتوای رطوبت اولیه (kg_{water}/kg_{ms}) می‌باشد. لازم به ذکر است که m_s اندیس واحد محتوای رطوبت جرم ماده جامد می‌باشد. با توجه به این که مقدار M_e در مقایسه با مقادیر M_t و M_0 مقدار کوچکی است، لذا می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و رابطه (۴) به‌صورت رابطه (۵) تغییر می‌کند (Doymaz, 2007):

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (5)$$



شکل ۶- شبکه بندی ساقه یونجه
Fig.6. Meshing of alfalfa stem



شکل ۵- هندسه ساقه یونجه
Fig.5. Geometry of alfalfa stem

توجه به شرایط مسئله از شرط مرزی ورودی^۳، شرط مرزی خروجی^۴ و شرط مرزی دیواره^۵ در حالت استاندارد استفاده شده است (جدول ۲).

جدول ۱- مقادیر مربوط به کیفیت شبکه

Table 1- Mesh quality parameters	
پارامتر کیفیت	مقدار
Quality parameter	Value
Maximum aspect ratio	9.94
Minimum Orthogonal Quality	0.86
Maximum Orthogonal Skewness	0.21

برای مدل جریان، معادلات پیوستگی و مومنتوم در سه راستا برای سرعت های سطحی هوا و توزیع سرعت حل گردید. اساس حل و استخراج میدان در نرم افزارهای مختلف عددی، بر پایه معادلات بقا می باشد که معادله پیوستگی (قانون بقای جرم)، معادله مومنتوم و معادله انرژی به ترتیب به صورت رابطه های (۶) تا (۸) ارائه شده اند (Anderson, 2009):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[-p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (7)$$

رسم هندسه کلی در نرم افزار گمبیت و شبکه بندی

برای رسم هندسه یونجه، چند نمونه تصادفی از ساقه های یونجه انتخاب و پس از اندازه گیری مؤلفه های مربوط به وجوه مختلف، میانگینی از ابعاد به عنوان اندازه مورد استفاده در مدل هندسی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این که می توان ساقه یونجه را با تقریب خوبی به صورت متقارن محوری^۱ در نظر گرفت، برای کاهش زمان پردازش در انجام تحلیل ها از مدل دو بعدی استفاده گردید. شماتیکی از هندسه به همراه شبکه بندی آن در قالب شکل های ۵ و ۶ ارائه شده است.

شبکه بندی

بعد از رسم هندسه، بایستی مدل هندسی شبکه بندی گردد تا تمامی معادلات برای شبکه ها حل گردیده و سپس جواب نهایی استخراج گردد. از این رو با توجه به نوع هندسه، انتخاب نوع شبکه مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به ویژگی های هندسی مسئله و قابلیت های شبکه های مختلف، از شبکه چهارضلعی^۲ استفاده شد تا جواب مدل دقت بالایی داشته باشد. لازم به ذکر است که برای شبکه بندی مورد نظر، با توجه به ساختار با سازمان، مقادیر مربوط به کیفیت شبکه در جدول ۱ ارائه شده است.

تعریف شرایط مرزی

بعد از رسم هندسه و شبکه بندی، ارائه شرایط مرزی برای مسئله ضروری بوده و تعریف نوع صحیح آن حائز اهمیت بالایی است. با

- 3- Inlet boundary condition
- 4- Outlet boundary condition
- 5- Wall boundary condition

- 1- Axisymmetric
- 2- Quad

جدول ۲- شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها

Table 2- Applied boundary condition in simulations

شرط مرزی مورد استفاده	توصیف شرط مرزی
Used boundary condition	Boundary condition description
شرط مرزی ورودی	برای اعمال شرایط مرزی سرعت
Inlet boundary condition	For applying velocity boundary condition
شرط مرزی خروجی	شرط مرزی فشار خروجی در محل ضربات
Outlet boundary condition	Pressure outlet boundary condition in impacts
شرط مرزی دیواره	دیواره استاندارد برای اثرات دیواره
Wall boundary condition	Standard wall for wall effects

ارائه شده است (شکل ۸). با مقایسه این نمودارها می‌توان دریافت که بافت گیاه در مواجهه با شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی چه پاسخی را از خود نشان می‌دهد. در این نمودار نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک شدن در ۴ تیمار مختلف شاهد، ۳ ضربه، ۸ ضربه و ۱۳ ضربه ارائه شده است. شکل ۸ نمودار تغییرات نسبت رطوبت را پس از گذشت ۳۰ ساعت و رسیدن رطوبت نمونه‌ها به حدود ۱۰ درصد نشان می‌دهد. در ابتدای فرآیند خشک شدن اختلاف بین تیمارهای مختلف کم است، ولی بعد از گذشت حدود ۵ ساعت از ابتدای شروع این فرآیند، اختلاف بین تیمارهای مختلف و علی‌الخصوص بین تیمار شاهد و تیمار ۱۳ ضربه با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.

همانطور که انتظار می‌رود یونجه با ساقه‌کوبی شدید، سطح رطوبتی پایین‌تری نسبت به سایر تیمارها دارد. با توجه به شکل ۸، برای رسیدن یونجه به رطوبت حدود ۱۵ درصد در ساقه‌کوبی‌های با شدت کم، متوسط و شدید، به‌ترتیب حدود ۱۴/۵، ۱۳ و ۱۲ ساعت زمان نیاز است که این مقدار برای نمونه شاهد در حدود ۱۸ ساعت است، لذا ساقه‌کوبی بسته به شدت آن (کم، متوسط و شدید) می‌تواند زمان رسیدن به رطوبت ایده‌آل جهت بسته‌بندی را به‌ترتیب ۱۹/۴، ۲۷/۷ و ۳۳/۳ درصد برای شدت کم، متوسط و شدید کاهش دهد.

در نتایج تحقیقات روتز و چن (Rotz and Chen, 1985) به‌دست آمده است که کوبش‌های ایجاد شده بر روی ساقه گیاه یونجه در حین ساقه‌کوبی، نرخ استفاده از محلول‌های شیمیایی و همچنین محتوای رطوبتی اثر مستقیمی بر زمان خشک شدن یونجه دارد.

در جدول ۳ و ۴ نتایج مربوط به تجزیه واریانس منابع تغییر به‌ترتیب در آزمایش‌های اول و دوم ارائه شده است. در آزمایش اول شدت ساقه‌کوبی در ۳ سطح، زمان در ۷ سطح به‌عنوان متغیرهای مستقل و نسبت رطوبت گیاه یونجه بعد از خروج رطوبت از آن به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که آزمایش در ۳ تکرار انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که هر دو تیمار شدت ساقه‌کوبی و زمان اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹٪ بر روی زمان خشک شدن یونجه دارد.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E + u_i p) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \tau_{ij})$$

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

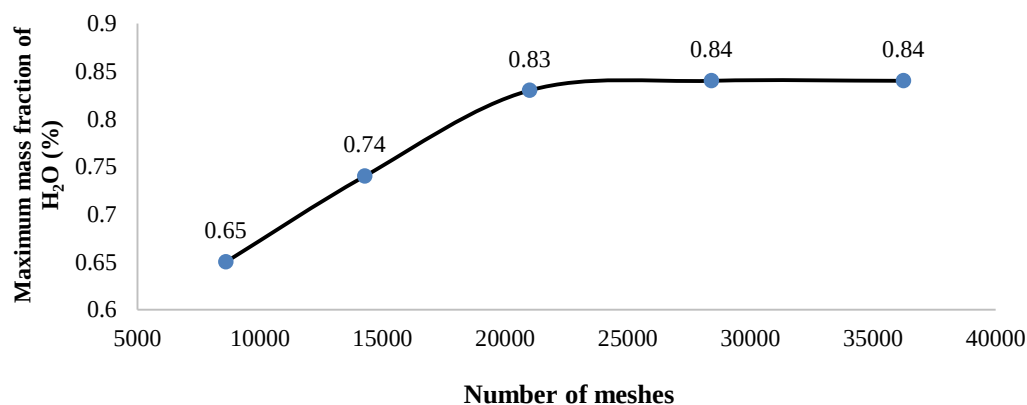
که در آن، ρ چگالی (kg m^{-3})، t زمان (s)، u_i و u_j به‌ترتیب اجزای سرعت سطحی (m.s^{-1})، P فشار (Pa)، g_i شتاب جاذبه (m.s^{-2})، μ ویسکوزیته (Pa.s)، τ تانسور تنش (Pa)، E انرژی کل (J)، k انرژی جنبشی آشفته ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$)، T دما (K) و $i, j = 1, 2, 3$ (x, y, و z) هستند. از حگر بر پایه فشار استفاده شده و مسئله به‌صورت پایا حل شد. خواص مربوط به یونجه با در نظر گرفتن ساختار متخلخل آن از کتابخانه نرم‌افزار انسیس فلوئنت فراخوانی شد. ضرایب زیر تخفیف به‌جز برای چگالی، مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شد. از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم پیشرو بهره برده شد. همچنین کوپلینگ سرعت و فشار با استفاده از اسکیم SIMPLE^۱ انجام پذیرفت.

آزمون استقلال از شبکه

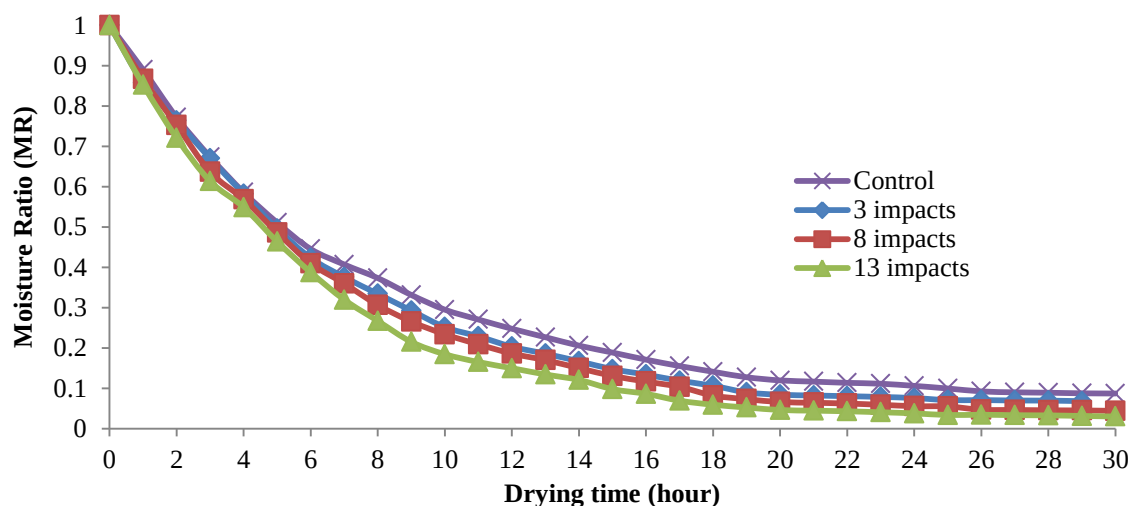
برای این که حل شبکه محاسباتی از تعداد شبکه مستقل باشد، آزمونی تحت عنوان آزمون استقلال از شبکه انجام گرفت. در این پژوهش از ۵ سطح شبکه شامل ۸۶۱۰ (سطح یک)، ۱۴۲۷۴ (سطح دو)، ۲۱۰۱۰ (سطح سه)، ۲۸۴۱۴ (سطح چهار) و ۳۶۲۴۶ (سطح پنج) عدد شبکه برای سطوح شبکه‌بندی‌ها بهره برده شد. مشخص شد که بعد از شبکه سطح سوم عدد شبکه (۲۱۰۱۰) تغییر محسوسی در جواب ایجاد نمی‌شود (شکل ۷). بنابراین از این سطح شبکه برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

در این بخش نمودار سینتیک خشک شدن نمونه‌های مختلف



شکل ۷- آزمون استقلال از شبکه
Fig. 7. Mesh independency test



شکل ۸- سینتیک خشک شدن تیمارهای مختلف یونجه
Fig. 8. Drying kinetics of various treatments of alfalfa

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شدت ساقه کوبی و زمان بر روی نسبت رطوبت

Table 3- Results of variance analyses (mean square) of Conditioning intensity and time on the moisture ratio

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	احتمال
Source of variations	Degree of freedom	Mean square	F-Value	Probability
شدت ساقه کوبی	2	85.597	3326.344**	<0.0001
Conditioning intensity				
زمان	6	8248.189	320529.436**	<0.0001
Time				
شدت ساقه کوبی × زمان	12	2.695	104.735**	<0.0001
Conditioning intensity × Time				
خطا	40	0.026		
Error				
کل	62			
Total				

** اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک درصد
** Significant difference in 1% probability level

ساقه‌کوبی و زمان بر روی بیشینه نیروی جدایش برگ از ساقه نیز در سطح آماری یک درصد، معنی‌دار به‌دست آمده است.

هم‌چنین در آزمایش دوم، شدت ساقه‌کوبی و زمان به‌عنوان متغیرهای مستقل و بیشینه نیروی جدایش برگ از ساقه به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. طبق نتایج به‌دست آمده شدت

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شدت ساقه‌کوبی، زمان بر روی نیروی جدایش برگ از ساقه
Table 4- Results of variance analyses (mean square) of Conditioning intensity, and time on the leaf-stem separation force

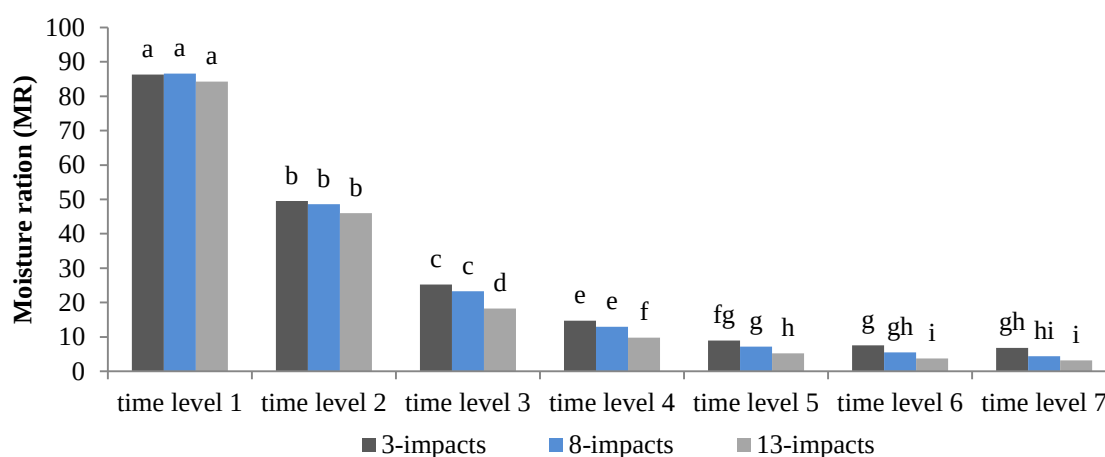
منبع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	مقدار F F-Value	احتمال Probability
شدت ساقه‌کوبی Conditioning intensity	2	0.589	702.659**	<0.0001
زمان Time	3	0.530	631.884**	<0.0001
شدت ساقه‌کوبی×زمان Conditioning intensity× Time	6	0.021	25.099**	<0.0001
خطا Error	22	0.001		
کل Total	35			

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

**Significant difference in 1% probability level

بافت ساقه می‌باشد. همچنین سطح سوم ساقه‌کوبی و سطح هفتم زمان دارای کم‌ترین تأثیر بر روی فرآیند خشک کردن می‌باشد؛ چرا که بافت ساقه مقدار محتوای رطوبتی زیادی را قبل از این تیمار از دست داده و تغییرات رطوبت به سبب این تیمار دارای کم‌ترین مقدار خود است.

برای آزمایش اول، از شکل ۹ که در مورد مقایسه میانگین آزمون چند دامن‌های دانکن برای نسبت رطوبت است می‌توان نتیجه گرفت که سطح دوم ساقه‌کوبی و سطح اول زمان، بیشترین تأثیر را بر فرآیند خشک کردن داشته است و هر سه تیمار سطح اول زمان در یک گروه قرار دارند. دلیل قرار گرفتن این سه تیمار فوق در یک گروه به خاطر نرخ بالای انتقال رطوبت در ابتدای آزمایش و انتقال آب آزاد داخل

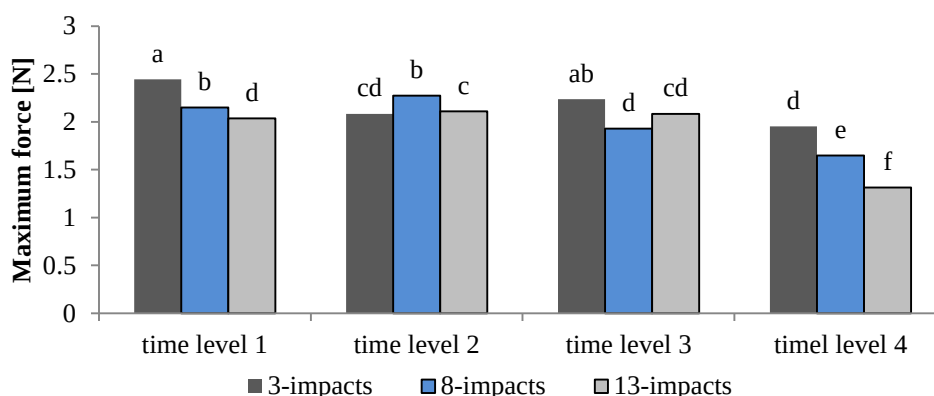


شکل ۹- نتایج مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن برای آزمایش اول (نسبت رطوبتی)

Fig. 9. Results of Duncan test to compare means for first experiment (moisture ratio)

برای جدایش برگ از ساقه می شود. دلیل اصلی کاهش نیروی ماکزیمم جدایش برگ از ساقه، کاهش رطوبت محصول است که تحت تاثیر شدت های مختلف ساقه کوبی می باشد. در مطالعه نظری و همکاران (Nazari et al., 2008)، تاثیر سطوح مختلف رطوبت (۲۰، ۴۰ و ۸۰ درصد محتوای رطوبتی در مبنای تر) بر روی توان برشی و انرژی برش در سطح احتمال ۵ درصد مانند مطالعه حاضر به صورت معنی دار به دست آمد.

در آزمایش دوم شدت ساقه کوبی در ۳ سطح و زمان در ۴ سطح در نظر گرفته شده اند. در مورد شکل ۱۰ نیز می توان این گونه بیان کرد که در ابتدا با توجه به ساختار ساقه (دارای محتوای رطوبتی بالا) و همچنین زمان کوتاه تر در تیمار سطح ساقه کوبی اول و محدوده زمانی اول برای از دست دادن رطوبت، نیروی جدایش بالایی مورد نیاز بوده است. برعکس، تیمار دارای سطح سوم ساقه کوبی و محدوده زمانی چهارم، با اعمال شدت ساقه کوبی بالاتر و همچنین گذر زمان، بافت گیاه یونجه خشک شده و باعث کاهش بیشینه نیروی مورد نیاز



شکل ۱۰- نتایج مقایسه میانگین با استفاده از آزمون چند دامنه ای دانکن برای آزمایش دوم (نیروی جدایش برگ از ساقه)
Fig.10. Results of Duncan test to compare means for second experiment (leaf-stem separation force)

می افتد. در کارهای مشابه ویژگی های خمشی و برشی ساقه گل رنگ در رطوبت های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. طبق نتایج به دست آمده کاهش رطوبت ساقه سبب کاهش تنش برشی اعمال شده و همچنین نیروی برشی شده است (Shahbazi and Nazari, 2012). همچنین در مطالعه مربوط به تاثیر محتوای رطوبتی بر ویژگی های برشی کاه جو، محققان به این نتیجه رسیده اند که با کاهش رطوبت، تنش برشی و انرژی برش کاهش می یابد (Tavakoli et al., 2009).

تأثیر رطوبت محصول بر نیروی جدایش برگ از ساقه
 از جمله عوامل مهم موثر بر نیروی جدایش برگ از ساقه، محتوای رطوبتی بافت در زمان آزمایش است که باید از نظر تاثیر بر مقدار نیرو در زمان بررسی شود. از این رو سه نمونه از محصول ساقه کوبی شده یونجه با شدت های مختلف که نسبت های رطوبت های مختلف داشتند از نظر نیروی جدایش برگ از ساقه با همدیگر مقایسه شده و نتایج حاصل گزارش گردید (جدول ۵). با کاهش مقدار رطوبت، میزان نیروی مورد نیاز با نرخ بیشتری کاهش می یابد که به دلیل کاهش میزان رطوبت و تردتر شدن محصول اتفاق

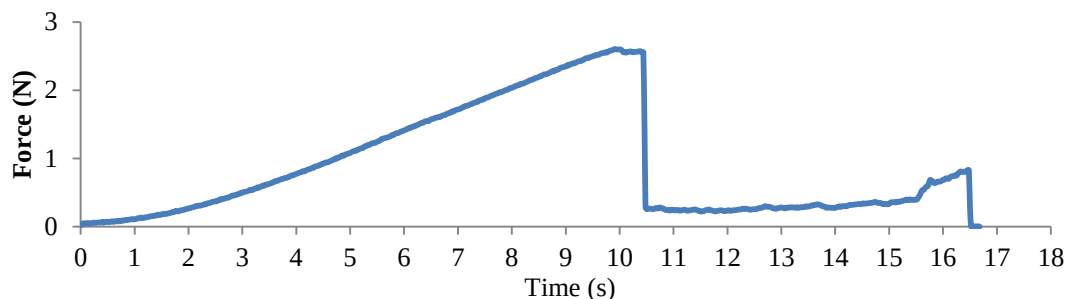
جدول ۵- مقدار ماکزیمم نیروی جدایش برگ ۶ ساعت بعد از شروع آزمایش در درصدهای مختلف رطوبت و شدت های ساقه کوبی

Table 5- Maximum leaf separation force for different moisture percent in 6 hours after starting the experiments at various conditioning intensities

شدت ساقه کوبی Conditioning intensity	درصد رطوبت Moisture Percent (%)	مقدار ماکزیمم نیرو Maximum Force (N)
شاهد (Control)	51.05	2.19
۳ ضربه (3 impacts)	49.56	2.15
۸ ضربه (8 impacts)	48.62	2.12
۱۳ ضربه (13 impacts)	46.33	2.07

ایجاد شده در نمودار نیرو-زمان می‌گردد (Engels and Jung, 1998).

نظری و همکاران (Nazari, et al., 2008) مطالعه‌ای در قالب تاثیر محتوای رطوبتی (چهار سطح) و ارتفاع ساقه (سه سطح) بر روی تعدادی از ویژگی‌های مهندسی ساقه گیاه یونجه انجام دادند. طبق نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، توان برشی با افزایش محتوای رطوبتی، افزایش یافت، که در توافق با نتایج این مطالعه است. همچنین انرژی برش نیز با افزایش محتوای رطوبتی یک روند افزایشی را نشان داد. لازم به ذکر است، بیشترین توان برشی متعلق به بخش پایینی ساقه و کمترین توان برشی به بخش بالایی ساقه تعلق داشت.



شکل ۱۱- نمودار نیرو- زمان برای سرعت پروب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در تیمار سه ضربه
Fig. 11. Force-time chart in probe speed of 10 mm min⁻¹ for 3 impacts treatment

همچنین خطای قطع^۲ خواهد شد که در هر دو مورد خطای عددی را افزایش خواهد داد.

نتایج مربوط به شبیه‌سازی عددی در قالب کانتورهای اندازه سرعت و کانتورهای نسبت جرمی مربوط به رطوبت (بخار آب) در ادامه ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل حجم بالای نتایج مربوط به حالت‌های مختلف، نتایج شبیه‌سازی مربوط به تیمار شاهد و سایر تیمارها برای حالت با سه ضربه ارائه شده است.

اندازه سرعت

اندازه سرعت برای مجرای داخلی ساقه بیانگر نرخ انتقال رطوبت در داخل ساقه است. با توجه به ماهیت حل مسئله که به‌صورت گذرا است، کانتور اندازه سرعت برای بخش‌های بالایی و پایینی ساقه یونجه ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل ۱۳ مشخص است، برای هر دو بخش در نزدیکی بخش‌هایی که ضربه به آن بخش‌ها وارد شده است، گرادیان سرعت مشهود است که این گرادیان به خاطر تغییرات مسیر و تغییرات سرعت محوری در آن نقاط ایجاد شده است

نظر به اهمیت نیروی ماکزیمم برای جدایش برگ از ساقه، مقدار تغییرات این پارامتر برای تیمار ۳ ضربه به تصویر کشیده شد. همانطوری که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد، با شروع فرآیند کشش در دستگاه بافت‌سنج، مقدار نیروی کششی در ده ثانیه اول افزایشی تقریباً خطی داشته و سپس با یک افت ناگهانی در یک مقدار پایین ثابت قرار گرفته و در نهایت به مقدار صفر (جدا شدن کامل برگ از ساقه‌گاه یونجه) رسیده است. دلیل این تغییرات نیرو به ازای زمان، به بافت بخش اتصال‌یافته برگ به ساقه مربوط می‌گردد که نشان‌دهنده ساختار چندلایه (بیشینه مقدار قله اول مربوط به لایه بیرونی و مقدار بیشینه قله دوم مربوط به لایه داخلی) بخش اتصال می‌باشد. چرا که لایه‌های بیرونی و درونی با توجه به همین ساختار چندلایه سطوح رطوبتی مختلفی دارند و همین تفاوت در سطح رطوبت سبب تغییرات

شبیه‌سازی

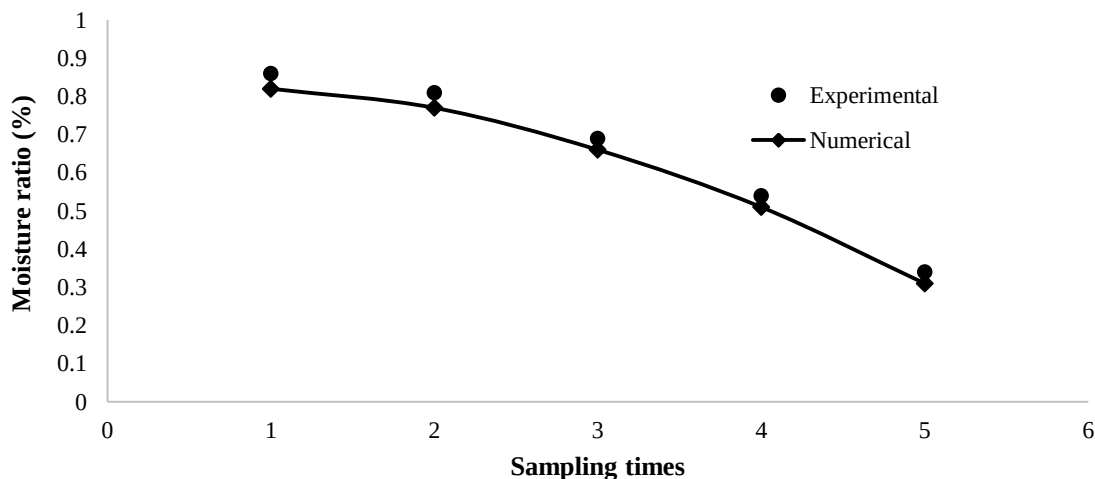
برای اطمینان از صحت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی، بایستی نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از نتایج تجربی اعتبارسنجی گردد. برای این منظور از مقدار رطوبت که به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شده بود و مقایسه آن با مقدار رطوبت خروجی از نرم‌افزار استفاده گردید و نتایج مربوطه در قالب شکل ۱۲ ارائه گردیده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی از تطابق بالایی با نتایج تجربی (ماکزیمم خطای ۸/۸٪) برخوردار است. دلایل این تطابق خوب را می‌توان توانمندی بالای روش دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی فرآیند انتقال جرم دانست که در تحقیقات قبلی نیز به آن اشاره شده است (Erriguible et al., 2006; Jamaledine et al., 2010). همچنین انتخاب تعداد مناسب مش برای شبکه‌بندی هندسه و انتخاب مدل مناسب جهت تحلیل عددی دانست. چرا که اگر تعداد مناسب شبکه‌بندی (چه تعداد بسیار بالا و چه تعداد پایین) اتخاذ نگردد، سبب افزایش خطای گرد کردن^۱ و

2- Truncation error

1- Round-off error

لحاظ شده است. همچنین با توجه به شکل ۱۳-ب می‌توان دریافت که برش‌های ایجاد شده با هدایت رطوبت از محل‌های بریده شده سبب کاهش اندازه سرعت بعد از محل اعمال برش شده و تقریباً سبب کاهش ۳۰ درصدی در مقدار اندازه سرعت راستای حرکت رطوبت گردیده‌اند.

و سبب ایجاد تغییر در کانتور اندازه سرعت شده است. در شکل ۱۳-الف که به کانتور اندازه سرعت قسمت بالایی ساقه گیاه یونجه تعلق دارد، عمده مقدار سرعت در بخش مرکزی ساقه و در ادامه کاهش مقدار اندازه سرعت تا نزدیکی صفر در نزدیک دیواره، به‌خوبی نشان داده شده است که موید شرط عدم لغزش در نزدیک دیواره

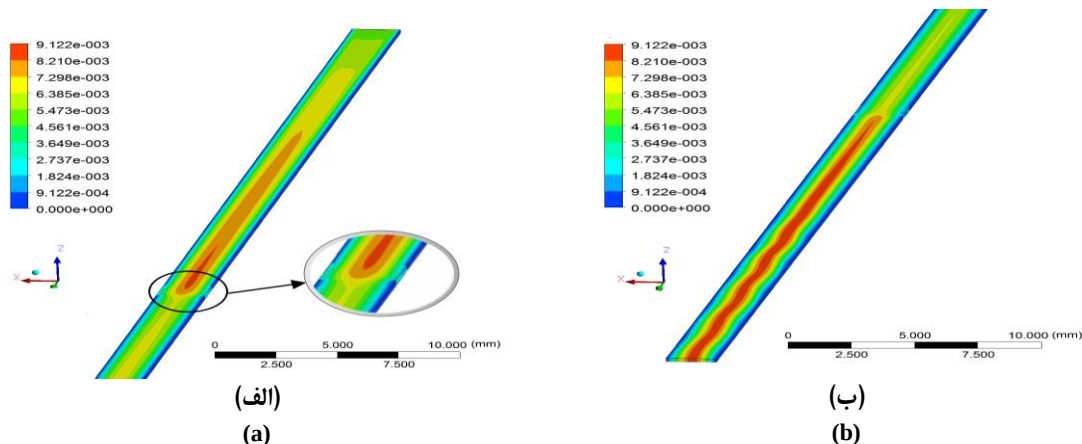


شکل ۱۲- اعتبارسنجی بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی

Fig. 12. Validation between experimental data and simulation results

از کانتورها این نتیجه قابل برداشت است که در محل‌های اعمال ضربه، سرعت انتقال رطوبت از حدود میانگین 0.005 mm.s^{-1} به حدود میانگین 0.002 mm.s^{-1} رسیده است و افزایش حدوداً ۴ برابری را در این مناطق نشان می‌دهد که علت خشک شدن سریع‌تر یونجه ساقه‌کوبی شده، همین مسئله است.

نکته مهم دیگری که از کانتورها استخراج می‌گردد؛ کاهش میزان سرعت در مقطع ساقه به‌واسطه مقاومت داخلی ساختار متخلخل گیاه است که رفته رفته باعث کاهش سرعت انتقال مواد می‌گردد. مقدار بیشینه سرعت برای بخش داخلی ساقه مقدار $9.122 \times 10^{-3} \text{ mm.s}^{-1}$ است که به نوعی مقدار پایین اندازه سرعت و به تبع آن انتقال جرم در داخل ساقه را نشان می‌دهد. ضمناً با استفاده



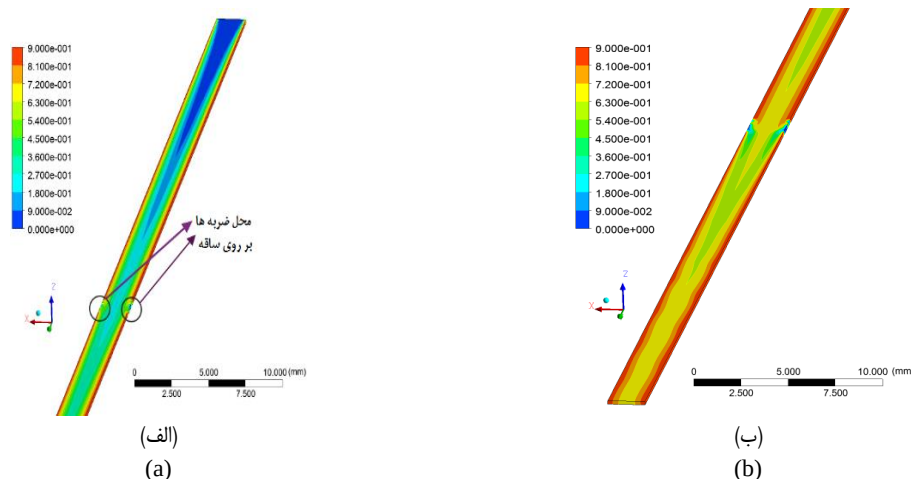
شکل ۱۳- کانتور اندازه سرعت؛ (الف): قسمت بالایی ساقه، (ب): قسمت پایینی ساقه

Fig. 13. Contour of velocity magnitude; (a): Top section of stem, (b): Bottom section of stem

نسبت جرمی رطوبت

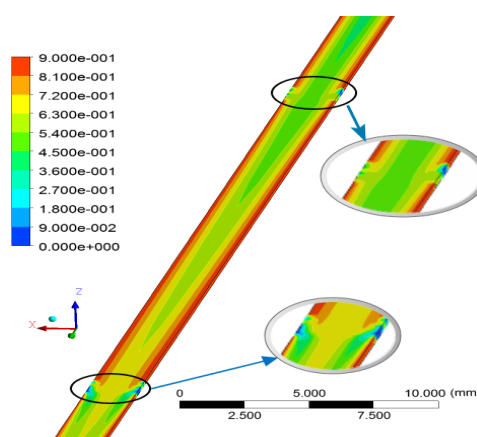
با توجه به اهمیت انتقال جرم در فرآیند انتقال رطوبت، کانتورهای مربوط به نسبت جرمی رطوبت آورده شده است. در شکل ۱۴-الف که به بخش بالایی گیاه اختصاص دارد با توجه به محل انباشتگی رطوبت که نزدیک به دیواره می‌باشد، نسبت رطوبت در این نواحی بالاست، در بخش بالایی و با توجه به مسدود در نظر گرفتن بخش انتهایی ساقه میزان انتقال رطوبت از این بخش دارای مقدار بسیار پایینی می‌باشد و در نزدیک دیواره به میزان صفر می‌رسد. همچنین در نزدیکی محل‌های اعمال ضربه با توجه به عدم انباشتگی رطوبت، دارای نسبت جرمی نسبتاً پایینی می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده، در شکل ۱۵ محل اعمال دو ضربه در

کنار هم ارائه شده است تا روند کاهشی میزان رطوبت در محصول و خشک شدن آن با گذشت زمان و تحت تأثیر انتقال رطوبت از دیواره‌ها و همچنین محل‌های اعمال ضربه قابل توجیه باشد. همچنین میزان گرادیان نسبت جرمی در نزدیکی محل‌های اعمال ضربه به خوبی قابل مشاهده است. این نکته حائز اهمیت است که بیشترین میزان نسبت جرمی رطوبت در نزدیکی دیواره‌ها و به مقدار تقریبی 0.16 می‌باشد. از نظر نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سایر حالت‌ها نیز تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی برقرار است و در تمامی سطوح خطا زیر 10 درصد می‌باشد. در جدول ۶ مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی به همراه مقدار خطا بر حسب درصد ارائه شده است.



شکل ۱۴- کانتور نسبت جرمی رطوبت؛ (الف): قسمت بالایی ساقه، (ب) قسمت پایینی ساقه

Fig. 14. Mass fraction contour of humidity; (a): Top section of stem, (b): Bottom section of stem



شکل ۱۵- کانتور نسبت جرمی رطوبت

Fig. 15. Mass fraction contour of humidity

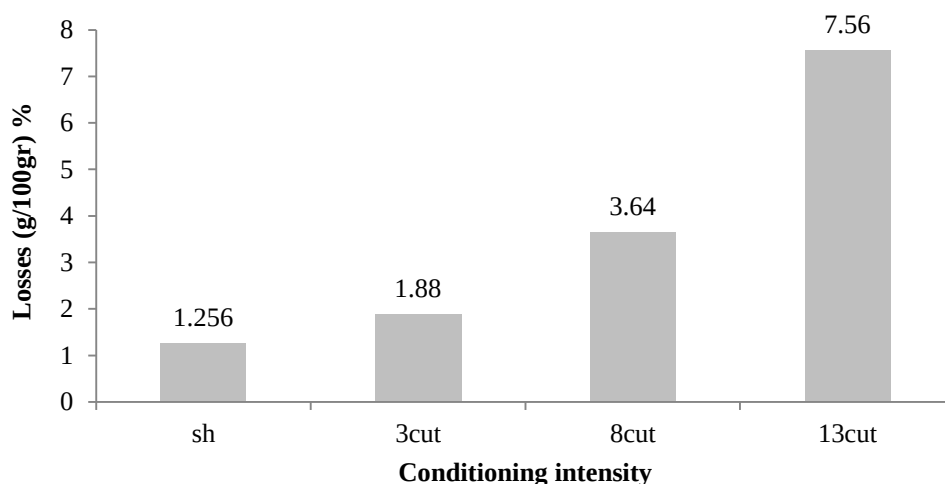
جدول ۶- مقایسه بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی نسبت جرمی رطوبت به همراه مقدار خطا بر حسب درصد**Table 6-** A comparison of experimental data and numerical results of humidity mass fraction with error in percent

خطا (%)	شبیه‌سازی	تجربی	تیمار
Error (%)	Numerical	Experimental	Treatment
6.17	0.81	0.86	شاهد Control
4.65	0.82	0.86	۳ ضربه 3-impacts
3.66	0.82	0.85	۸ ضربه 8-impacts
8.4	0.76	0.83	۱۳ ضربه 13-impacts

تلفات

در شکل ۱۶ تلفات شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی ارائه شده است. به منظور ارائه گزارش در مقیاس درصد، با وجود ۵۰ گرمی بودن هر دسته، مقادیر در عدد ۲ ضرب شدند تا گزارش به‌صورت تلفات در ۱۰۰ گرم از آن دسته گزارش شود. در کل، دسته شاهد دارای کمترین

مقدار تلفات با ۱/۲۵۶ گرم به ازای ۱۰۰ گرم و دسته ۱۳ ضربه دارای بیشترین تلفات با مقدار ۷/۵۶ گرم در ۱۰۰ گرم از محصول است. نکته حائز اهمیت افزایش تلفات ساقه‌کوبی بعد از ساقه‌کوبی با شدت ۸ ضربه است، به‌طوری که بعد از این شدت تلفات با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد.

**شکل ۱۶-** تلفات شدت‌های مختلف ساقه‌کوبی**Fig. 16.** Losses of various intensities of conditioning

نرخ از دست دادن رطوبت، نیروی مورد نیاز برای جدایش برگ از ساقه در سرعت پروب ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و در رطوبت‌های مختلف و همچنین شبیه‌سازی نرخ از دست‌دادن رطوبت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفتند. موارد بیان شده استخراج گردید و مورد بحث قرار گرفت.

با در نظر گرفتن کیفیت محصول نهایی و تلفات آن‌ها و ارزیابی‌های انجام گرفته بین ۴ تیمار مختلف (شاهد، ۳ ضربه، ۸ ضربه و ۱۳ ضربه)، تیمار ۸ ضربه، ساقه‌کوبی متوسط به‌عنوان بهترین حالت انتخاب شد. همچنین در هر دو آزمایش فاکتوریل اثرات شدت ساقه‌کوبی و زمان به‌ترتیب بر روی نسبت رطوبت و همچنین بیشینه نیروی جدا کردن برگ از یونجه به‌صورت معنی‌دار در سطح آماری

لازم به ذکر است که با توجه به ارزیابی‌های انجام گرفته از نظر زمان خشک شدن تا رسیدن به رطوبت بهینه و همچنین مقدار تلفات بر حسب گرم محصول خشک شده، از بین ۴ تیمار مختلف، با در نظر گرفتن کیفیت محصول نهایی و تلفات آن‌ها، تیمار با ۸ ضربه به‌عنوان بهترین حالت انتخاب شد.

نتیجه‌گیری

در محصولات علوفه‌ای مانند یونجه، رسیدن محصول به رطوبت مطلوب در زمان بسته‌بندی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، گروه شاهد و ۳ گروه ساقه‌کوبی شده از گیاه یونجه از نظر

یک درصد به‌دست آمد.

خواهد شد.

به‌صورت جمع‌بندی، دسته شاهد دارای کمترین میزان تلفات با ۱/۲۵۶ گرم در ۱۰۰ گرم و دسته ۱۳ ضربه دارای بیشترین تلفات با مقدار ۷/۵۶ گرم در ۱۰۰ گرم از محصول است. تلفات ساقه‌کوبی بعد از ساقه‌کوبی با شدت ۸ ضربه افزایش یافته است، به‌طوری که بعد از این شدت تلفات با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد، از این رو شدت ساقه‌کوبی با تعداد بالاتر از ۸ ضربه سبب افزایش در میزان تلفات

بنابر نتایج، مدل محیط متخلخل و بخش انتقال جرم مربوط به گونه‌ها در نرم‌افزار انسیس فلوئنت از قابلیت بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های مربوط به خشک‌کردن محصولات کشاورزی برخوردار است. همچنین در نزدیکی محل‌های اعمال ضربه گرادیان انتقال رطوبت مشاهده شده از شبیه‌سازی‌های تجربی به خوبی تأثیر اعمال ضربه‌ها بر فرآیندهای انتقال داخل گیاه را نشان داد.

References

- Aboltins, A., and P. Kic. 2018. Influence of air velocity on drying dynamics of alfalfa. 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 1: 1470-1475.
- Anderson, J. D. 2009. Basic Philosophy of CFD in Computational Fluid Dynamics. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Bartzanas, T., D. D. Bochtis, C. G. Sorensen, A. A. Sapounas, and O. Green. 2010. A numerical modeling approach for biomass field drying. Biosystems Engineering 106: 458-469. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.05.010>
- Che, G., H. J. Wen, L. Wan, Y. R. Qing, and X. Wang. 2015. Kinematic Simulation and Experimental Study on Rotating Air Flow for Drying Alfalfa. Drying Technology 33: 1720-1727. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1026980>
- Datta, A. K. 2007a. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. Journal of Food Engineering 80: 80-95. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>
- Datta, A. K. 2007b. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. Journal of Food Engineering 80: 96-110. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.012>
- Engels, F. M., and H. G. Jung. 1998. Alfalfa stem tissues: Cell-wall development and lignification. Annals of Botany 82: 561-568. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0705>
- Erriguible, A., P. Bernada, F. Couture, and M. Roques. 2006. Simulation of convective drying of a porous medium with boundary conditions provided by CFD. Chemical Engineering Research and Design 84: 113-23. <https://doi.org/10.1205/cherd.05047>
- Farhang, A., A. Hosinpour, H. Darvishi, M. H. Khoshtaghaza, and T. Tavakolli Hashtjin. 2010. Accelerated drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) by microwave dryer. Global Veterinaria 5: 158-163.
- Fasina, O., and S. Sokhansanj. 1995. Modelling the bulk cooling of alfalfa pellets. Drying Technology 13: 1881-1904. <https://doi.org/10.1080/07373939508917055>
- Giuberti, G., G. Rocchetti, S. Sigolo, P. Fortunati, L. Lucini, and A. Gallo. 2018. Exploitation of alfalfa seed (*Medicago sativa* L.) flour into gluten-free rice cookies: Nutritional, antioxidant and quality characteristics. Food Chemistry 239: 679-687. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.004>
- Hassanpour, A., A. Modarres Motlagh, M. Esmaili, and A. Rahmani Didar. 2011. Changes in the mechanical properties of white seedless grapes during different maturity stages. Journal of Food Research 21 (3): 343-355. (In Persian).
- Hopkins, D. L., E. S. Toohey, M. J. Kerr, and R. Van de Ven. 2011. Comparison of two instruments (G2 Tenderometer and a Lloyd Texture analyser for measuring the shear force of cooked meat. Animal Production Science 511: 71-76. <https://doi.org/10.1071/AN10136>
- Ivanov, Y. A., V. Pakhomov, S. Braginet, O. N. Bakhchevnikov, and A. Rukhlyada. 2018. Experimental study on microwave-vacuum drying of alfalfa. Journal of Engineering and Applied Sciences 13 (19): 8019-8024.
- Jamaledine, T., and M. Ray. 2010. Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: A review. Drying Technology 28: 120-54. <https://doi.org/10.1080/07373930903517458>
- Kung, L., L. D. Satter, B. A. Jones, K. W. Genin, A. L. Sudoma, G. L. Enders, and H. S. Kim. 1987. Microbial Inoculation of Low Moisture Alfalfa Silage. Journal of Dairy Science 70: 2069-2077. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(87\)80255-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(87)80255-2)
- Naimi, S., G. Shahgholi, A. Rezvanivand Fanaie, and V. Rostampour. 2019. Numerical Study of Wheat Conveying in Separator Cyclone Using Computational Fluid Dynamics. Journal of Agricultural Machinery 11 (2): 231-246. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v11i2.79613>
- Nazari G. M., A. Jafari, S. S. Mohtasebi, A. Tabatabaeefar, A. Sharifi, M. J. O'Dogherty, S. Rafiee, and G. Richard. 2008. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems.

- Biosystems Engineering 101: 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.07.006>
19. Nazari G. M., A. Tabatabaeefar, A. Jafari, A. Sharifi, S. Rafiee, and S. S. Mohtasebi. 2009. Influence of moisture content, rate of loading and height regions on tensile strength of alfalfa stems. *International Agrophysics* 23: 27-30.
20. Patil, R. T., S. Sokhansanj, E. A. Arinze, and G. J. Schoenau. 1993. Methods of expediting drying rates of chopped alfalfa. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 36: 1799-1803.
21. Rezvanivandefanayi, A., and A. M. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator. *International Journal of Food Engineering* 11: 71-77. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0125>
22. Rezvanivandefanayi, A., A. Hasanpour, and A. M. Nikbakht. 2019. Study of the vapor thermos-compressor to reduce energy consumption in the sugar production line using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Agricultural Machinery* 10 (2). (In Persian). DOI: [10.22067/jam.v10i2.76872](https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.76872)
23. Rotz, C. A., and Y. Chen. 1985. Alfalfa drying model for the field environment. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 28 (5): 1686-1691. DOI: [10.13031/2013.32500](https://doi.org/10.13031/2013.32500)
24. Sabralilou, B., A. Mohebbi, E. Akbarian, and A. Rezvanicand fanaei. 2019. Aero-acoustical study of axial fan using computational fluid dynamics. *Journal of Agricultural Machinery* 10 (2): 255-264. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.v10i2.74963](https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.74963)
25. Shahbazi, F., and M. Nazari. 2012. Bending and shearing properties of safflower stalk. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14: 743-754.
26. Siles, J. A., P. González-Tello, M. A. Martín, and A. Martín. 2015. Kinetics of alfalfa drying: Simultaneous modelling of moisture content and temperature. *Biosystems Engineering* 129: 185-196. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.10.007>
27. Tavakoli, H., S. S. Mohtasebi, and A. Jafari. 2009. Effects of moisture content, internode position and loading rate on the bending characteristics of barley straw. *Research in Agricultural Engineering*. 55: 45-51. <https://doi.org/10.17221/26/2008-RAE>
28. Wiersma, D. W., P. R. Carter, K. A. Albrecht, and J. G. Coors. 1993. Kernel milkline stage and corn forage yield, quality, and dry matter content. *Journal of Production Agriculture* 9: 92-99. <https://doi.org/10.2134/jpa1993.0094>
29. Wu, H. 2004. Alfalfa drying properties and technologies– in Review *Nature Science* 2: 65-67.
30. Zhao, A., X. XiaoFang, W. YongKang, R. HaiYan, G. G. DengKe, J. JinHua, and S. C. Li. 2018. Measuring texture quality of fresh jujube fruit using texture analyser. *Journal of Fruit Science* 35: 631-641.
31. Zobeiri, M., V. Rostampour, A. Rezvanivande Fanaei, and A. M. Nikbakht. 2019. Experimental and Numerical investigation of deviation blade effect on sedimentation chamber performance in chickpea harvesting machine. *Iran Biosystems Engineering* 52. (In Persian). DOI: [10.22059/ijbse.2020.276317.665166](https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.276317.665166)



Analysis of Energy of Diesel Engine using Diesel and Biodiesel Fuel Mixtures Containing Graphene Oxide Nanoparticles

M. Eshaghi Pireh¹, M. Gholami Par-Shokohi^{1*}, D. Mohammad Zamani¹

1- Department of Biosystems Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran

(*- Corresponding Author Email: gholamihassan@yahoo.com)

DOI: [10.22067/jam.2021.67098.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.67098.0)

Received: 17-11-2020

Revised: 24-05-2021

Accepted: 02-06-2021

Available Online: 02-06-2021

How to cite this article:

Eshaghi Pireh, M., M. Gholami Parashkoohi, and D. Mohammad Zamani. 2022. Analysis of Energy of Diesel Engine using Diesel and Biodiesel Fuel Mixtures Containing Graphene Oxide Nanoparticles. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 319-329. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.2021.67098.0](https://doi.org/10.22067/jam.2021.67098.0)

Introduction

Biodiesel is an eco-friendly renewable alternate fuel and is made from transesterification of vegetable oils and animal fat. The use of biodiesel fuel as a strategy to conserve energy and reduce emissions is becoming increasingly important in engines. Biodiesel fuels increase NO_x emissions in the engines. Compensate for the negative effect, the use of particles additive can be a reliable solution. In this study, the state of heat balance in a single-cylinder, four-stroke diesel engine with different fuel combinations with DXBYGZ formula (X % diesel fuel, Y % biodiesel mass, and Z ppm graphene oxide nanoparticles), has been studied experimentally.

Materials and Methods

Graphene nanoparticles in three levels of 30, 60, and 90 ppm were mixed with biodiesel produced from cooking waste oil by transesterification method with volume percentages of 5 and 20% and pure diesel was used. The test engine was a diesel engine, single-cylinder, four-stroke, compression ignition, and water cooling, in the laboratory of renewable energies of agricultural faculty, Moghadas Ardabili University. The engine is connected to a dynamometer and data were obtained after reaching steady state conditions. In thermal balance study, the combustion process merely as a process intended to free up energy fuel, and the first law of thermodynamics is used. The energy contained in the fuel is converted to useful and losses energies by combustion. Useful energy measured by dynamometer as brake power and losses energy including exhaust emission and cooling system losses. Variance analysis of all engine energy balance was done by split-plot design based on a completely randomized design and the means were compared with each other using the Duncan test at 5% probability.

Results and Discussion

The results showed that by adding 60 ppm of graphene oxide and 20% biodiesel to diesel fuel, the useful output power is reduced to a minimum and is reduced by about 5.52%. The results of the model evaluation of useful power, exhaust emissions, and thermal losses in the cooling system showed that the exponential model had a better fit. By adding biodiesel and graphene oxide nanoparticles to diesel fuel, the useful power was reduced. In order to achieve the maximum useful output power and with the priority of adding biodiesel to a high amount, the fuel composition of D80B20G90 had relatively better conditions. By adding 30 ppm of graphene to pure diesel fuel, the equivalent power of exhaust fumes was reduced to a minimum of about 18.5%. In general, heat loss through the cooling system in pure diesel fuel (D100) was lower than other fuel compounds. Pure diesel fuel was recognized as the best fuel mixture due to having the highest useful power, and lowest energy losses in the form of exhaust fumes and through cooling.

Conclusion

By adding graphene oxide to pure diesel fuel, the useful output power was reduced to a minimum. With the increase of biodiesel to diesel fuel, the amount of power of the cooling system also increased. By adding graphene oxide to pure diesel fuel, the equivalent power of the exhaust fumes was reduced. Heat loss through the cooling system increased with the increase of nano-graphene and biodiesel.

Keywords: Biodiesel, Energy, Graphene oxide, Modeling, Nanoparticles

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۱۹-۳۲۹

تحلیل انرژی موتور دیزل با استفاده از مخلوط‌های سوختی دیزل و بیودیزل حاوی نانو ذرات اکسید گرافن

میثم اسحق‌پیره^۱، محمد غلامی پرشکوهی^{۱*}، داوود محمدزمانی^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲

چکیده

در این تحقیق وضعیت تعادل گرمایی در یک موتور دیزل تک سیلندر، چهار زمانه و آب‌خنک با کاربرد نانوذرات اکسید گرافن در مخلوط‌های سوختی دیزل-بیودیزل بررسی شد. نانوذرات اکسید گرافن در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ پی‌پی‌ام به مخلوط‌های بیودیزل-دیزل (نسبت‌های حجمی صفر، ۵ و ۲۰ درصد بیودیزل) اضافه شد. آزمایش‌ها در شرایط بار کامل و سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه انجام شد. نتایج ارزیابی مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی، توان معادل آلایندگی خروجی آگروز و توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده نشان داد که مدل نمایی برازش بهتری داشت. با افزودن بیودیزل و نانو ذرات اکسید گرافن به سوخت دیزل توان مفید کاهش یافت. به‌طوری‌که با افزودن ۶۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن و ۲۰ درصد بیودیزل به سوخت دیزل، توان مفید خروجی به کمترین مقدار خود رسیده و در حدود ۵/۵۲ درصد کاهش یافت. به‌منظور دستیابی به بیشترین توان مفید خروجی و با اولویت افزودن بیودیزل به مقدار بالا، ترکیب سوختی ۹۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن و ۲۰ درصد بیودیزل به‌طور نسبی دارای شرایط بهتری بود. با افزودن ۳۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن به سوخت دیزل خالص، توان معادل دود آگروز به کمترین مقدار خود رسیده و در حدود ۱۸/۵ درصد کاهش یافت. در حالت کلی تلفات گرمایی از طریق سیستم خنک‌کننده در سوخت دیزل خالص نسبت به سایر ترکیبات سوختی پایین‌تر بود.

واژه‌های کلیدی: اکسید گرافن، انرژی، بیودیزل، مدل‌سازی، نانو ذرات

مقدمه

سوخت‌های پاک‌تر و تجدیدپذیر را اجتناب ناپذیر کرده است. از این‌رو، استفاده از سوخت بیودیزل هم به‌عنوان راهکاری برای حفظ منابع انرژی و هم کاهش آلایندگی‌ها اهمیت بسیاری در موتورهای پدید آورده است (Said et al., 2015). از طرفی دیگر، سوخت بیودیزل باعث افزایش آلایندگی اکسیدهای نیتروژن (NOx) در موتورهای می‌شود (Gharehghani, 2020).

تحقیقات زیادی در زمینه وضعیت تحلیل انرژی با کاربرد سوخت‌های مختلف در موتورهای درون‌سوز انجام شده است. در تحقیقی وضعیت موازنه انرژی در یک موتور دیزل تک سیلندر هوا خنک با استفاده از مخلوط‌های سوختی دیزل-بیودیزل بررسی شد. نتایج نشان داد سهم تلفات انرژی از طریق دود آگروز بیشترین مقدار را در همه درصدهای بیودیزل دارا بود (۵۱/۷۱ درصد) که بیشترین مقدار مربوط به بیودیزل ۴۲ درصد (۵۵/۹۸ درصد) و کمترین مقدار مربوط به دیزل خالص (۴۶/۴۸۱ درصد) بود (Abbasi et al., 2018).

در مطالعه‌ای به‌منظور بررسی تعادل گرمایی یک موتور دیزل چهار سیلندر با کاربرد سوخت‌های دیزل و بیودیزل حاصل از روغن پالم و جاتروفا با نسبت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی، نتایج نشان داد که مخلوط ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی به‌ترتیب برای بیودیزل روغن پالم و

سوختن سوخت‌های فسیلی منجر به انتشار آلایندگی‌های مختلفی در هوا می‌شود که برای محیط‌زیست و بهداشت عمومی مضر است. لذا مضرات استفاده از سوخت‌های فسیلی موجب افزایش توجه به سوخت‌های جایگزین شده است. یکی از منابع پایدار که به‌طور گسترده‌ای در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود بیودیزل است که از مواد اولیه مختلف، از جمله روغن‌های گیاهی، روغن‌های حیوانی، روغن پخت و پز، روغن میکرو جلیک و غیره به‌دست می‌آید (Abbasi et al., 2018). بیودیزل از واکنش بین تری گلیسیرید و الکل در حضور کاتالیزور به‌دست می‌آید. ترکیبات شیمیایی سوخت بیودیزل مشابه سوخت‌های فسیلی است (Bavafa, 2014).

کاهش منابع انرژی‌های فسیلی همراه با تشدید قوانین زیست‌محیطی برای کنترل آلایندگی‌های خروجی موتور، استفاده از

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: gholamihassan@yahoo.com
DOI: 10.22067/jam.2021.67098.0

آلاینده‌ها شد.

اگرچه در مطالعات زیادی اثر افزودن بیودیزل و نانوذرات به سوخت دیزل از دیدگاه عملکرد و آلاینده‌گی بررسی شده است اما مطالعه از دیدگاه انرژی در این زمینه بسیار محدود است. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تحلیل انرژی، عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل با کاربرد بیودیزل تولید شده از روغن پسماند خوراکی به روش ترانس استریفیکاسیون و نیز استفاده از نانو اکسید گرافن می‌باشد که به صورت مخلوط با سوخت دیزل و در بار کامل و سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند با در نظر گرفتن نتایج سایر مطالعات از نظر منبع تهیه ماده اولیه، درصد نانو ذرات اضافه شده، نسبت اختلاط بیودیزل و دیزل مورد استفاده و در جهت کاهش بحران انرژی مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه موازنه انرژی در واقع راه‌های اتلاف انرژی و مقدار آن‌ها را به منظور کاهش تلفات و افزایش بازده موتور نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

مواد

در این مطالعه ۱۲ نوع مخلوط سوختی دیزل-بیودیزل-نانوذرات اکسید گرافن انتخاب شد. سوخت شاهد مورد استفاده همان دیزل بود که با علامت اختصاری D نشان داده شد (سوخت دیزل شماره ۲ موجود در جایگاه‌های سوخت کشور). سوخت بیودیزل مورد استفاده با علامت اختصاری B بوده که در دو سطح ۵ و ۲۰ درصد حجمی مورد استفاده قرار گرفت. برای تولید بیودیزل از روغن‌های پسماند خوراکی استفاده شد. ویژگی‌های مهم سوخت بیودیزل با استاندارد ASTM D-6751-09 مطابقت داشت. نانوذرات مورد استفاده نیز اکسید گرافن با علامت اختصاری G بوده که پس از خریداری از شرکت تمداکالا در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ پی‌پی‌ام مورد استفاده قرار گرفت. مخلوط سوختی در پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی با استفاده از حمام مافوق صوت (Backer vCLEAN1-L4Ultrasonic Cleaner) به مدت ۳۰ دقیقه در فرکانس ۲۸kHz ترکیب و در نهایت با استفاده از دستگاه هموژنایزر به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شدند (Gharehghani, 2020). جدول ۱ تیمارهای آزمایش را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در شرایط بار کامل و سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه انجام شد.

تجهیزات

تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمون‌های موتور شامل موتور دیزل، دینامومتر، دستگاه آلاینده‌سنج AVL DITEFT (MDF418)، اتاق کنترل موتور (اعمال تغییرات در شرایط کاری موتور، ثبت و نمایش داده‌های مربوط به موتور) بود (شکل ۱).

جاتروفا منجر به تولید بیشتر تلفات گرمایی آب خنک‌کننده نسبت به دیزل خالص شد. همچنین، تلفات گرمایی از طریق دود اگزوز برای ۱۰ درصد حجمی بیودیزل برای هر دو روغن پالم و جاتروفا نسبت به دیزل خالص کاهش یافت (Abedin et al., 2015).

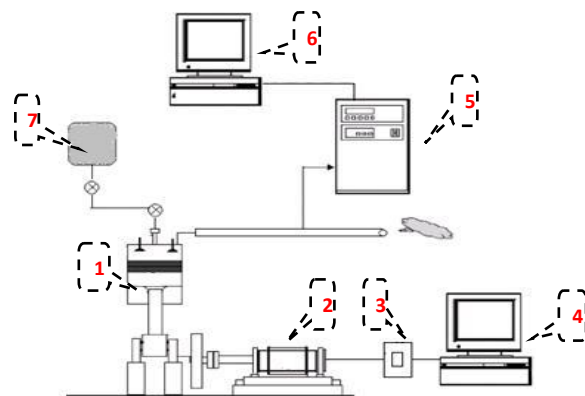
در پژوهشی دیگر افزودن نانو ذرات روی اکساید (ZnO) به ترکیب سوخت هیدروژن و بیودیزل در یک موتور دوگانه‌سوز بیان‌گر این بوده است که اندازه نانوذرات بر روی میزان بهبود بازده موتور اثرگذار است (Vellaiyan and Amirthagadeswaran, 2016). همچنین بررسی انجام شده بر روی سوخت دیزل دارای نانوذرات آلومینیوم (Al) نشان‌دهنده بیشتر بودن نرخ آزادسازی حرارت و در نتیجه افزایش آلاینده اکسیدهای نیتروژن (NOx) است (Mitchell et al., 2008). در تحقیقی دیگر افزودن نانوذرات سریم اکساید (CeO₂) به ترکیب سوخت دیزل-بیودیزل باعث بهبود فرآیند احتراق و در نتیجه بهبود راندمان حرارتی شد (Khalife et al., 2017). با توجه به موارد گفته‌شده، استفاده هم‌زمان از افزودنی‌های آب و نانوذرات، می‌تواند راه‌حل مطمئنی برای کاهش آلاینده‌ها و نیز بهبود راندمان کاهش مصرف سوخت باشد. قره‌خانی و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که استفاده از نانو مواد اکسید کبالت (Co₃O₄) با قطر بین ۱۰ تا ۳۰ نانومتر به سوخت دیزل در بهبود راندمان حرارتی موتور موثر می‌باشد (Gharehghani et al., 2015).

در تحقیقی تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا (Al₂O₃) بر روی عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزل تک سیلندر بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن این نانوذرات سبب بهبود قابل‌توجهی در بازده حرارتی ترمزی می‌شود (Prabu et al., 2017). حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2017) تاثیر افزودن CO Al₂O₃ با دوزهای ۳۰، ۶۰، ۹۰ پی‌پی‌ام به مخلوط سوخت B5 و B10 بر پارامترهای مختلف موتور و انتشار گازهای خروجی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که گشتاور، توان، مصرف ویژه سوخت، بازده حرارتی سوخت B₁₀Al₉₀ به ترتیب با ۵/۳۶، ۵/۳۶، ۱۰/۶۳ و ۱۴/۶۶- درصد در مقایسه با سوخت دیزل خالص متفاوت است. در تحقیقی اثر مستقل سه افزودنی نانوذرات سیلیکا، آلومینا و لوله‌های کربنی به سوخت بیودیزل بر عملکرد و انتشار آلاینده موتور دیزل تک سیلندر بررسی شد. نتایج نشان داد مصرف ویژه سوخت تا ۱۹/۸ درصد افزایش و بازده حرارتی ترمزی تا ۱۸/۸ درصد بهبود یافت. همچنین، آن‌ها دریافتند که افزودنی نانوسیلیکا نسبت به نانوآلومینا نتایج بهتری را در مشخصه‌های موتور از قبیل فشار احتراق، مصرف سوخت، انتشار CO نشان داده است (Chen et al., 2018). جبرائیلی و همکاران (Jabraeili et al., 2020) تاثیر افزودن نانوکامپوزیت Al₂O₃-SiO₂ به سوخت بیودیزل-دیزل بر روی عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزلی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که نانوذرات سیلیکا نسبت به نانوذرات آلومینا باعث بهبودی بیشتر در عملکرد موتور دیزلی و کاهش

جدول ۱- تیمارهای آزمایش

Table 1- Experimental treatments

اکسید گرافن (پی‌پی‌ام)	بیودیزل (درصد حجمی)	دیزل (درصد حجمی)	تیمار
Graphene oxide(ppm)	Biodiesel (volume percentage)	Diesel (volume percentage)	Treatment
0	0	100	D ₁₀₀
30	0	100	D ₁₀₀ G ₃₀
60	0	100	D ₁₀₀ G ₆₀
90	0	100	D ₁₀₀ G ₉₀
0	5	95	D ₉₅ B ₅
30	5	95	D ₉₅ B ₅ G ₃₀
60	5	95	D ₉₅ B ₅ G ₆₀
90	5	95	D ₉₅ B ₅ G ₉₀
0	20	80	D ₈₀ B ₂₀
30	20	80	D ₈₀ B ₂₀ G ₃₀
60	20	80	D ₈₀ B ₂₀ G ₆₀
90	20	80	D ₈₀ B ₂₀ G ₉₀



شکل ۱- طرحواره تجهیزات آزمایشگاهی تست موتور (۱- موتور مورد آزمایش، ۲- دینامومتر، ۳- کنترل از راه دور، ۴- سامانه داده‌گیری مربوط به عملکرد موتور، ۵- دستگاه آنالیز دود، ۶- سامانه داده‌گیری مربوط به آلاینده‌ی موتور و ۷- مخزن سوخت)

Fig. 1. Schematic engine test lab equipment (1- Engine tested, 2- Dynamometer, 3- Remote control, 4- Data backup system of engine performance, 5- Smoke analyzer, 6- Data backup system of exhaust emissions and 7- Fuel tank)

موازنه انرژی

در تحلیل انرژی، فرآیند احتراق به صورت فرآیندی برای آزاد کردن انرژی سوخت در نظر گرفته شده و از قانون اول ترمودینامیک برای محاسبه آن استفاده شد. انرژی موجود در سوخت موتور در اثر احتراق به صورت انرژی‌های مفید و تلف شده تبدیل می‌شود. به طوری که بخشی از آن به توان مفید خروجی و بقیه به صورت تلفات گرمایی از طریق آلاینده‌های خروجی اگزوز، سیستم خنک‌کننده موتور و تلفات گرمایی غیرقابل کنترل دفع می‌گردد. رابطه (۱) معادله مربوط به موازنه انرژی موتور را به صورت توان در بخش‌های مختلف نشان می‌دهد (Abbasi et al., 2018). در بررسی تعادل گرمایی، فرآیند احتراق فقط به صورت فرآیندی برای آزاد کردن انرژی سوخت در نظر گرفته شده و از قانون اول ترمودینامیک به صورت رابطه (۱) استفاده شد.

سامانه اندازه‌گیری مصرف سوخت شامل باک، اتصالات، لوله‌های انتقال سوخت، حسگر اندازه‌گیری حجمی مصرف سوخت، مبدل‌های خنک‌کننده سوخت برگشتی از موتور، مبدل‌های کنترل فشار سوخت، سنج فشار سوخت و حسگر اندازه‌گیری دمای سوخت بود (دقت اندازه‌گیری این سامانه ± 1 سی‌سی بر ساعت بود). موتور تحت آزمایش در این مطالعه یک موتور دیزلی تک سیلندر، چهار زمانه و آب‌خنک ساخت کارخانه کرلوسکار^۱ بود. برای اعمال بار بر موتور و اندازه‌گیری توان مفید، این موتور به یک دینامومتر الکتریکی جریان گردابی مدل Dyno D400 متصل شد و بعد از رسیدن موتور به شرایط پایدار، داده‌برداری انجام شد.

1- Kirloskar

گازهایی که درصد آن‌ها با استفاده از آلایندہ سنج به دست آمد، گرمای ویژه آن‌ها نیز در دمای متوسط اگزوز از جداول ترمودینامیک استخراج شد. باقی مانده گازهای خروجی اگزوز نیز با توجه به این که قابل اندازه گیری نبوده و شباهت زیادی به هوا دارند، از گرمای ویژه هوا در دمای متوسط استفاده شد (Özcan and Söylemez, 2006).

تلفات انرژی به صورت گرمای منتقل شده به سیال خنک کننده با توجه به این که موتور تحت آزمایش در این مطالعه از نوع هوا خنک بوده و سیستم خنک کاری آن بر اساس دمش هوا توسط یک فن در بدنه موتور می باشد، لذا انرژی منتقل شده به این سیال شامل تلفات گرمایی به تلفات گرمایی به صورت انتقال حرارت جابه جایی و تابش از بدنه موتور می باشد) بر اساس پایداری انرژی در موتور با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد (Abedin et al., 2015):

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{Q}_{fuel} - (P_b + \dot{Q}_{exh}) \quad (7)$$

پس از ثبت داده های مربوط به پارامترهای عملکرد و محاسبه موازنه انرژی در موتور مورد آزمایش، اجرای موازنه انرژی موتور در قالب طرح آماری اسپلیت پلات و بر اساس طرح پایه کاملاً تصادفی تجزیه واریانس شده و با استفاده از آزمون چنددامنه ای دانکن در سطح احتمال یک درصد مورد مقایسه میانگین قرار گرفتند.

مدلسازی اجزای تعادل گرمایی موتور

با توجه به این که یافتن مقادیر بهینه بیودیزل و نانوذرات در مورد اجزای تعادل گرمایی موتور یکی از اهداف اصلی این تحقیق بود لذا، محاسبه مقادیر بهینه مستلزم مدلسازی اجزای تعادل گرمایی (۱- توان مفید خروجی، ۲- تلفات توانی به صورت دود اگزوز و ۳- تلفات توانی از طریق سیستم خنک کننده) بر اساس مقادیر مختلف بیودیزل، نانوذرات و مصرف ویژه سوخت می باشد. لذا، به منظور یافتن بهترین مدل ریاضی در راستای پوشش وضعیت کاری موتور، مدلسازی اجزای تعادل گرمایی با استفاده از نرم افزار آماری SPSS16 انجام گرفت. این مدل ها شامل مدل های مختلف کلاسیک (شامل: مدل خطی درجه اول، مدل لگاریتمی، مدل معکوس، مدل درجه دوم، مدل درجه سوم، مدل توانی، مدل ترکیبی، مدل اس، مدل رشد و مدل نمایی) و غیر کلاسیک (با در نظر گرفتن ترکیبات خطی و غیر خطی متغیرهای مربوط به درصد بیودیزل و سرعت موتور با اشکال نمایی و مثلثاتی) بودند. به منظور دستیابی به مدلی که بتواند اجزای تعادل گرمایی موتور را با حداقل خطا پیش بینی نماید، از پارامترها و آزمون های استاندارد یعنی ضریب تبیین، آزمون F، آزمون معنی داری ضرایب، آزمون ناهمسانی واریانس، آزمون ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و آزمون استقلال خطا استفاده شد. هم چنین در انتخاب مدل مورد نظر، سادگی، مشتق پذیر بودن و پیوستگی مدل ها نیز جزو شاخص های انتخاب بودند. لازم به توضیح است که ریشه میانگین

$$\dot{Q}_{fuel} = P_b + \dot{Q}_{exh} + \dot{Q}_{cooling} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $\dot{Q}_{fuel}$ ، P_b ، $\dot{Q}_{exh}$ و $\dot{Q}_{cooling}$ به ترتیب توان معادل سوخت مصرفی، توان ترمزی (توان مفید)، توان معادل تلف شده آلایندہ های خروجی اگزوز و توان معادل تلف شده از طریق سیستم خنک کننده بر حسب کیلووات می باشند.

توان معادل انرژی گرمایی کل همان توان معادل انرژی شیمیایی سوخت است که طی فرآیند احتراق به گرما تبدیل می شود. توان معادل انرژی گرمایی کل با استفاده از ارزش گرمایی سوخت و دبی جرمی آن از رابطه (۲) محاسبه شد (Yuksel and Ceviz, 2002).

$$\dot{Q}_{fuel} = \dot{m}_f + \dot{Q}_{LHV.f} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\dot{m}_f$ و $\dot{Q}_{LHV.f}$ به ترتیب دبی جرمی سوخت ($kg.sec^{-1}$) و ارزش حرارتی پایینی سوخت ($kJ.kg^{-1}$) می باشند.

توان خروجی (P_b) در واقع توان روی چرخ لنگر بر حسب کیلووات است که با استفاده از سرعت دورانی (n) بر حسب دور در دقیقه و گشتاور (T) اندازه گیری شده به وسیله دینامومتر بر حسب نیوتون متر از رابطه (۳) محاسبه شد (Yuksel and Ceviz, 2002):

$$P_b = \frac{2\pi.n.T}{60000} \quad (3)$$

به دلیل اختلاف دمای دود خروجی و دمای محیط، دود خروجی دارای گرمای محسوس است. چون دود خروجی مخلوط گازی است، لذا با فرض ایده آل بودن آن از الگوی دالتون در تعیین گرمای محسوس استفاده می شود. تلفات گرمایی آلایندہ های خروجی اگزوز با استفاده از تغییرات آنتالپی در فشار ثابت و دمای متوسط اگزوز (میانگین دمای اگزوز و محیط) و دبی جرمی آلایندہ های خروجی اگزوز از رابطه (۴) محاسبه شد (Taymaz, 2003).

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_{exh} \times \bar{C}_{p.g} \times \Delta T_{exh} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، ΔT عبارت است از اختلاف دمای دود خروجی و محیط ($^{\circ}K$) و $\dot{m}_{exh}$ نیز دبی جرمی گازهای خروجی از اگزوز بر حسب ($kg.sec^{-1}$) که با استفاده از مجموع دبی جرمی هوا و سوخت ورودی به موتور (رابطه ۵) محاسبه شد.

$$\dot{m}_{exh} = \dot{m}_a + \dot{m}_f \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $\dot{m}_a$ دبی جرمی هوا ($kg.sec^{-1}$) بود. هم چنین در رابطه (۴)، $\bar{C}_{p.g}$ گرمای ویژه متوسط گازهای خروجی اگزوز در فشار ثابت و دمای متوسط اگزوز بر حسب ($kJ.kg^{-1}.^{\circ}K^{-1}$) می باشد که با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد:

$$\bar{C}_{p.g} = \sum_{i=1}^n (C_{p,i} \times X_i / 100) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، $C_{p,i}$ و X_i به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه هر آلایندہ در فشار ثابت و درصد آن در مخلوط گازهای خروجی اگزوز بودند.

مربعات خطا با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs,i} - x_{pred,i})^2}{n}} \quad (8)$$

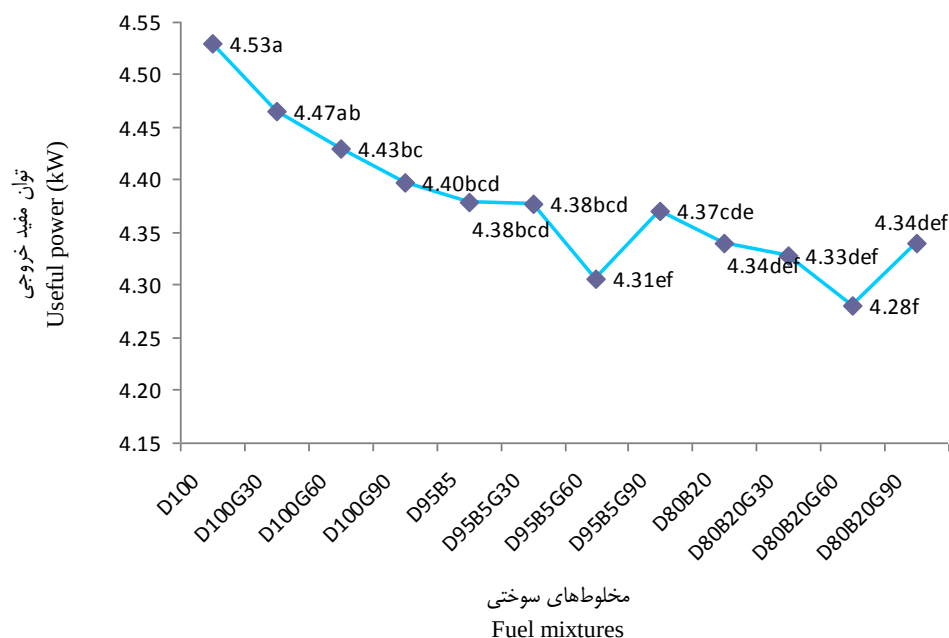
در رابطه (۸)، n ، x_{obs} و x_{pred} به ترتیب تعداد نمونه، مقدار مشاهده شده (واقعی) و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل بودند.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس مربوط به تأثیر بیودیزل و اکسید گرافن بر موازنه انرژی موتور مورد مطالعه، کاربرد بیودیزل بر توان مفید خروجی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده ولی بر توان معادل دود اگزوز و توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده معنی‌دار نبود. همچنین کاربرد نانوذرات اکسید گرافن بر هیچ‌یک از اجزای تعادل گرمایی معنی‌دار نبود.

توان مفید خروجی

شکل ۲ تغییرات توان مفید با افزودن بیودیزل و نانواکسید گرافن به سوخت دیزل را نشان می‌دهد. تیمارهای D_{100} و $D_{80B_{20}G_{60}}$ به ترتیب با ۴/۵۳ و ۴/۲۸ کیلووات دارای بیشترین و کمترین توان مفید خروجی بودند. به بیان دیگر، با افزودن ۶۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن و ۲۰ درصد بیودیزل به سوخت دیزل، توان مفید خروجی به کمترین مقدار خود رسیده و در حدود ۵/۵۲ درصد کاهش یافت. مطابق شکل



شکل ۲- تغییرات مربوط به توان مفید خروجی با کاربرد مخلوط‌های سوختی مختلف

Fig. 2. The variations of useful power using different fuel mixtures

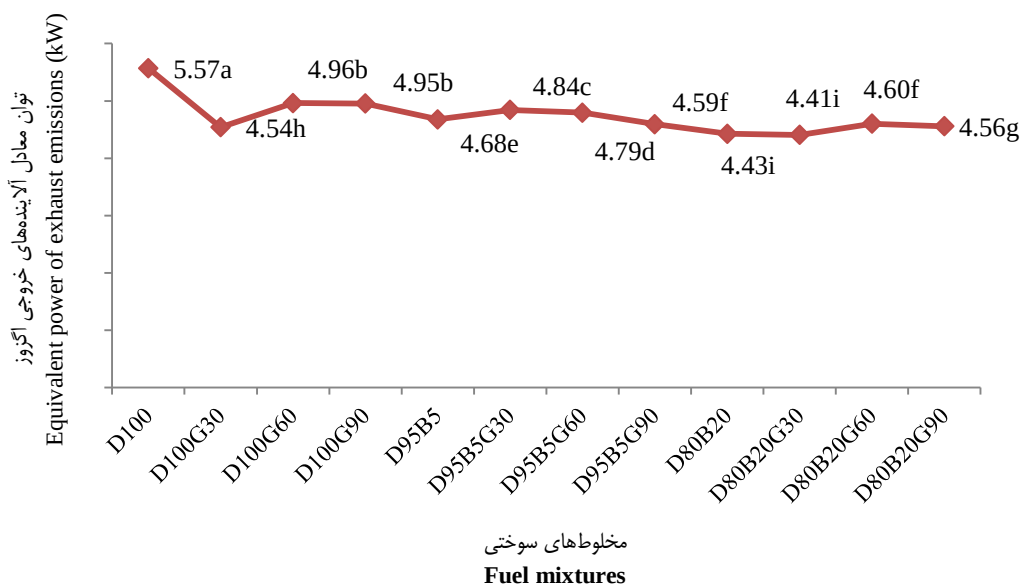
۲، با افزودن نانوذرات اکسید گرافن به سوخت پایه دیزل مقدار توان مفید روند نزولی داشته و بیشترین کاهش آن در مقدار ۹۰ پی‌پی‌ام از اکسید گرافن بود. در بین ترکیبات مختلف بیودیزل و اکسید گرافن، ترکیبات $D_{80B_{20}G_{90}}$ و $D_{95B_5G_{90}}$ دارای بیشترین توان مفید خروجی به ترتیب برابر ۴/۳۷ و ۴/۳۴ کیلووات بوده و اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. با توجه به نتایج به دست آمده، به منظور دستیابی به بیشترین توان مفید خروجی و با اولویت افزودن بیودیزل به مقدار بالا، ترکیب سوختی $D_{80B_{20}G_{90}}$ به طور نسبی دارای شرایط بهتری بود. کاهش کیفیت احتراق علت کاهش توان ترمزی با افزایش بیودیزل و نانواکسید گرافن بود. با افزودن بیودیزل و ذرات نانواکسید گرافن در مخلوط سوخت موجب کاهش ارزش حرارتی آن شده و منجر به کاهش توان مفید شد. عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2018) نیز نشان دادند با افزایش بیودیزل، ابتدا توان مفید تا حدود ۱۲ درصد افزایش یافته که به دلیل غالب بودن جرم حجمی بیشتر بیودیزل و در نتیجه افزایش بازده حجمی موتور بود که احتراق کامل‌تر را در پی داشت. لیکن با افزایش بیشتر بیودیزل، توان ترمزی کاهش یافت که به دلیل غلبه ارزش حرارتی کمتر بیودیزل بود. محققان دیگری نیز نتایج مشابه این تحقیق گزارش نموده‌اند (Rostami et al., 2010; Mrad et al., 2012).

توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز

شکل ۳ تغییرات توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز را با کاربرد بیودیزل و نانواکسید گرافن به سوخت دیزل را نشان می‌دهد. تیمارهای D_{100} و $D_{100}G_{30}$ به ترتیب با ۵/۵۷ و ۴/۵۴ کیلووات دارای بیشترین و کمترین توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز بودند. به بیان دیگر، با افزودن ۳۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن به سوخت دیزل خالص، توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز به کمترین مقدار خود رسیده و در حدود ۱۸/۵ درصد کاهش یافت.

مطابق نتایج به دست آمده، تفاوت اصلی از نظر توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز بین ترکیب سوختی ۳۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن در دیزل خالص ($D_{100}G_{30}$) با سایر تیمارها بود که در این میان همان گونه که گفته شد ترکیب سوختی $D_{100}G_{30}$ دارای کمترین توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز بود. با توجه به نتایج به دست آمده، به منظور دستیابی به کمترین توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز و با اولویت افزودن بیودیزل به مقدار نسبتاً بالا، ترکیب سوختی

$D_{80}B_{20}G_{30}$ به طور نسبی دارای شرایط بهتری بوده و توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز آن نسبت به سایر ترکیبات سوختی کمترین مقدار یعنی ۴/۴۱ کیلووات بود. اضافه کردن بیودیزل به سوخت دیزل در دو نسبت ۵ و ۲۰ درصد حجمی سبب کاهش تلفات اگزوز نسبت به دیزل خالص شده است از دلایل آن می‌توان به حضور اکسیژن در ساختار بیودیزل و ارزش حرارتی پایین‌تر نسبت به سوخت دیزل اشاره نمود. عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2018) در تحقیق خود نشان دادند که با افزودن ۳۲ درصد بیودیزل به دیزل خالص، حدود ۱۰ درصد توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز نسبت به بیودیزل ۲۲ و ۱۲ درصد افزایش می‌یابد و با افزایش بیودیزل به ۴۲ درصد مجدداً کاهش داشت. دلایل این محققان غلبه گرانروی بالاتر بیو دیزل به خصوص در درصدهای بالاتر بود که موجب کاهش اتمیزه شدن سوخت در هنگام پاشش و در نتیجه احتراق ناقص شد که در نهایت تولید دود بیشتر را به همراه داشت مانگو و همکاران (Magno et al., 2015) نیز نتیجه مشابه تحقیقات عباسی و همکاران گزارش نمودند.



شکل ۳- تغییرات مربوط به توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز با کاربرد مخلوط‌های سوختی مختلف

Fig. 3. The variations of equivalent power of exhaust emissions using different fuel mixtures

توان معادل تلف شده از طریق سیستم خنک‌کننده

شکل ۴ تغییرات توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده را با کاربرد مخلوط‌های سوختی مختلف نشان می‌دهد. تیمارهای D_{100} و $D_{100}G_{30}$ به ترتیب با ۳/۷۶ و ۶/۹۴ کیلووات دارای کمترین و بیشترین توان معادل خنک‌کننده بودند. تلفات گرمایی از طریق سیستم خنک‌کننده در سوخت دیزل خالص (D_{100}) نسبت به سایر ترکیبات سوختی پایین‌تر بود. با افزودن ۳۰ پی‌پی‌ام نانواکسید گرافن

به سوخت دیزل خالص توان معادل تلفات گرمایی خنک‌کننده در حدود ۸۴/۶ درصد افزایش یافت. از طرف دیگر با توجه به شکل ۴ در حالتی که تنها نانواکسید گرافن به دیزل خالص اضافه شود، روند توان معادل تلفات گرمایی خنک‌کننده رفته رفته نسبت به مخلوط سوختی با نانو اکسید گرافن ۳۰ پی‌پی‌ام ($D_{100}G_{30}$) کاهش یافت. به بیان دیگر، توان معادل خنک‌کننده در $D_{100}G_{90}$ نسبت به $D_{100}G_{30}$ در حدود ۱۶/۸۶ درصد کاهش پیدا نمود. همچنین در حالت استفاده توان

از نانواکسید گرافن و بیودیزل، شرایط تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده تا حدودی متفاوت شده و با افزودن ۵ درصد بیودیزل به همراه ۳۰ پی‌پی‌ام نانواکسید گرافن به سوخت دیزل خالص $(D_{95}B_{5}G_{30})$ ، توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده مقدار کمتری نسبت به $D_{100}G_{30}$ داشته که برابر ۴/۹۳ کیلووات بود. از طرف دیگر، در انتخاب ترکیبات سوختی به‌منظور داشتن تلفات گرمایی کمتر در بخش خنک‌کننده با اولویت کاربرد بیودیزل، ترکیب سوختی با ۲۰ درصد بیو دیزل و ۶۰ پی‌پی‌ام نانواکسید گرافن $(D_{80}B_{20}G_{60})$ بهترین شرایط را داشته و با ۵/۴۳ کیلووات توان معادل تلفات گرمایی خنک‌کننده، شرایط قابل‌قبولی را دارا بود.

با افزایش بیودیزل به سوخت دیزل مقدار توان سیستم خنک‌کننده افزایش یافت. یکی از دلایل این پدیده اثر گرانشی بیشتر بیودیزل در پاشش سوخت بود که منجر به کاهش کیفیت احتراق و در نتیجه تولید آلاینده‌گی بیشتر شده که آن هم موجب افزایش دمای بدنه موتور شد. عباسی و همکاران (*Abbasi et al., 2018*) نیز در تحقیق خود نشان دادند افزایش بیودیزل ابتدا تا ۱۲ درصد باعث کاهش جزئی در توان معادل تلفات گرمایی خنک‌کننده شده و پس از آن با شدت بیشتری افزایش پیدا کرد.

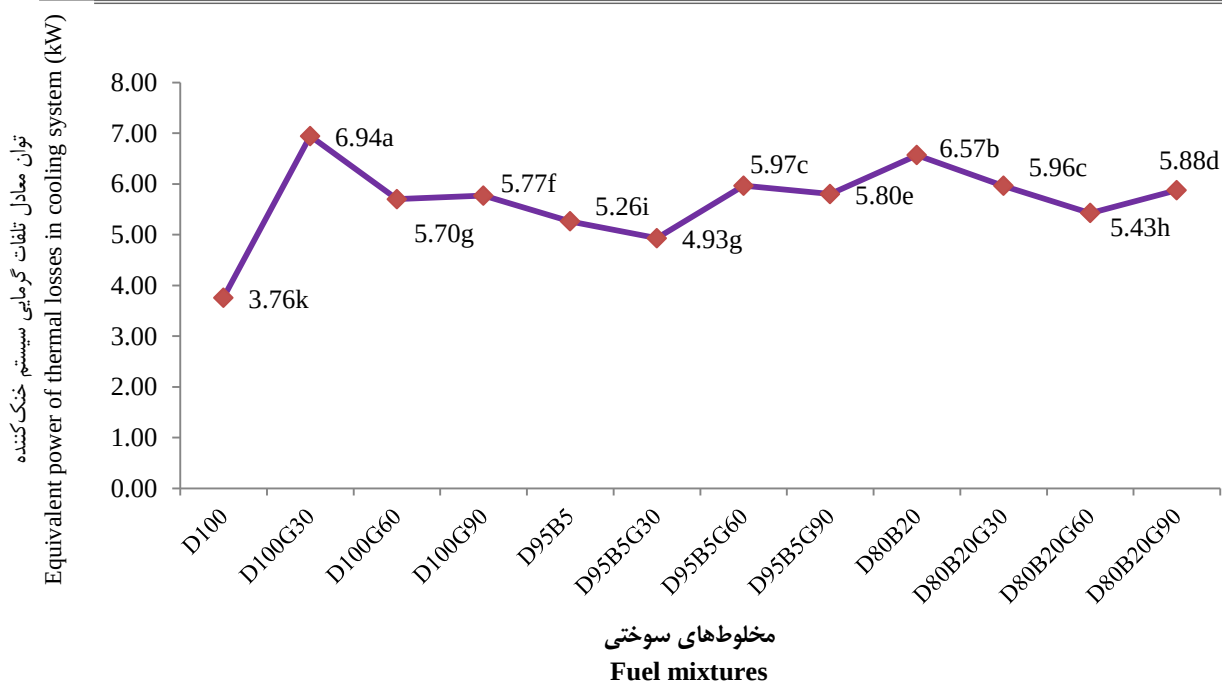
مدل‌سازی ریاضی توان مفید خروجی

نتایج تجزیه واریانس و ارزیابی مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی، توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز و توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده نشان داد که مدل نمایی برازش بهتری داشت و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شد.

جدول ۳ وضعیت ارزیابی ضرایب رگرسیونی مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۳، دو تا از ضرایب مربوط به مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی معنی‌دار بوده و به‌طور نسبی مصرف ویژه‌ی سوخت در افزایش توان مفید بیشترین تاثیر منفی را داشت. همچنین با توجه به پایین بودن مقدار میانگین عامل تورم واریانس (VIF)^۱، متغیرهای مستقل دارای مشکل هم‌خطی با یکدیگر نبوده و مقادیر پیش‌بینی مدل اختلاف معنی‌داری با مقادیر واقعی نداشت. آزمون نرمال داده‌ها در خصوص توان مفید خروجی نشان داد که به‌طور تقریبی منطبق با شرایط نرمال بود. پراکندگی مقادیر خطا در مدل تخمین زده شده به‌طور تقریبی مستقل از مقادیر پیش‌بینی در این مدل بوده و ضمن وجود تقارن حول نقطه صفر (در محور افقی)، منطبق با طرح خاصی نبود. به بیان دیگر، مدل تخمین‌زده شده برای توان مفید خروجی موتور از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تایید بوده و اختلاف معنی‌داری در مقادیر

توان مفید خروجی در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت. ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی اگزوز در موتور مورد آزمایش در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق با جدول ۴، کلیه ضرایب مربوط به مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی معنی‌دار بود. همچنین با توجه به مقدار میانگین عامل تورم واریانس (VIF) که پایین بود، متغیرهای مستقل تقریباً مشکل هم‌خطی با یکدیگر نداشته و مقادیر پیش‌بینی مدل اختلاف معنی‌داری با مقادیر واقعی نداشت. همچنین پراکندگی مقادیر واقعی در مورد توان معادل تلف شده از طریق گازهای خروجی به‌طور تقریبی منطبق با شرایط نرمال بود. پراکندگی مقادیر خطا در مدل تخمین زده شده به‌طور تقریبی مستقل از مقادیر پیش‌بینی در این مدل بوده و منطبق با طرح خاصی نبود. به بیان دیگر، مدل تخمین زده شده برای توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی موتور از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تایید بوده و اختلاف معنی‌داری در مقادیر توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت. به این ترتیب با توجه به شاخص‌ها و پارامترهای آماری در ارزیابی مدل تخمین زده شده، مدل انتخاب شده برای پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی قابل‌قبول بوده و دارای خطای معنی‌داری در برآورد این جزء از تعادل گرمایی موتور نخواهد بود.

ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده در جدول ۵ ارائه شده است. کلیه ضرایب مربوط به مدل پیش‌بینی توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده معنی‌دار بود. با توجه به مقدار میانگین عامل تورم واریانس (VIF) که تقریباً نزدیک به یک بود، متغیرهای مستقل به‌طور تقریبی مشکل هم‌خطی با یکدیگر نداشته و مقادیر پیش‌بینی مدل اختلاف معنی‌داری با مقادیر واقعی نداشت. پراکندگی مقادیر واقعی در مورد توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده به‌طور تقریبی منطبق با شرایط نرمال بود. پراکندگی مقادیر خطا در مدل تخمین زده شده به‌طور تقریبی مستقل از مقادیر پیش‌بینی در این مدل بوده و ضمن وجود تقارن حول نقطه صفر (در محور افقی)، منطبق با طرح خاصی نبود. به بیان دیگر، مدل تخمین زده شده برای توان تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تایید بوده و اختلاف معنی‌داری در مقادیر توان تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت. به این ترتیب با توجه به شاخص‌ها و پارامترهای آماری در ارزیابی مدل تخمین زده شده، مدل انتخاب شده برای پیش‌بینی توان تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده قابل‌قبول بوده و دارای خطای معنی‌داری در برآورد این جزء از تعادل گرمایی موتور نخواهد بود.



شکل ۴- تغییرات مربوط به توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده با کاربرد مخلوط‌های سوختی مختلف

Fig. 4. The variations of equivalent power of thermal losses in cooling system using different fuel mixtures

جدول ۲- مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی، آلاینده‌های خروجی و تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده

Table 2- Forecasting model of useful power, exhaust emissions and thermal losses in cooling system

ریشه میانگین مربعات خطا Root Mean Squar of Error	آزمون F F test	ضریب تعیین R ²	مدل ریاضی Mathematical model	توان Power
0.050	3.459 *	0.48	$P_b = \exp[2.311 - 0.145 \ln(bsfc) - 0.013 \sin(bsfc) - 0.0000014e^{Nano} + 0.009 \arctg(Nano^2)]$	مفید خروجی Useful
0.028	29.93 **	0.891	$\dot{Q}_{exh} = \exp \left[\begin{aligned} &1.704 + 0.097 \ln(Nano) - 0.082 \sin(Nano) \\ &- 0.031 \cos(bsfc) \end{aligned} \right]$	آلاینده‌های خروجی اگزوز Exhaust emissions
0.043	32.48 **	0.844	$\dot{Q}_{cooling} = \exp[-12.457 - 0.119 \ln(Nano) + 2.54 \ln(bsfc)]$	تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده Thermal losses in cooling system

bsfc: مصرف ویژه سوخت ترمزی (gr.kWh⁻¹)

bsfc: Brake specific fuel consumption (gr.kWh⁻¹)

Nano: نانواکسید گرافن (بی‌پی‌ام)

Nano: Graphene nanoparticles (ppm)

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ درصد

*, and **: it was significant at the 1 and 5% level, respectively

جدول ۳- ارزیابی مدل پیش‌بینی توان خروجی موتور

Table 3- Estimation of useful power forecasting model

هم‌خطی VIF	ارزش P p-value	ضریب استاندارد شده بتا Standardized beta coefficient	ضریب Coefficient	متغیر مستقل Independent variable
-	0.000	-	2.311	ثابت Constant
1.333	0.062	-0.433	-0.145	$\ln(bsfc)$
1.196	0.020	-0.530	-0.013	$\sin(bsfc)$
1.228	0.444	-0.162	-0.0000014	e^{Nano}
1.276	0.105	0.363	0.009	$\arctan(Nano^2)$

جدول ۴- ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز

Table 4- Estimation of exhaust emissions power forecasting model

متغیر مستقل	ضریب	ضریب استاندارد شده بتا	ارزش P	هم‌خطی
Independent variable	Coefficient	Standardized beta coefficient	p-value	VIF
ثابت Constant	1.704	-	0.000	-
$Ln(Nano)$	0.097	0.771	0.000	1.471
$Sin(Nano)$	-0.082	-0.906	0.000	1.152
$Cos(bsfc)$	-0.031	-0.351	0.014	1.457

جدول ۵- ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده

Table 5- Estimation of thermal losses in cooling system power forecasting model

متغیر مستقل	ضریب	ضریب استاندارد شده بتا	ارزش P	هم‌خطی
Independent variable	Coefficient	Standardized beta coefficient	p-value	VIF
ثابت Constant	-12.457	-	0.000	-
$Ln(Nano)$	-0.119	-0.378	0.007	1.019
$Ln(bsfc)$	2.54	0.891	0.000	1.019

نتیجه‌گیری

با افزودن نانوذرات اکسید گرافن به سوخت دیزل خالص، توان مفید خروجی به کمترین مقدار خود رسید. با افزایش بیودیزل به سوخت دیزل مقدار توان سیستم خنک‌کننده افزایش یافت. ترکیب سوختی ۶۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن با مخلوط سوخت بیودیزل و دیزل خالص کمترین توان مفید را داشت. به‌منظور دستیابی به بیشترین توان مفید خروجی و با اولویت افزودن بیودیزل به مقدار بالا، ترکیب

سوختی ۹۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن و ۲۰ درصد بیودیزل به‌طور نسبی دارای شرایط بهتری بود. با افزودن نانو ذرات اکسید گرافن به سوخت دیزل خالص، توان معادل دود اگزوز کاهش یافت. با افزایش بیودیزل به سوخت دیزل مقدار توان سیستم خنک‌کننده افزایش یافت. در حالت کلی تلفات گرمایی از طریق سیستم خنک‌کننده در سوخت دیزل خالص نسبت به سایر ترکیبات سوختی پایین‌تر بود.

References

- Abbasi, S., H. Bahrami, B. Ghobadian, and M. Kiani Deh Kiani. 2018. Energy analysis of a diesel engine using diesel and biodiesel from waste cooking oil. Journal of Agricultural Machinery 8 (1): 149-157. (In Persian). DOI: <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v8i1.58988>.
- Abedin, M. J., H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. Sanjid, and S. M. A. Rahman. 2015. Thermal balancing of a multi-cylinder diesel engine operating on diesel, B5 and palm biodiesel blends. Journal of Clean Energy Technologies 3: 115-118. DOI: [10.7763/JOCET.2015.V3.178](https://doi.org/10.7763/JOCET.2015.V3.178).
- Chen, A. F., M. A. Adzmi, A. Adam, M. F. Othman, M. K. Kamaruzzaman, and A. G. Mrwan. 2018. Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide. Energy Conversion and Management 171: 461-477. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.004>.
- Bavafa, M. 2014. Biodiesel production of fowl fatness oil and evaluation of diesel-biodiesel fuel blends on performance and exhaust emissions parameters in a diesel engine. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- Gharehghani, A. 2020. Experimental Investigation of the Effect of Nano-particle Concentrations on the First and Second Laws efficiency in CI engine fueled with Diesel/Biodiesel blend. Modares Mechanical Engineering 20 (8): 2009-2016. [10.1001.1.10275940.1399.20.8.17.2](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1399.20.8.17.2).
- Gharehghani, A., R. Hosseini, M. Mirsalim, S. A. Jazayeri, and T. Yusaf. 2015. An experimental study on reactivity controlled compression ignition engine fueled with biodiesel/natural gas. Energy 89: 558-567. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.014>.
- Hosseini, S. H., A. Taghizadeh-Alisaraei, B. Ghobadian, and A. Abbaszadeh-Mayvan. 2017. Effect of Added Alumina as Nano-Catalyst to Diesel-Biodiesel Blends on Performance and Emission Characteristics of CI Engine. Energy 124: 543-552. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.109>.
- Jabraeili, M., R. Pourdarbani, B. Najafi, and A. Nematlahzadeh. 2020. Investigation of the impact of $SiO_2-Al_2O_3$ nano-composite to biodiesel-diesel fuel on performance and emission of a diesel engine. Fuel and Combustion 13 (2): 25-39. (In Persian).

9. Khalife, E., M. Tabatabaei, A. Demirbas, and M. Aghbashlo. 2017. Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady-state operation. *Progress Energy and Combustion Science* 59: 32-78. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.10.001>.
10. Mrad, N., E. G. Varuvel, M. Tazerout, and F. Aloui. 2012. Effects of biofuel from fish oil industrial residue-Diesel blends in diesel engine. *Energy* 44: 955-963. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.056>.
11. Mitchell, M. R., R. E. Link, M. J. Kao, C. C. Ting, B. F. Lin, and T. T. Tsung. 2008. Aqueous aluminum nano fluid combustion in diesel fuel. *Journal of Testing and Evaluation* 36 (2): 503-512. DOI: [10.1520/JTE100579](https://doi.org/10.1520/JTE100579).
12. Özcan, H., and M. Söylemez. 2006. Thermal balance of a LPG fuelled, four stroke SI engine with water addition. *Energy Conversion and Management* 47: 570-581. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.05.019>.
13. Prabu, A., and R. B. Anand. 2015. Emission control strategy by adding alumina and cerium oxide nano particle in biodiesel. *Journal of the Energy Institute* 89 (3): 366-372. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.03.003>.
14. Rostami, S., B. Ghobadian, L. Savadkouhi, and R. Ebrahimi. 2010. Experimental investigation effect of injection pressure on performance in a diesel engine using diesel and biodiesel blends. *Journal of Engine Research* 6: 73-82. (In Persian).
15. Said, N. H., F. N. Ani, and M. F. M. Said. 2015. Review of the production of biodiesel from waste cooking oil using solid catalyst. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 8: 1302-1311. DOI: [10.15282/jmes.8.2015.5.0127](https://doi.org/10.15282/jmes.8.2015.5.0127).
16. Taymaz, I. 2003. An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine. *Energy* 31: 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.02.004>.
17. Vellaiyan, S., and K. S. Amirthagadeswaran. 2016. Zinc oxide incorporated water-in-diesel emulsion fuel: Formulation, particle size measurement, and emission characteristics assessment. *Petroleum Science Technology* 34 (2): 114-122. <https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1122621>.
18. Yuksel, F., and M. A. Ceviz. 2002. Thermal balance of a four stroke SI engine operating on hydrogen as a supplementary fuel. *Energy* 28: 1069-1080. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00090-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00090-2).



Investigating the Effect of Output Flow Regulator Plate on the Performance of Flour Cyclone: Experimental Studies and Numerical Simulations

E. Aghaei Badelbou¹, V. Rostampour^{1*}, A. Rezvanivand fanaei¹, A. M. Nikbakht¹

1- Department of Mechanic of Biosystem Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: V.rostampour@urmia.ac.ir)

DOI: [10.22067/jam.2021.67389.1000](https://doi.org/10.22067/jam.2021.67389.1000)

Received: 04-12-2020

Revised: 10-04-2021

Accepted: 14-04-2021

Available Online: 14-04-2021

How to cite this article:

Aghaei Badelbou, E., V. Rostampour, A. Rezvanivand fanaei, and A. M. Nikbakht. 2022. Investigating the Effect of Output Flow Regulator Plate on the Performance of Flour Cyclone: Experimental Studies and Numerical Simulations. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 331-349. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.2021.67389.1000](https://doi.org/10.22067/jam.2021.67389.1000)

Introduction

Cyclone separators use the centrifugal force generated by the gas flow stream to separate the particles from their carrier gas. Simple design, low capital, and easy maintenance make them ideal for use as a valuable pre-refining or sedimentation device. The cause of the particles moving towards the wall and separating from the fluid phase is the centrifugal force created by the rotational flow in a cyclone.

Computational fluid dynamics (CFD) is one of the most well-known and widely used advanced modeling methods used for a variety of applications, including separation processes, thermal processes such as dryers, as well as a wide range of engineering and agricultural applications. The numerical solution of Navier-Stokes equations is the basis of all CFD techniques, which is the result of the rapid progress of computers and a deep understanding of the numerical solution of turbulence phenomena.

Materials and Methods

The measurement system of experimental data includes a cyclone separator, feeder, piping, and fan. Measurements of velocity and pressure were carried out using a hot wire air flow rate, (Model 8465-TSI with a resolution of 0.07 m.s^{-1} and a working range of 0.125 to 150 m.s^{-1}), as well as a differential pressure gauge (CPE310s- KIMO, with an accuracy of 0.1 Pa), respectively. To investigate the effect of the output flow regulator plate on the cyclone performance, five different positions in addition to the base position (zero degree angle or fully open) including angles of 15 , 30 , 45 , 60 , and 75 degrees were evaluated.

The conservation laws governing the various flows and geometries in the CFD include the conservation law of mass, conservation law of momentum, and conservation law of energy.

According to the Mach number value, the pressure base solver was selected. Also, the Reynolds stress model (RSM) was applied to model the flow turbulence. In the discrete phase model (DPM), the fluid phase is solved continuously by solving averaged time equations, while the dispersed phase is calculated by tracing a large number of particles through the flow field.

The boundary conditions used in this study include the inlet velocity boundary condition at the inlet of the cyclone, the outlet pressure boundary condition in the upper and lower outlet sections, and the non-slip wall boundary condition for other surfaces. The particle collision to the wall was also defined as reflective. In the mesh section of the cyclone simulation, five mesh levels were used to check the mesh independence test. The numbers of mesh cells in the five levels were 196810, 283120, 427890, 634940, and 1045290. The selected mesh was 427890 level regarding time consideration.

Results and Discussion

In the first section, the validation of simulation results with experimental results is discussed. The value of the velocity magnitude decreased with increasing the angle of the plate, which is probably due to the reduction of the inlet level as well as the reduction of the exhaust airflow in the cyclone air outlet.

The maximum value of velocity magnitude occurred according to the direction of the air inlet in the cyclone inlet, which is gradually reduced due to the rotational motion inside the cyclone.

The collection efficiency in the cyclone at different levels of regulating plate has values of 85.1% to 95.3% , with maximum collection efficiency at 30° which was 95.3% . The turbulent intensity contours show that turbulence intensity decreases to an angle of 30° , and then reaches an almost constant value for the 30 , 45 , and

60 ° angles.

Conclusion

As the angle of the output current regulator plate increased, the magnitude of velocity decreased significantly.

The separation efficiency showed an increasing-decreasing trend for different values of the regulator plate such that up to a 30° angle of the plate had a positive effect on the separation efficiency.

In general, considering the compromise between separation efficiency and pressure drop as two key parameters affecting the performance of the cyclone, an angle of 30 degrees was selected as the best angle among the studied angles for application.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Pressure drop, Separation efficiency, Turbulent intensity

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۴۹-۳۳۱

بررسی تاثیر صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی بر عملکرد سیکلون آرد: مطالعات تجربی و

شبیه‌سازی عددی

احسان آقایی بدلیو^۱، وحید رستم‌پور^{۲*}، عادل رضوانی‌وند فنائی^۳، علی محمد نیکبخت^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵

چکیده

سیکلون‌ها با توجه به هزینه‌های ساخت و نگهداری نسبتاً پایین و سادگی آن‌ها همواره در صنعت و کشاورزی مورد توجه بوده‌اند. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یکی از ابزارهای توانمند برای پیش‌بینی رفتار در شرایط مختلف است که با حل عددی معادلات ناویر-استوکس درک بهتری از حل عددی در شرایط آشفته‌گی جریان سیال می‌دهد. در این مطالعه تأثیر صفحه تنظیم جریان مکشی در یک سیکلون مورد استفاده در صنعت آرد، بر روی جریان‌های داخلی در داخل سیکلون مورد بررسی قرار گرفته است. از نرم‌افزار گمبیوت و نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۵ به ترتیب برای رسم هندسه مسئله، ایجاد شبکه، اعمال شرایط مرزی و همچنین برای حل معادلات بقا بهره گرفته شد. از مدل آشفته‌گی تنش‌های رینولدز RSM برای شبیه‌سازی آشفته‌گی جریان داخل سیکلون استفاده گردید. لازم به ذکر است که با توجه به رقیق بودن جریان آرد در داخل جریان هوای حامل از مدل فاز گسسته (DPM) برای ردیابی ذرات از طریق میدان جریان استفاده گردیده است. در زوایای صفحه صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه، پارامترهای اندازه سرعت، سرعت محوری، بازده جمع‌آوری، افت فشار، ضریب اصطکاک سطح و همچنین شدت آشفته‌گی با جزئیات استخراج گردیده و در قالب کانتورهای هم‌ارز شده با شاخص یکسان، با یکدیگر مقایسه شدند. علاوه بر این برای درک هرچه بیش‌تر رفتار جریان، کانتورهای مربوط به مسیر حرکت برای سیکلون استخراج گردیدند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن تمامی شرایط، زاویه صفحه تنظیم‌کننده ۳۰ درجه با افت فشار ۱۳۴/۲ پاسکال و بازده جمع‌آوری ۹۵/۳ درصد دارای بهترین شرایط در بین حالت‌های مورد بررسی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: افت فشار، بازده جداسازی، دینامیک سیالات محاسباتی، شدت آشفته‌گی

مقدمه

سیکلون به گونه‌ای است که ذرات درشت‌تر توسط نیروی گریز از مرکز قوی‌تر حرکت کرده و در خروجی پایینی در کف سیکلون جمع می‌شوند. در نقطه مقابل، ذرات ریزتر در جریان سیال باقی مانده و از طریق گردابه‌یاب^۴ از خروجی بالای سیکلون خارج می‌شوند. همواره برای ارزیابی عملکرد یک سیکلون، دو پارامتر بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. پیش‌بینی افت فشار در داخل سیکلون بسیار مهم است، چرا که به‌طور مستقیم با هزینه‌های عملیاتی در ارتباط است. در زمینه بهبود وضعیت کاری سیکلون‌ها و افزایش کارایی این سیستم‌ها تحقیقات متنوعی در مراکز مختلف تحقیقاتی در حال انجام می‌باشد و محققین با اعمال تغییرات مختلفی که در هندسه و پارامترهای طراحی این سیستم‌ها انجام می‌دهند، روز به‌روز به درک عمیق‌تری از عوامل مؤثر بر کارایی و عملکرد سیکلون‌ها دست پیدا می‌کنند. همان‌طوری که بیان شد، از جمله موارد بسیار مهم در عملکرد یک سیکلون، بازده جداسازی آن است

عملیات جداسازی در صنعت و کشاورزی همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. سیکلون‌های جداکننده از نیروی گریز از مرکز تولید شده از جریان گاز رشته‌ای برای جداسازی ذرات از گاز حامل آن‌ها استفاده می‌کنند. طراحی ساده، سرمایه‌ی کم و تعمیر و نگهداری آسان، آن‌ها را برای استفاده به‌عنوان یک دستگاه با ارزش پیش پالایش یا ته‌نشین‌کننده ایده‌آل کرده است. عامل ایجاد حرکت ذرات به سمت دیواره و جدا شدن از فاز سیال، نیروی گریز از مرکز ایجاد شده توسط جریان چرخشی در یک سیکلون می‌باشد. طریق کار

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه،

ایران

۲- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: V.rostampour@urmia.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.2021.67389.1000

4- Vortex finder

که سایر موارد مهم را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد و به‌صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{E_i - E_e}{E_i} \times 100 \quad (1)$$

که در آن E_i ذرات جامد در ورودی و E_e ذرات آرد در خروجی سیکلون هستند. محاسبات بر اساس کنترل مقدار ورودی و خروجی ذرات جامد می‌باشد.

دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۱ یکی از شناخته‌شده‌ترین و گسترده‌ترین روش مدل‌سازی پیشرفته است که برای انواع کاربردها از جمله انواع فرآیندهای جداسازی، فرآیندهای حرارتی مانند انواع خشک‌کن‌ها و همچنین طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حل عددی معادلات ناویر-استوکس^۲ اساس تمام تکنیک‌های CFD می‌باشد که نتیجه پیشرفت سریع رایانه‌ها و درک بهتر از حل عددی آشفتگی است. با توسعه به این پیشرفت سریع CFD، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش‌بینی عملکرد سیکلون توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است. معادلات بقای جرم، مومنتوم (اندازه حرکت) و انرژی در جریان‌های سیال در عبارات‌های معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیان می‌شود که راه‌حل را با روش‌های تحلیلی ارائه می‌دهد (ANSYS Fluent theory guide, 2013). لازم به ذکر است که برای انجام حل عددی به روش CFD در نرم‌افزار انسیس فلوئنت، به شبکه ایجادشده در یکی از نرم‌افزارهای ایجاد شبکه نیاز است.

مطالعات انجام گرفته در مورد سیکلون‌های جداکننده، تأثیر ابعاد مختلف سیکلون بر بازده جمع‌آوری، افت فشار، ویژگی‌های جریان‌های داخلی و همچنین بحث‌های مربوط به سایش بدنه سیکلون را شامل می‌شود. از اولین کارهای انجام گرفته در این حوزه شامل مطالعه‌ای با موضوع مدل‌سازی تجربی و عددی عملکرد یک سیکلون است (Griffiths and Boysan, 1996). در یک مطالعه تجربی، اثرات طول سیکلون بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، نشان داده شده که با افزایش طول سیکلون (تا ۵/۵ برابر قطر سیکلون)، عملکرد سیکلون به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد (Hoffmann et al., 2001). در ادامه گیمبون و همکاران (Gimbun et al., 2005a) مطالعه دیگری در زمینه مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی بر بازده جمع‌آوری سیکلون و مباحث مربوط به عملکرد سیکلون انجام دادند. همچنین مطالعه‌ای بر تأثیر

قطر نوک مخروط سیکلون بر افت فشار و عملکرد سیکلون‌ها انجام شد و نتیجه گرفته شد که زمانی که قطر نوک مخروط کاهش می‌یابد، افت فشار کل و عملکرد سیکلون افزایش می‌یابد (Gimbun et al., 2005b).

در مطالعه دیگری عملکرد سیکلون‌های تک ورودی رایج با سیکلون‌هایی دارای دو ورودی مقایسه شد و برای حالت با دو ورودی افزایش عملکرد از نظر افزایش بازده جداسازی به‌دست آمد (Zhao et al., 2006). از نقطه نظر تأثیر بهینه‌سازی بر سیکلون‌ها، بهینه‌سازی هندسه سیکلون جداکننده، برای افزایش عملکرد سیکلون از طریق کمینه کردن افت فشار و بالابردن بازده جداسازی، با استفاده از مدل‌های ریاضیاتی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته است (Elsayed and Lacor, 2010). همچنین رضوانی‌وند فنائی و نیکبخت (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015) در قالب یک مطالعه عددی، تأثیر قطر ذرات خوراک بر اندازه سرعت و افت فشار در داخل یک سیکلون جداکننده را مورد بررسی قرار دادند. ال احمدی و نواکوفسکی (Alahmadi and Nowakowski, 2016) یک رویکرد شبیه‌سازی عددی با استفاده از یک مدل تلاطم ویسکوزیته گردابی پیشنهاد کردند که اثرات انحنای ساده و چرخش را حساب می‌کند. در این رویکرد، مدل آشفتگی تنش برشی انتقالی (SST) با استفاده از عدد ریچاردسون محاسبه شده برای اثرات چرخش و انحنای اصلاح شد. پیش‌بینی‌های عددی با استفاده از نتایج تجربی اعتبارسنجی شده و با داده‌های به‌دست آمده از سایر مدل‌ها مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل تنش‌های رینولدز از نظر دقت و همچنین هزینه محاسباتی، عملکرد بهتری دارد.

مازیان و همکاران (Mazyan et al., 2018) مطالعه‌ای در مورد افزایش عملکرد جداسازی ذرات جامد سیکلون بر اساس اصلاح هندسی سیکلون و با اضافه کردن یک محفظه مماسی به بخش مخروطی سیکلون انجام دادند و دریافتند که افزایش سرعت ورودی بازده جداسازی را افزایش می‌دهد و برای طراحی با یک محفظه مماسی افزایش سرعت ورودی از 14 m.s^{-1} به 20 m.s^{-1} باعث افزایش بازده جداسازی می‌شود. نعیمی و همکاران (Naimi et al., 2019) در مطالعه دیگری به‌صورت تجربی و عددی، جداسازی گندم با استفاده از سیکلون استرماند بازده بالا را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها که در ۶ سرعت مختلف ورودی مواد (۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر بر ثانیه) و همچنین ۳ دبی جرمی مختلف (۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ کیلوگرم بر ثانیه) انجام شد، مشخصات داخل سیکلون از جمله بازده جداسازی، افت فشار، میدان سرعت، پارامترهای آشفتگی و سایش به‌صورت کامل مورد بررسی قرار گرفت و سرعت ۱۶ متر بر ثانیه به‌عنوان بهترین سرعت ورودی انتخاب شد. در یک طرح

توسط اهرم مربوطه ایجاد گردید و پارامترهای سرعت و فشار در این ۶ وضعیت اندازه گیری شد. از مقادیر اندازه گیری سرعت در زوایای صفحه مختلف برای اعمال شرایط مرزی مربوط به شبیه سازی ها استفاده گردید. شکل ۲ به همراه جدول ۱ به ترتیب شماتیکی از سیکلون مورد استفاده در آزمایش ها را به همراه اندازه های بخش های مختلف آن نشان می دهند.

مدل عددی و معادلات حاکم

قوانین حاکم بر جریان ها و هندسه های مختلف در CFD، قانون بقای جرم، قانون بقای تکانه و قانون بقای انرژی را شامل می گردد. در این مطالعه، قوانین بقا برای جریان داخلی هم دم حل گردید. معادلات بقای جرم و مومنوم در حالت کلی به صورت زیر بیان می شوند (ANSYS Fluent theory guide, 2013):

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

که S_m جرم اضافه شده به فاز پیوسته، p فشار استاتیک، $\rho \vec{g}$ نیروی حجمی جاذبه، $\vec{F}$ نیروی حجمی خارجی، $\bar{\tau}$ تانسور تنش است و از طریق رابطه (۴) به دست می آید:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4)$$

که μ ویسکوزیته مولکولی، I تانسور واحد و عبارت دوم در طرف راست اثر اتساع حجم است.

انتخاب نوع حلگر

از موارد مهم در یک شبیه سازی انتخاب حلگر مناسب می باشد. انتخاب نوع حلگر در نرم افزار انسیس فلوئنت به عدد بی بعد ماخ^۲ بستگی دارد. طبق تعریف، عدد ماخ به صورت سرعت یک جسم به سرعت صوت تعریف می گردد. عدد ماخ بزرگ تر از ۰/۳ نشان دهنده یک محیط تراکم پذیر و عدد ماخ کمتر یا برابر ۰/۳ نشان دهنده یک محیط تراکم ناپذیر است. با توجه به شرایط حل، برای محیط های تراکم پذیر از حلگر بر پایه چگالی^۳ و برای محیط های تراکم ناپذیر از حلگر بر پایه فشار^۴ استفاده می گردد. با در نظر گرفتن سرعت جریان ورودی به سیکلون و همچنین عدد ماخ پایین جریان، از حلگر بر پایه فشار بهره برده شده است.

نوآورانه، اثر تیغه منحرف کننده جریان بر ویژگی های جریان در یک سامانه ثقیل جداسازی نخود به صورت تجربی و شبیه سازی عددی مطالعه گردید. برای مدل سازی آشفتگی های داخل محفظه ته نشینی از مدل k-ε استاندارد استفاده گردید. بررسی ها نشان داد که مدل آشفته k-ε استاندارد، از توانایی بالایی برای شبیه سازی جریان های آشفته در جدا کننده های ثقیل برخوردار است استفاده از این تیغه باعث افزایش ۱۱/۴ درصدی بازده ته نشینی و همچنین کاهش ۶/۶۷ درصدی جریان هوای مورد نیاز در سیستم و کاهش میزان سایش شد (Zobeiri et al., 2019).

تمرکز اصلی مطالعات انجام گرفته در زمینه سیکلون ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر روی پارامترهای ورودی و هندسی مختلف از جمله سرعت و دبی، تأثیر ابعاد ورودی، ارتفاع بخش های مختلف سیکلون، قطر بخش استوانه ای، قطر بخش خارجی، وضعیت های مختلف قرارگیری گردابه یاب، و ارائه ی روش های بهینه سازی برای کمینه کردن افت فشار متمرکز شده است. طبق بررسی های انجام شده تاکنون مطالعه ای در مورد تأثیر صفحه تنظیم کننده جریان خروجی بر فعل و انفعالات اتفاق افتاده در داخل سیکلون، افت فشار، بازده جمع آوری و همچنین پارامترهای آشفتگی و غیره انجام نشده است.

بنابراین هدف از پژوهش حاضر به دست آوردن تأثیر زوایای مختلف صفحه خروجی جریان گاز بر پارامترهای عملکردی سیکلون از جمله افت فشار، بازده جمع آوری و همچنین به دست آوردن بهترین زاویه صفحه خروجی به منظور حصول بالاترین بازده جداسازی و کمترین افت فشار در جهت ایجاد مصالحه بین این دو کمیت اساسی (افت فشار و بازده جمع آوری) در بررسی عملکرد سیکلون است.

مواد و روش ها

برای به دست آوردن داده های تجربی به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی حاصل از شبیه سازی، از سیستم نشان داده شده در شکل ۱ استفاده گردید. این سیستم شامل سیکلون جدا کننده استرماند، تغذیه کننده مواد، لوله های پایپینگ^۱ و فن می باشد. اندازه گیری های سرعت و فشار به ترتیب با استفاده از یک سرعت سنج هوای سیم داغ (مدل TSI-8465 با رزولوشن 0.07 m.s^{-1} و محدوده کاری 0.125 تا 50 m.s^{-1}) و همچنین یک اختلاف فشارسنج (مدل CPE310s-KIMO، با دقت 0.1 پاسکال) انجام گرفت. برای بررسی اثر صفحه تنظیم کننده جریان خروجی بر عملکرد سیکلون و مطالعه الگوی جریان در داخل آن، ۵ وضعیت مختلف علاوه بر حالت پایه (زاویه صفر درجه یا کاملاً باز) شامل زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه

2- Mach Number

3- Density based

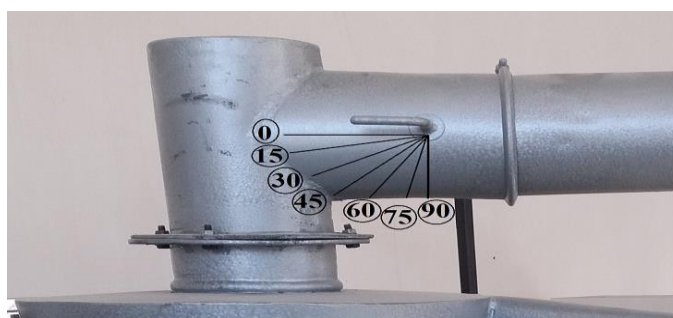
4- Pressure based

1- Piping tubes



شکل ۱- الف - سیکلون استرماند استفاده شده

Fig.1. a. Stairmand Cyclone used



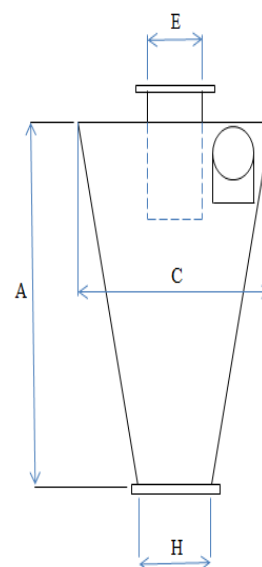
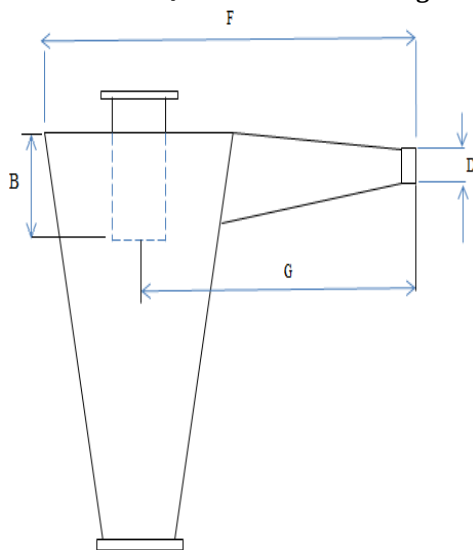
شکل ۱- ب - زوایای مختلف برای صفحه تنظیم جریان مکشی

Fig.1. b. Various angles for suction flow alignment



شکل ۱- پ - موقعیت قرارگیری صفحه داخل لوله قسمت خروجی

Fig.1. c. Location of alignment plate inside the outlet pipe



شکل ۲ - سیکلون مورد استفاده

Fig.2. Cyclone used

جدول ۱ - اندازه‌های بخش‌های مختلف سیکلون

Table 1- Values of different parts of cyclone

پارامترها Parameters	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)
اندازه Value (cm)	75	18	34	5.6	12	65	48	13.5

مدل سازی آشفتگی

مدل آشفتگی به منظور مدل کردن آشفتگی های داخل جریان آشفته مورد استفاده قرار می گیرد. محدودیت های مسئله و شرایط خاص آن در انتخاب مدل آشفتگی مناسب حایز اهمیت بسیاری است. در پژوهش حاضر از مدل آشفتگی تنش های رینولدز (RSM^1) که تنش های آیزنتروپیک^۲ آشفته را در نظر می گیرد، استفاده شد. مدل RSM به صورت رابطه (۵) بیان می گردد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u_i' u_j'}) = D_{ij} + P_{ij} + \prod_{ij} + \varepsilon_{ij} + S \quad (5)$$

که دو عبارت سمت چپ به ترتیب مشتق زمانی محلی و عبارت انتقال همرفتی هستند. دیفیوژن تنش به صورت رابطه (۶) مدل می گردد:

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + (\overline{p u_i'}) \delta_{jk} + (\overline{p u_j'}) \delta_{ik} - \mu \left(\frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i' u_j'} \right) \right] \quad (6)$$

در این رابطه، عبارت تولید تنش به صورت رابطه (۷) بیان می گردد:

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] \quad (7)$$

عبارت کرنش فشار به صورت رابطه (۸) مدل می گردد:

$$\prod_{ij} = p \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

عبارت تلفات به صورت آیزنتروپیک و به صورت رابطه (۹) فرض می گردد.

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \quad (9)$$

و در انتها S که عبارت چشمه یا منبع است.

مدل فاز گسسته^۳ (DPM)

در مدل فاز گسسته (مدل چندفازی رویکرد لاگرانژی^۴) فاز سیال با حل معادلات میانگین گیری شده زمانی به صورت پیوسته حل می شود، در حالی که فاز پراکنده با ردیابی تعداد زیادی از ذرات از طریق میدان جریان محاسبه می گردد. فاز پراکنده قابلیت این را دارد که جرم، مومنتوم و انرژی را با فاز سیال تبادل نماید.

یک فرض اساسی موجود در این رویکرد این است که فاز دوم پراکنده یک کسر حجمی پایین (معمولاً کمتر از ۱۲ درصد، که درصد حجمی نسبت بین حجم کل ذرات و حجم ناحیه سیال است) می باشد. مسیرهای ذرات به صورت جداگانه در فواصل مشخص شده در محاسبه فاز سیال محاسبه می شوند. لازم به ذکر است که برای مدل سازی جریان های ذره ای مناسب است. برای مدل سازی سیکلون های با بارگذاری شدید، تعاملات ذره با ذره و آشفتگی ذرات باید در نظر گرفته شود. از نظر رویکرد لاگرانژی، معادله حرکت ذره در راستای i توسط رابطه های (۱۰) و (۱۱) بیان می گردد (ANSYS Fluent theory guide, 2013):

$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} C_d \frac{Re_p}{24} (u_i - u_{pi}) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (10)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (11)$$

که عبارت $F_k = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} C_d \frac{Re_p}{24}$ برابر با نیروی درگ بر واحد جرم ذره، ρ چگالی گاز ($kg.m^{-3}$) و μ ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s) هستند، همچنین C_d ضریب درگ، u_i و u_{pi} به ترتیب سرعت گاز و ذره ($m.s^{-1}$) در راستای i می باشند. g_i شتاب جاذبه در راستای i و Re_p عدد رینولدز نسبی است که به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود:

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_g - u_p|}{\mu} \quad (12)$$

ضریب درگ^۵ برای ذرات کروی با استفاده از همبستگی های توسعه یافته محاسبه می گردد. معادله حرکت برای ذرات در امتداد مسیر یک ذره منفرد انتگرال گیری می گردد. همچنین برخوردهای بین ذرات و دیواره های سیکلون به صورت الاستیک کامل فرض می گردد. فاز پیوسته شامل هوا با چگالی $1.225 kg.m^{-3}$ ، ویسکوزیته دینامیکی $1.8 \times 10^{-5} Pa.s$ و فاز گسسته شامل ذرات آرد می باشد. لازم به ذکر است که بازده جمع آوری با رها کردن تعداد مشخصی از ذرات گسسته از ورودی سیکلون و نظارت بر تعداد خارج شده از طریق خروجی پایینی حاصل می شود. طبق دسته بندی گلدارت ذرات جامد آرد با توجه به متوسط قطر (۱۰۰ میکرومتر) در دسته B قرار می گیرد.

شرایط مرزی مورد استفاده

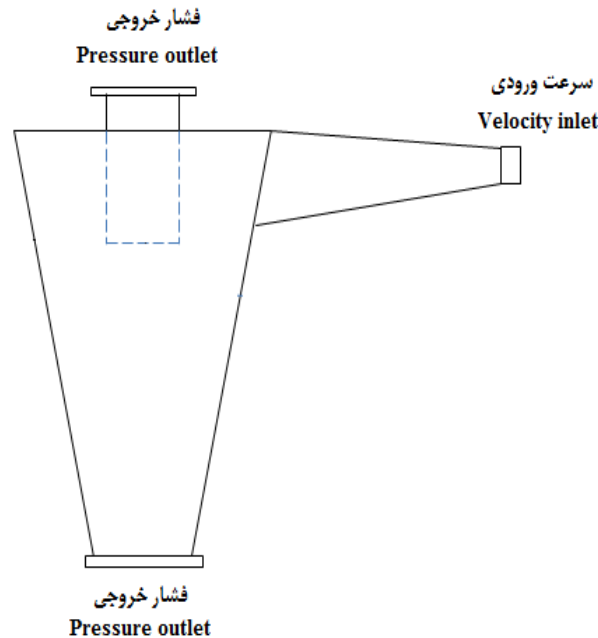
شرایط مرزی استفاده شده در این مطالعه، شامل شرط مرزی سرعت در ورودی سیکلون، شرط مرزی فشار خروجی در دو بخش خروجی بالا و پایین و شرط مرزی دیواره بدون لغزش برای سایر

- 1- Reynolds Stress Model
- 2- Isentropic
- 3- Discrete Phase Model
- 4- Lagrangian approach

5- Drag coefficient

دارای اهمیت زیادی برای حل صحیح مسئله می‌باشد. شرایط مرزی مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است.

سطوح است. همچنین برخورد ذرات به دیواره به صورت بازگشتی تعریف گردید. نوع شرایط مرزی و همچنین مقادیر آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که تعریف بهترین نوع شرط مرزی



شکل ۳- شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی

Fig. 3. Boundary condition used in simulation

۴۲۷۸۹۰ عدد و ۶۳۴۹۴۰ عدد شبکه) کمتر از ۲٪ بود. بنابراین، برای صرفه‌جویی‌های زمانی در حل، شبکه با تعداد ۴۲۷۸۹۰ عدد به عنوان شبکه پایه در این مطالعه استفاده گردید.

شبکه‌بندی (مش‌بندی) انجام شده سیکلون به کمک نرم‌افزار گمبیت ۲،۴۶ انجام شد که شمایکی از آن در شکل ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است، برای شبکه‌بندی هندسه از شبکه‌بندی ترکیبی با سازمان استفاده شد، همچنین مقادیر مربوط به کیفیت مش در جدول ۳ ارائه شده است.

مسئله به صورت پایا حل شد. با توجه به این که نمودار باقی‌مانده مربوط به پیوستگی بعد از شروع حل و با مقدار پیش‌فرض (مقدار ضریب ۱) دارای نوسان بود، لذا برای کاهش نوسانات، ضریب مربوط به چگالی به ۰/۸ کاهش یافته و نمودار باقی‌مانده پیوستگی به زیر معیار همگرایی یعنی 10^{-4} رسید. از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم پیشرو استفاده شد. همچنین کوپلینگ سرعت و فشار با استفاده از اسکیم SIMPLE^۱ انجام گرفت. لازم به ذکر است که برای شبیه‌سازی‌ها از یک رایانه با پردازشگر Intel core i5 و حافظه رم ۱۶ مگابایت استفاده گردید.

جدول ۲- شرایط مرزی

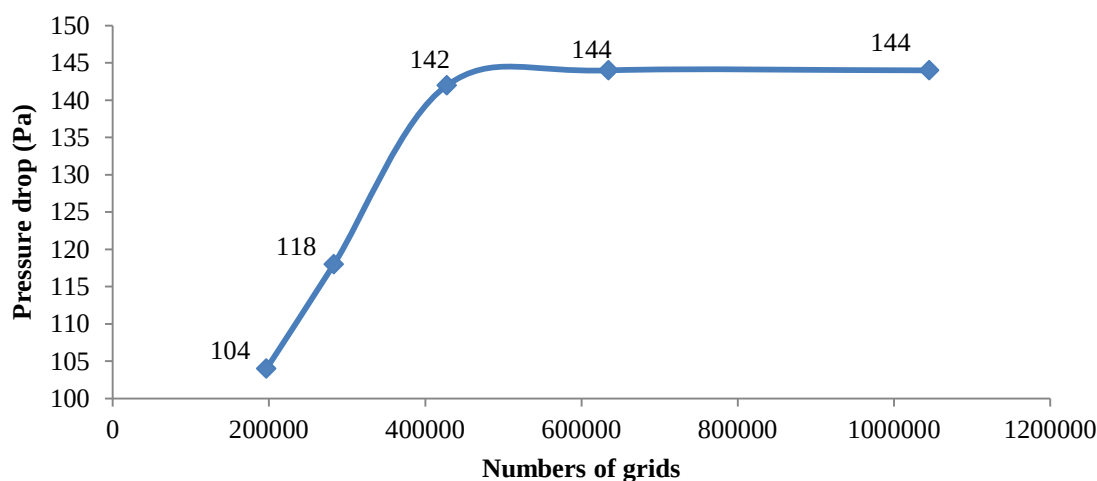
Table 2- Boundary conditions

نوع شرط مرزی	مقدار یا حالت
Type of boundary condition	Value/ Condition
سرعت ورودی	10 m.s ⁻¹
Inlet velocity	
فشار خروجی	فشار اتمسفر
Outlet pressure	Atmospheric pressure
دیواره	شرایط بدون لغزش
Wall	No slip condition

آزمون استقلال از شبکه

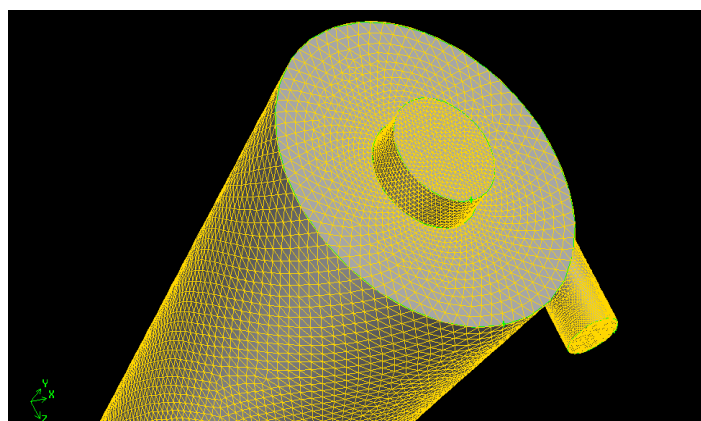
در بخش مربوط به ایجاد شبکه مدل هندسی برای شبیه‌سازی سیکلون از پنج سطح شبکه برای آزمون استقلال شبکه بهره گرفته شد. تعداد سلول‌های شبکه در پنج سطح ۱۹۶۸۱۰، ۲۸۳۱۲۰، ۴۲۷۸۹۰، ۶۳۴۹۴۰ و ۱۰۴۵۲۹۰ عدد بودند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد (شکل ۴) که تفاوت بین افت فشار بین ورودی گاز و خروجی گردآبیاب در بین سطوح شبکه‌بندی سوم و چهارم (به ترتیب

1- Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation



شکل ۴- آزمون استقلال از شبکه

Fig. 4. Mesh independency test



شکل ۵- شبکه بندی سیکلون در نرم افزار گمبیت ۲،۴،۶

Fig.5. Meshing of cyclone in Gambit 2.4.6

جدول ۳- مقادیر کیفیت شبکه

Table 3- Mesh quality values

مقدار	پارامتر کیفیت
Value	Quality parameter
4.94	Maximum aspect ratio
0.84	Minimum Orthogonal Quality
0.19	Maximum Orthogonal Skewness

نتایج و بحث

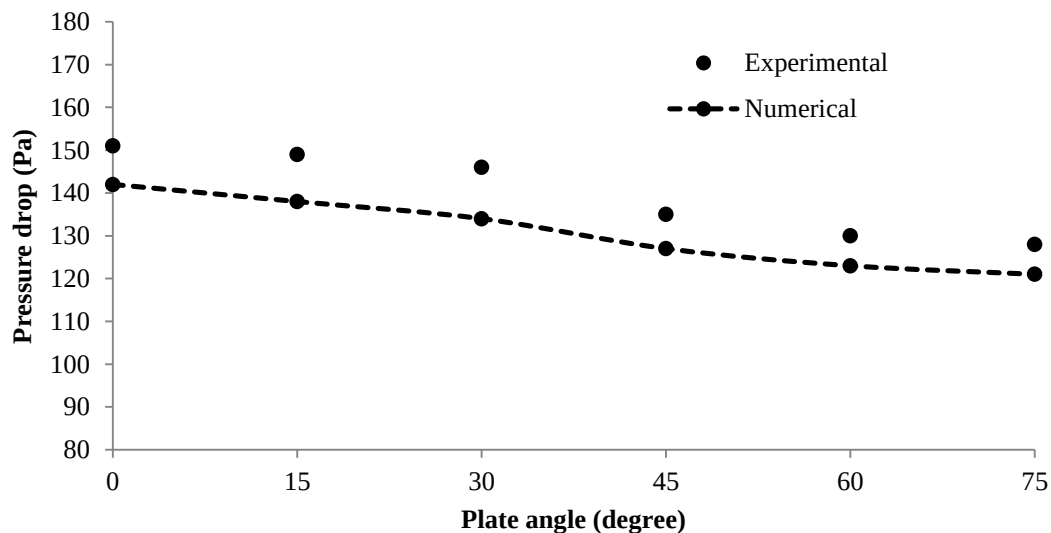
در این بخش، ابتدا به اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی با استفاده از نتایج تجربی حاصل پرداخته می شود. سپس در ادامه نتایج مربوط به اندازه سرعت، سرعت محوری، بازده جمع آوری و افت فشار بحث می گردند و در نهایت کانتورهای خط مسیر، شدت آشفته گی و ضریب اصطکاک به عنوان پارامترهای با اهمیت در یک سیکلون جداکننده

مورد مطالعه می گیرند. به منظور درک کامل از فرآیند انجام گرفته در هر بخش، برشی از مقطع داخل سیکلون توسط یک صفحه هم به صورت عمودی و هم به صورت افقی و در کنار همدیگر آورده شده است.

اعتبارسنجی

شبیه‌سازی‌های CFD به منظور قابل اعتماد بودن بایستی اعتبارسنجی شوند. برای این منظور از داده‌های مربوط به افت فشار در زوایای مختلف صفحه استفاده گردید. مقادیر افت فشار اندازه‌گیری

شده به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در یک سیکلون در زاویه‌های مختلف صفحه از تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخوردار بودند که این تطابق در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- اعتبارسنجی نتایج تجربی و عددی

Fig.6. Validation of experimental and numerical results

مشخص است، تغییرات صفحه تأثیر چندانی بر روی الگوی سرعت محوری و همچنان مقادیر آن نداشته است. دلیل این امر را می‌توان به ماهیت سرعت محوری ارتباط داد، چرا که با تغییر زاویه پره بر الگوی محوری جریان اثر چندانی حاصل نمی‌شود. بعد از گردابه‌یاب و تا نزدیکی‌های انتهای بخش مخروطی سرعت محوری دارای روند کاهشی است.

در کار سایر محققین نیز میدان سرعت از موارد حائز اهمیت جهت گزارش عملکرد سیکلون بوده است. مازیان و همکاران (Mazyan et al., 2018) روند تغییرات سرعت داخل سیکلون جداکننده را به ازای تعداد مختلف محفظه‌های مماسی مورد بررسی قرار دادند. در کار آنها افزایش تعداد محفظه مماسی سبب کاهش بیشینه مقدار سرعت شد.

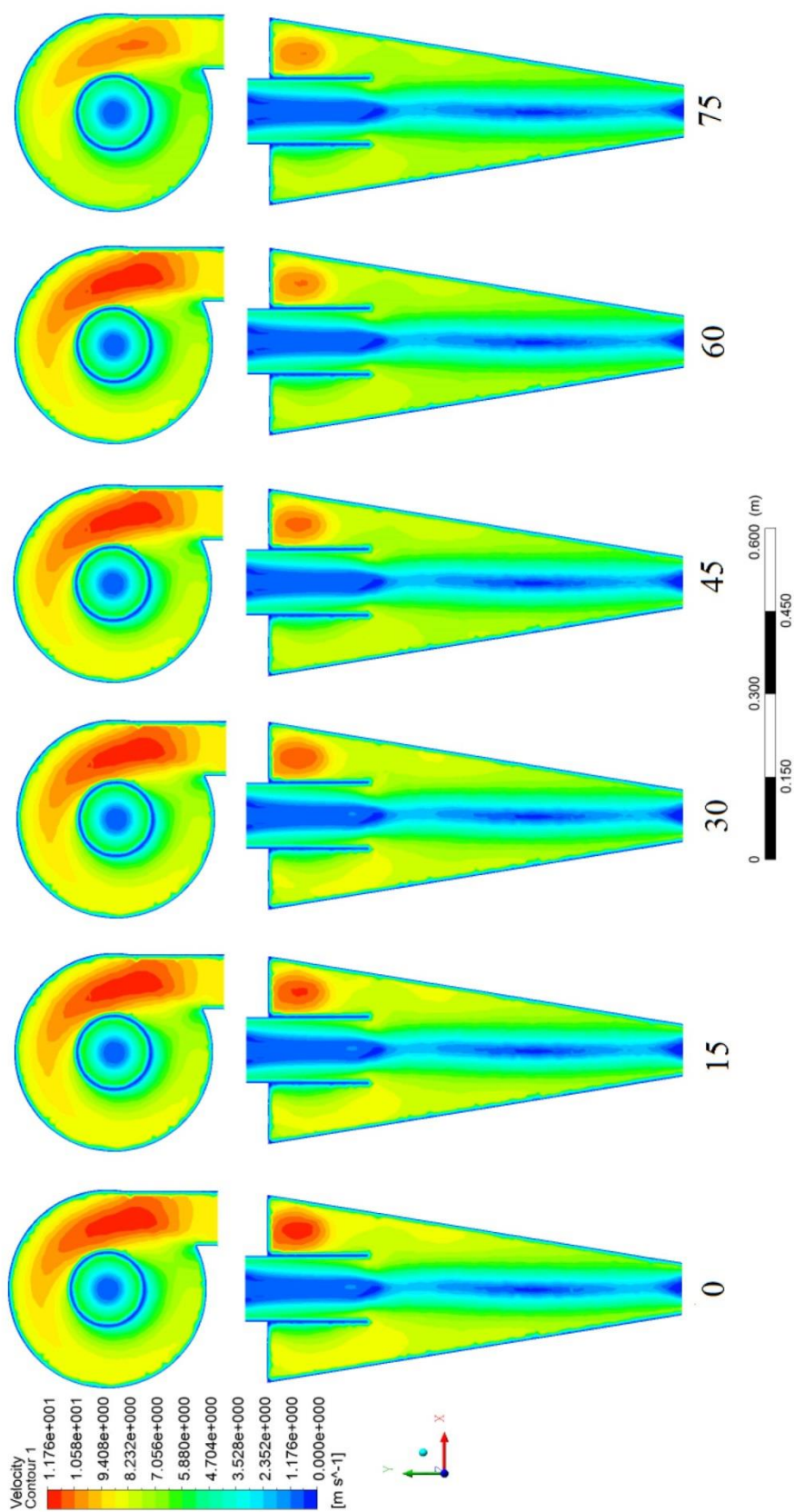
بازده جمع‌آوری

همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، بازده جمع‌آوری در سیکلون در سطوح مختلف زاویه صفحه خروجی دارای مقادیر ۸۵/۱ درصد تا ۹۵/۳ درصد می‌باشد که بیشینه بازده جمع‌آوری برای زاویه صفحه ۳۰ درجه (۹۵/۳ درصد) و کمینه بازده جمع‌آوری برای زاویه صفحه ۷۵ درجه (۸۵/۱ درصد) به دست آمد.

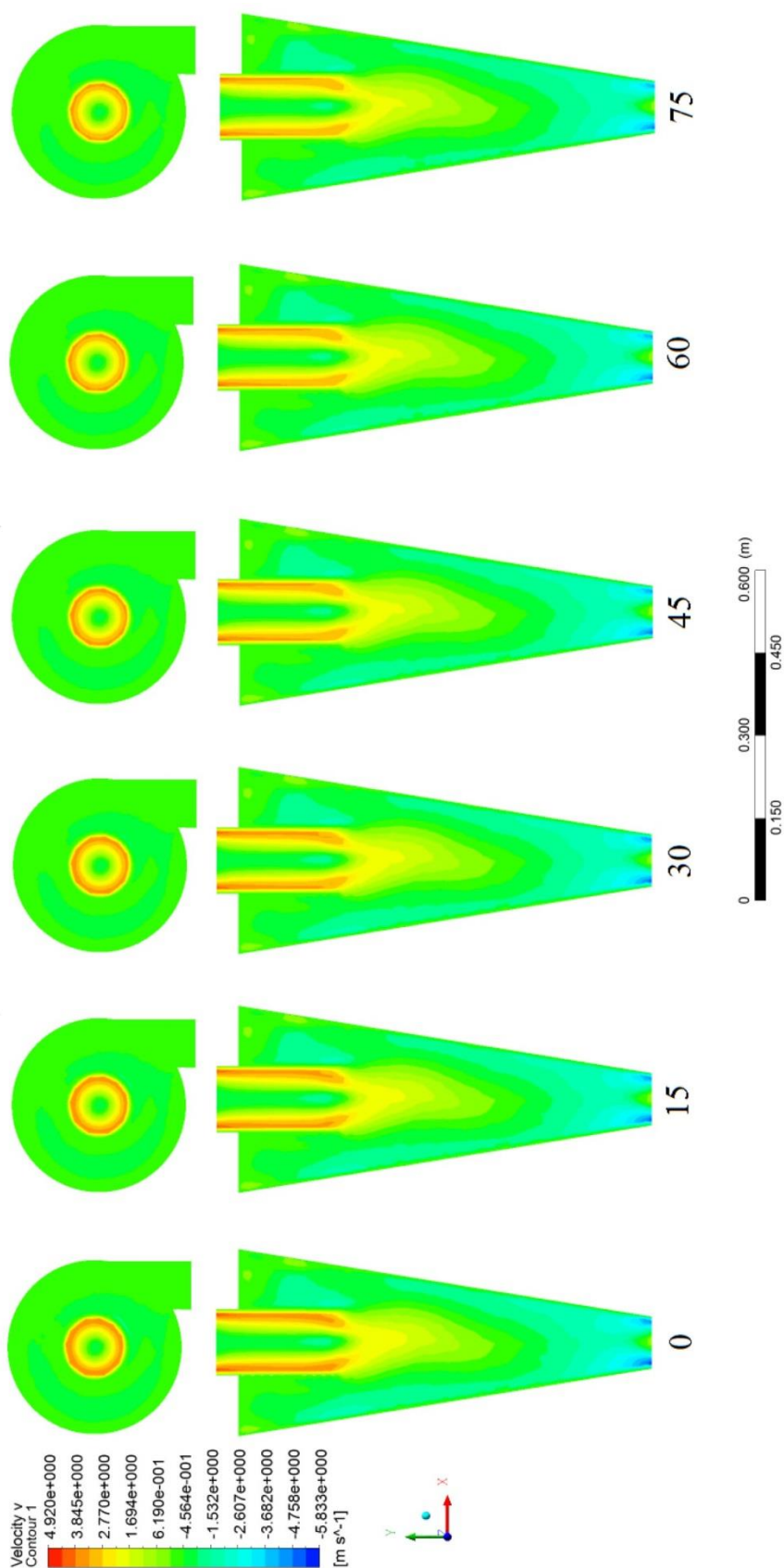
کانتورهای اندازه سرعت و سرعت محوری

کانتورهای اندازه سرعت به ازای زوایای مختلف صفحه در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، مقدار اندازه سرعت با افزایش زاویه صفحه، روند کاهشی به خود گرفته است که احتمالاً به دلیل کاهش سطح خروجی و به تبع آن کاهش دبی هوای خروجی در بخش خروجی هوای سیکلون است که به این صورت خود را نشان داده است. بیش‌ترین مقدار اندازه سرعت ($11/76 \text{ m.s}^{-1}$) با توجه به جهت ورودی هوا در ورودی سیکلون ایجاد شده است که رفته‌رفته و با توجه به حرکت چرخشی داخل سیکلون از مقدار آن کاسته شده است. همچنین کم‌ترین مقدار اندازه سرعت محوری به بخش وسط سیکلون و مناطقی که در آن فشار منفی ایجاد می‌گردد تعلق دارد. در کل با توجه به نوع جریان‌یابی مواد در داخل سیکلون، مقدار اندازه سرعت در نزدیکی دیواره‌ها نسبتاً مقدار بالایی داشته و با نزدیک شدن به مرکز سیکلون از مقدار آن کاسته شده است. برش‌های افقی سیکلون که دید از بالا را نشان می‌دهند، به خوبی تأثیر بالای زاویه صفحه را بر مقدار و دامنه اندازه سرعت نشان می‌دهد.

در زمینه سرعت محوری و با توجه به ماهیت آن مسئله متفاوت است. بیش‌ترین مقدار سرعت محوری با مقدار $11/76 \text{ m.s}^{-1}$ به مناطق نزدیک گردابه‌یاب تعلق دارد. همان‌طوری که از شکل ۸



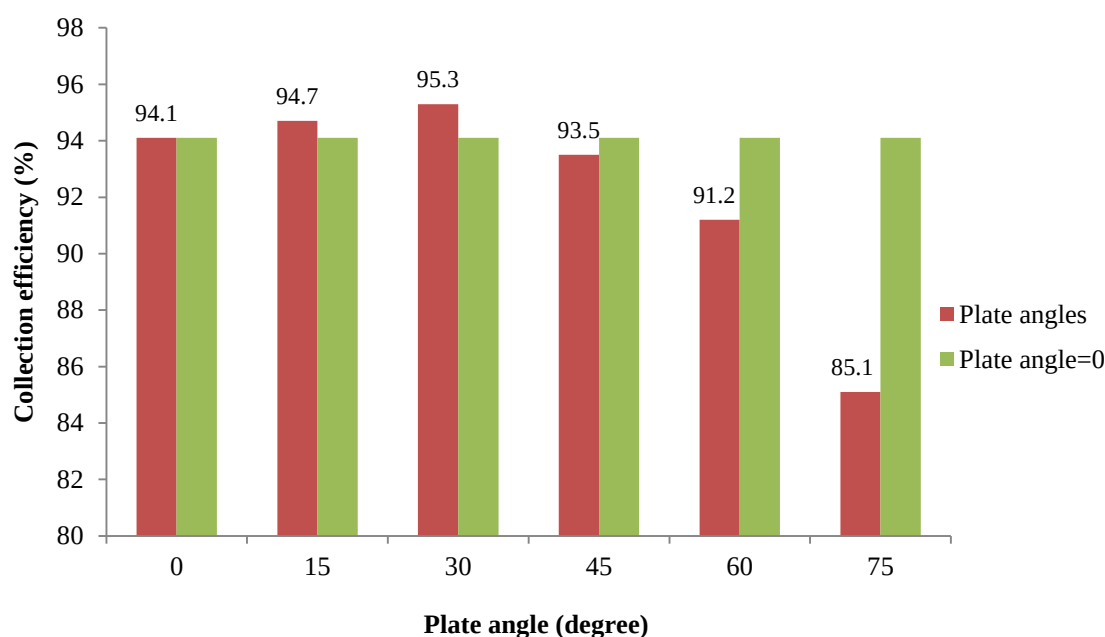
شکل ۷- کانتور اندازه سرعت در زوایای مختلف صفحه تنظیم کننده
Fig.7. Velocity magnitude contour in various angles of regulator plate



شکل ۸- کانتور سرعت محوری در زوایای مختلف صفحه تنظیم کننده
Fig.8. Axial velocity contour in various angles of regulator plate

سیکلون است. بعد از زاویه ۳۰ درجه به علت ایجاد مانع برای گذر هوای خروجی بازده جمع آوری کاهش یافته و در زوایای بیشتر (۶۰ و ۷۵ درجه) افت محسوسی را نشان می دهد. در زمینه کارهای انجام گرفته و مرتبط با مطالعه بازده جداسازی، در پژوهش انجام شده توسط الساید و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده شد که با افزایش قطر ذرات از محدوده ۰/۱ تا ۱۰ میکرون بازده جداسازی افزایش قابل توجهی را از خود نشان می دهد (Elsayed and Lacor, 2011).

به منظور مقایسه بازده هر حالت (ستون رنگ قرمز) با حالت پایه (ستون با رنگ سبز)، مقدار بازده حالت پایه در قالب ستون در کنار حالت مورد بررسی به ازای زوایای مختلف صفحه ارائه شده است. روند افزایشی - کاهشی بازه جمع آوری، بر اساس زوایای مختلف صفحه تنظیم کننده، به علت زاویه خاص در بخش خروجی می باشد. در زاویه ۳۰ درجه، بهترین حالت نیروی گریز از مرکز مورد نیاز برای جریان چرخشی ایجاد شده است. چرا که، بازده جمع آوری در ارتباط مستقیم با نیروی گریز از مرکز ایجاد شده در بخش گردابه یاب



شکل ۹- مقایسه بازده جمع آوری در زوایای مختلف صفحه تنظیم کننده با حالت بدون زاویه (زاویه صفر)

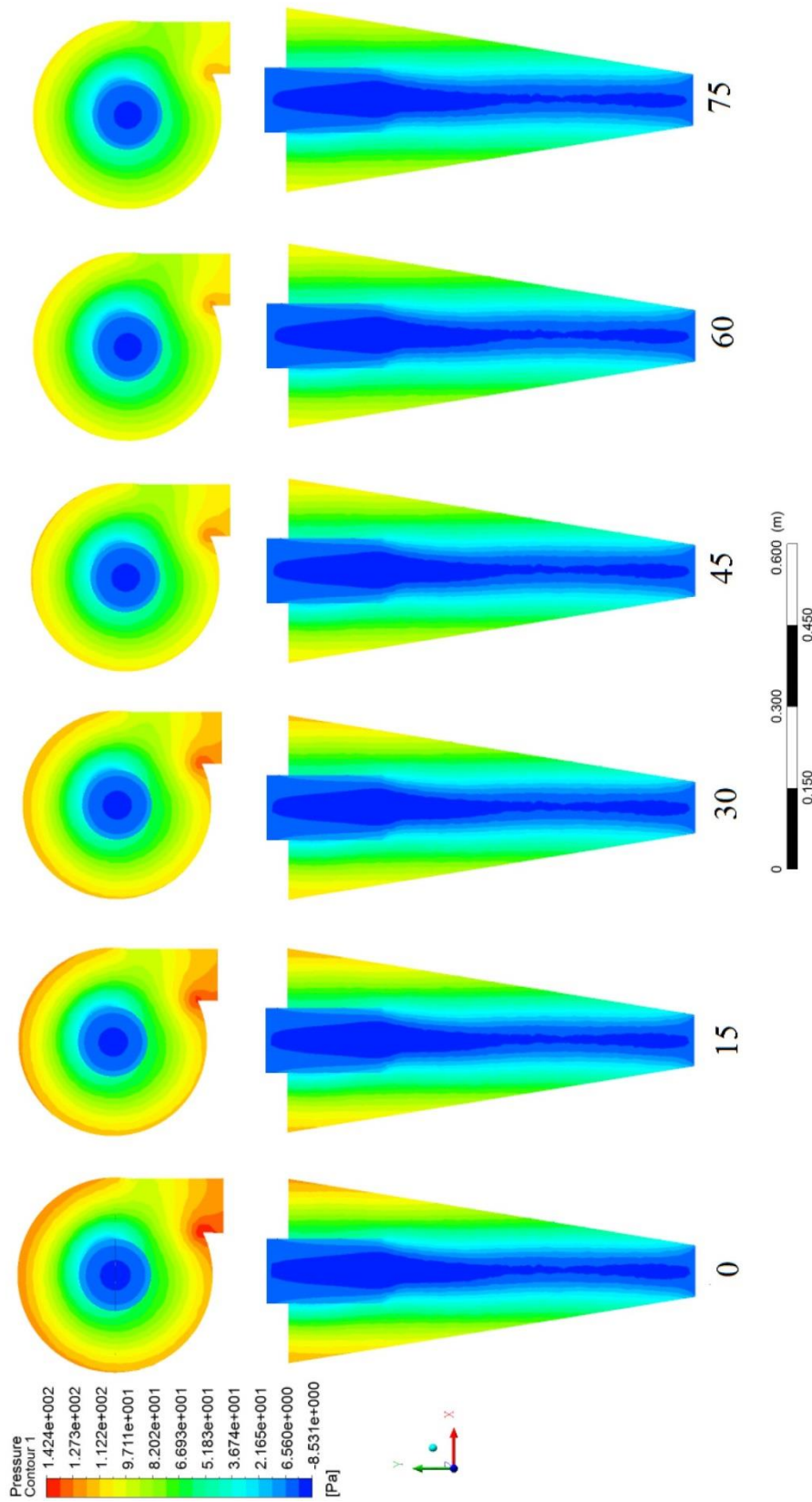
Fig.9. A comparison of collection Efficiency in regulator plate angles with zero angle situations

حالت ۳۰ درجه با توجه به بازده عملکردی ۹۵/۳ درصد (بهترین حالت) و افت فشار ۱۲۶ پاسکال (جزو حالت های با افت فشار کم) به عنوان بهترین سطح از نظر عملکرد انتخاب گردید. در سایر کارهای انجام شده تغییرات انجام شده بر روی متغیرهای ورودی و یا هندسه سیکلون سبب افزایش یا کاهش افت فشار شده است. به عنوان مثال در کار انجام گرفته توسط رضوانی وند فنائی و نیکبخت (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015) افزایش قطر ذرات خوراک سبب افزایش افت فشار داخل سیکلون شده است. همچنین در تحقیق دیگری که توسط نعیمی و همکاران (Naimi et al., 2019) انجام شده است، افزایش سرعت ورودی رژیم جریان، سبب افزایش افت فشار شده است که مقدار افزایش افت فشار در سرعت های بالاتر بیشتر گزارش شده است. روند افزایش افت فشار به ازای افزایش سرعت ورودی در کار گیمبون و همکاران (Gimbun et al., 2005) نیز گزارش شده است.

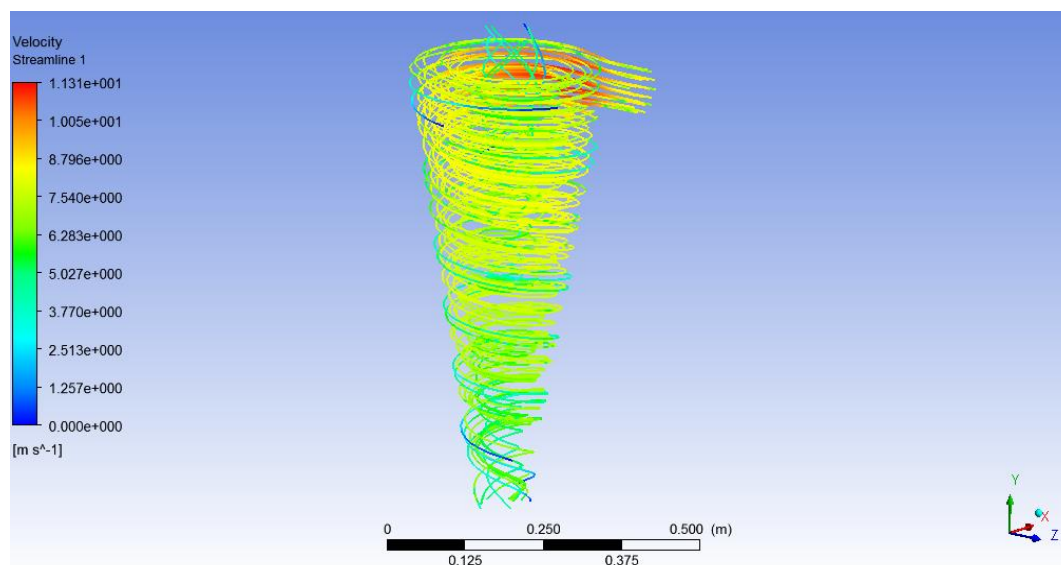
افت فشار

یکی از پارامترهای ارزیابی عملکرد یک سیکلون، افت فشار در داخل آن است. هرچه قدر سیستم دارای افت فشار کمتری باشد پایداری بالاتری داشته و از نظر عملکرد دارای ارجحیت است. در شکل ۱۰ کانتورهای فشار استاتیکی به ازای زوایای مختلف صفحه تنظیم کننده ارائه شده است. با افزایش زاویه صفحه، فشار استاتیکی و در نتیجه افت فشار کاهش یافته است و می توان از نقطه نظر افت فشار وجود این صفحه را مثبت ارزیابی کرد. لازم به ذکر است که کمترین افت فشار مربوط به حالت صفحه با زاویه ۷۵ درجه است که مقدار افت فشار در این سطح ۱۱۴ پاسکال می باشد.

نکته حایز اهمیت این است که هر دو پارامتر بازده جداسازی و افت فشار بایستی برای به دست آوردن ماکزیمم عملکرد مصالحه گردند، لذا با در نظر گرفتن دو پارامتر افت فشار و بازده جداسازی،



شکل ۱۰- کانتور فشار استاتیکی در زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده
Fig. 10. Static Pressure contour in various angles of regulator plate



شکل ۱۱- کانتور خط مسیر برای وضعیت زاویه صفحه ۳۰ درجه تنظیم کننده

Fig.11. Path line contours in 30° angles of regulator plate

خط مسیر

به منظور مشاهده هرچه بهتر مسیر حرکت جریان در داخل سیکلون کانتور مربوط به خط مسیر برای حالت صفحه تنظیم کننده جریان ۳۰ درجه (بهترین حالت در بین حالت های بررسی شده) ارائه شده است. همان طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می گردد، بعد از ورود جریان به داخل سیکلون از طریق بخش ورودی، جریان به دو بخش شامل بخش خروجی مواد (خروجی پایین) و بخش خروجی گاز (خروجی بالا) تقسیم شده است و عمدتاً از بخش خروجی پایین خارج شده است.

شدت آشفته گی

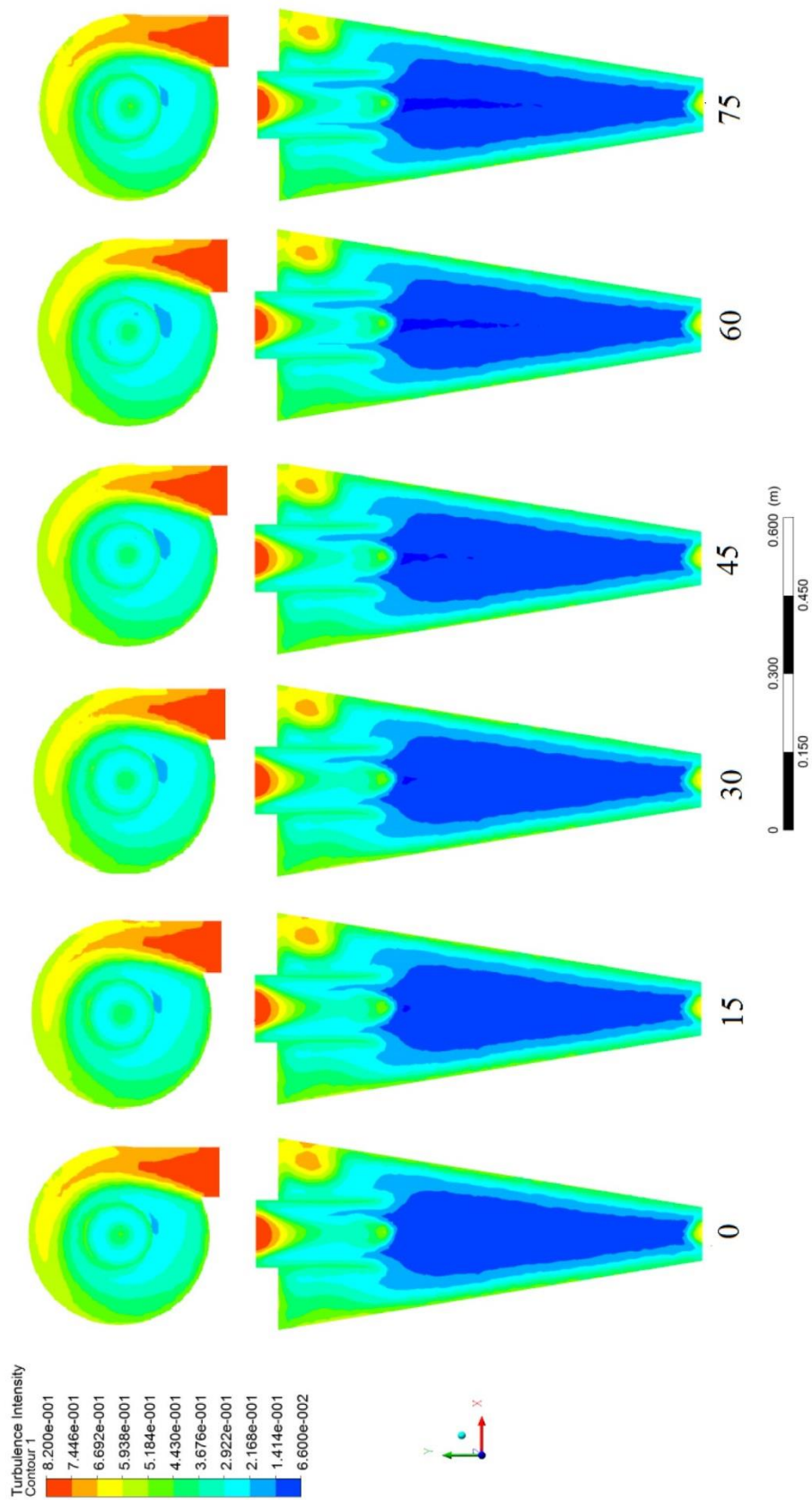
با در نظر گرفتن تعریف شدت آشفته گی که به صورت نسبت انحراف معیار نوسانات سرعت به سرعت میانگین می باشد، می تواند به عنوان معیاری برای شناسایی آشفته گی های داخل سیکلون استفاده گردد. لازم به ذکر است که با توجه به کارکرد دائمی سیکلون در مسیرهای فرآوری و کاربردهای صنعتی، آشفته گی ها با گذر از حد مشخص می توانند به سیستم ارتعاش وارد کرده و سبب ایجاد اختلال در کار سیکلون ها و همچنین کار سیستم شوند.

با توجه به شکل ۱۲ که کانتور شدت آشفته گی در زوایای مختلف صفحه تنظیم کننده را نشان می دهد، شدت آشفته گی تا زاویه ۳۰ درجه کاهش می یابد، سپس به مقدار تقریباً ثابت برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰

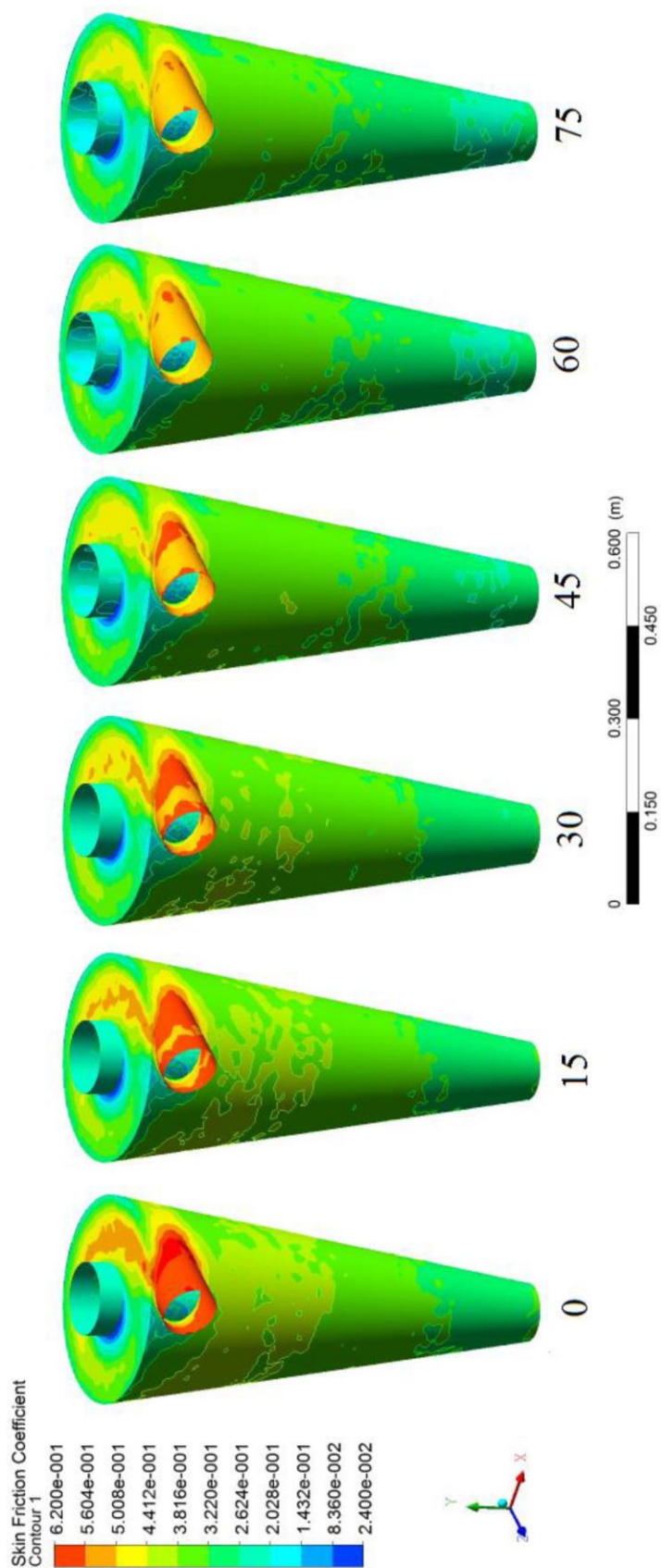
درجه می رسد. در ادامه این مقدار برای زاویه صفحه تنظیم کننده ۷۵ درجه افزایش می یابد که به واسطه کاهش مجرای خروجی هوا و آشفته شدن جریان است.

ضریب اصطکاک سطح

در صنایعی همچون صنعت آرد، بحث خوردگی تحت تاثیر اصطکاک ایجاد شده در مقاطع سیکلون یک مشکل اساسی می باشد که می توان با شناسایی محل های ایجاد سایش و اتخاذ روش های مناسب لازم هزینه تعویض و نگهداری واحدهای استفاده کننده از سیکلون ها را تقلیل داد. تحت تاثیر اصطکاک جریان مواد در دیواره سیکلون، خوردگی ایجاد شده و به سبب ورود مماسی مواد و برخورد مستقیم مواد با دیواره در محل ورودی بیشینه مقدار ضریب اصطکاک در بخش ورودی و سطح بالایی قسمت استوانه ای مشاهده می گردد. شکل ۱۳ روند کاهشی مقدار ضریب اصطکاک سطح را با توجه به افزایش زاویه صفحه تنظیم کننده را نشان می دهد. دلیل این پدیده (کاهش ضریب اصطکاک سطح) کاهش مجرای خروجی هوا و در نتیجه کم تر شدن حجم ورودی و خروجی هواست که سبب ایجاد گرادیان فشاری کم تر به منظور مکش در خروجی هوا در مرکز سیکلون می گردد. در پژوهش انجام شده توسط نعیمی و همکاران (Naimi et al., 2019) افزایش سرعت ورودی مواد، سبب افزایش ضریب اصطکاک در بدنه سیکلون گردیده است.



شکل ۱۲ - کانتور شدت آشفتگی در زوایای مختلف صفحه تنظیم‌کننده
Fig.12. Turbulence intensity contour in various angles of regulator plate



شکل ۱۳ - کانتور ضریب اصطکاک سطح در زوایای مختلف صفحه تنظیم کننده
Fig. 13. Friction contour in various angles of regulator plate

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر شش زاویه ایجاد شده توسط صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی شامل زوایای صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه بر عملکرد سیکلون جداکننده آرد مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌های تجربی از یک سرعت‌سنج هوای سیم داغ و یک ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشار با دقت ۰/۱ پاسکال استفاده شد. در بخش عددی مدل هندسی سه‌بعدی در نرم‌افزار گمبیت نسخه ۲،۴،۶ رسم گردید و سپس بعد از انجام شبکه‌بندی مناسب و تعریف شرایط مرزی مطلوب، جهت تحلیل و استخراج نتایج به نرم‌افزار آنسیس فلوئنت نسخه ۱۵ وارد شد. کانتورهای مربوط به اندازه سرعت، سرعت محوری، بازده جداسازی، افت فشار، خط مسیر، شدت آشفتگی و همچنین ضریب اصطکاک سطح سیکلون برای سطوح مختلف به کمک نرم‌افزار پس از پردازش آنسیس فلوئنت (CFD-Post) استخراج شده و مورد بحث قرار گرفتند. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از تحلیل نتایج به شرح زیر است:

۱- با افزایش مقدار زاویه صفحه تنظیم‌کننده جریان خروجی، مقدار اندازه سرعت روند کاهشی محسوسی به‌خود گرفت، منتهی تغییر زاویه تأثیر چندانی را بر روی سرعت مماسی نشان نداد که به‌خاطر نوع قرارگیری صفحه در زاویه‌های مختلف به این صورت درآمده است.

۲- از نظر شدت آشفتگی، این پارامتر تا زاویه صفحه جداکننده ۳۰ درجه روند کاهشی داشت، سپس به مقدار تقریباً ثابت برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه رسید و در انتها برای زاویه صفحه تنظیم‌کننده ۷۵ درجه افزایش یافت. همچنین مقدار ضریب اصطکاک سطح روند کاهشی را با توجه به افزایش زاویه صفحه تنظیم‌کننده نشان داد که به دلیل کاهش مجرای خروجی هوا و در نتیجه کم‌تر شدن حجم ورودی و حجم خروجی هواست. این کاهش حجم هوای خروجی، سبب ایجاد گرادیان فشاری کم‌تر به‌منظور ایجاد مکش در خروجی هوا در مرکز سیکلون می‌شود.

۳- بازده جداسازی روند افزایشی-کاهشی برای مقادیر مختلف صفحه تنظیم‌کننده نشان داد به‌طوری که تا زاویه ۳۰ درجه صفحه اثر مثبت بر روی بازده جداسازی داشت، منتهی بعد از ۳۰ درجه روند کاهشی شده و رفته رفته اثر این تأثیر با شدت بیشتری خود را نشان داد. کم‌ترین میزان بازده جداسازی برای زاویه صفحه ۷۵ درجه به‌دست آمد. همچنین افت فشار با افزایش زاویه صفحه تنظیم‌کننده روند کاهشی را نشان داد که برای عملکرد کلی سیکلون مثبت بود.

۴- در مجموع و با در نظر گرفتن مصالحه بین بازده جداسازی و افت فشار به‌عنوان دو پارامتر تأثیرگذار بر عملکرد سیکلون زاویه ۳۰ درجه به‌عنوان بهترین زاویه در بین زوایای مورد بررسی جهت استفاده انتخاب شد.

References

- Alahmadi, Y. H., and A. F. Nowakowski. 2016. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science* 147: 150-165. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.03.023>.
- Elsayed, K., and C. Lacor. 2010. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. *Chemical Engineering Science*. 65: 6048-6058. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.042>.
- Elsayed, K., and C. Lacor. 2011. The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. *Applied Mathematical Modelling* 35: 1952-1968. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.007>.
- Gimbun, J., T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, and A. Fakhru'l-Razi. 2005a. A CFD study on the prediction of cyclone collection efficiency. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics* 6 (3): 161-168. DOI: [10.1080/15502280590923649](https://doi.org/10.1080/15502280590923649).
- Gimbun, J., T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, and A. Fakhru'l-Razi. 2005b. Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance. *Journal of Aerosol Science* 36 (8): 1056-1065. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.10.014>.
- Griffiths, W. D., and F. Boysan. 1996. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. *Journal of Aerosol Science* 27: 281-304. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)00549-8](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00549-8).
- Hoffmann, A. C., M. De Groot, W. Peng, H. W. Dries, and J. Kater. 2001. Advantages and risks in increasing cyclone separator length. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 47: 2452-2460. <https://doi.org/10.1002/aic.690471109>.
- Inc. ANSYS. 2013. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 182 15317: 373-464.
- Mazyan, W. I., A. Ahmadi, J. Brinkerhoff, H. Ahmed, and M. Hoorfar. 2018. Enhancement of Cyclone Solid Particle Separation Performance Based on Geometrical Modification, Numerical Analysis. *Separation and Purification Technology* 191 (1): 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.040>

10. Naime Dizajyekan, S., Gh. Shahgholi, A. Rezvanivande fanaei, and V. Rotampour. 2019. Numerical Study of Wheat Conveying in Separator Cyclone Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Agricultural Machinery* 11 (2): 231-246. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v11i2.79613>.
11. Rezvanivandefanayi, A., and A. M. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator. *International Journal of Food Engineering* 11: 71-77. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0125>.
12. Zhao, B., Y. Su, and J. Zhang. 2006. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chemical Engineering Research and Design* 84 (12): 1158-1165. <https://doi.org/10.1205/cherd06040>.
13. Zobeiri, M., V. Rostampour, A. R. Fanaei, and A. M. Nikbakht. 2019. Experimental and Numerical investigation of deviation blade effect on sedimentation chamber performance in chickpea harvesting machine. *Iran Biosystems Engineering* 52: 329-339. (In Persian). DOI: [10.22059/ijbse.2020.276317.665166](https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.276317.665166).



Effect of Gaseous Fuels and Coolant Temperature on Performance and Combustion Characteristics of a Low-Speed Single Cylinder Diesel Engine

B. Sabahi^{1*}, H. Bahrami², M. J. Sheikhdavoodi³, S. M. Safieddin Ardebili⁴, E. Houshyar⁵

1- Ph.D. Student of Agricultural Mechanization, College of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, College of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Professor, Department of Biosystem Engineering, College of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

4- Assistant Professor, Department of Biosystem Engineering, College of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

5- Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, College of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran

(*- Corresponding Author Email: b-sabahi@phdstu.scu.ac.ir)

DOI: [10.22067/jam.2021.68089.1007](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68089.1007)

Received: 31-12-2020

Revised: 02-12-2021

Accepted: 06-12-2021

Available Online: 06-12-2021

How to cite this article:

Sabahi, B., H. Bahrami, M. J. Sheikhdavoodi, S. M. Safieddin Ardebili, and E. Houshyar. 2022. Effect of Gaseous Fuels and Coolant Temperature on Performance and Combustion Characteristics of a Low-Speed Single Cylinder Diesel Engine. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 351-366. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.2021.68089.1007](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68089.1007)

Introduction

Today, diesel engines provide the main power source for the world equipment e.g., common propulsion generators in industry and agriculture. These engines are widely used due to their high combustion efficiency, reliability, compatibility, and cost-effectiveness. However, diesel engines are one of the most critical consumers of fuel which in turn causes some environmental pollution. One of the convenient and low-cost ways to reduce the pollution of these engines is dual-fuel mode and the use of gaseous fuels as an alternative fuel. This study investigated the effect of blending CNG and LPG with neat diesel in dual-fuel mode. Besides, the variation in engine coolant temperature on engine performance characteristics was experimentally studied.

Materials and Methods

The experimental apparatus consisted of a stationary, four-stroke, naturally aspirated, water-cooled, single-cylinder compression ignition engine. To control the engine load, an electrical dynamometer was made using a 7.5 kW three-phase generator and coupled to the engine as a cradle. A load cell was used to determine the force applied to the generator. The engine speed was monitored continuously by a tachometer. Fuel consumption was measured by using a weight method. A thermostat with variable temperature was used to control the temperature of the engine coolant. To measure the mass flow of air entering the cylinder, an airbox with a sharp edge orifice was used. For this study, factorial experiments in the form of a randomized complete block design with three replications were utilized to analyze the data statistically. The studied parameters were three levels of fuel ratio (100% diesel, 20% diesel and 80%± 2% CNG, 20% diesel and 80%±2% LPG), 11 engine speeds (1500 to 1600 rpm with 10 rpm intervals), and three engine coolant temperatures (50, 60, and 70 °C). All experiments were conducted in the governor control mode.

Results and Discussion

The results showed that the torque, brake power and brake mean effective pressure (BMEP) in the diesel-CNG mode at all engine speeds and in the diesel-LPG mode at low engine speeds significantly increased compared to pure diesel. The increases in these parameters in the diesel-CNG mode were 18.67%, 19.56% and 19.85%, and in the diesel-LPG mode were 14.02%, 13.86% and 14.2%, compared to those related to the pure diesel, respectively. This increase could be due to the high calorific value of gas fuels and improvement of combustion inside the cylinder due to the formation of homogeneous charge. At low engine speeds, the reductions in the brake specific fuel consumption (BSFC) and brake specific energy consumption (BSEC) for coolant temperature 60 °C were 11.21% and 10.77%, compared to coolant temperature 50 °C, respectively. Also, the BSFC and BSEC for diesel-CNG dual-fuel mode decreased by 8.12% and 10.81%, respectively. These values for the diesel-LPG dual-fuel mode were 5.4% and 2.4%, respectively. The brake thermal efficiency (BTE) also showed a significant increase at high speeds and when using the dual-fuel operational mode. However, raising the coolant temperature due to reducing the heat losses of the engine increased the BTE. The increases in BTE for coolant temperatures 60 and 70 °C were 7.19% and 4.37%, compared to the coolant temperature of 50

°C, respectively. When using the engine in dual-fuel mode, the volumetric efficiency due to reducing the air ratio showed a significant reduction. These diesel-CNG and diesel-LPG dual-fuel mode values were 20.31% and 24%, respectively. Furthermore, raising the coolant temperature diminished the volumetric efficiency. The reduction in volumetric efficiency for the coolant temperatures of 60 °C and 70 °C were 6.84% and 19.91% compared to the coolant temperature of 50 °C, respectively.

Conclusion

The following conclusions can be deduced based on this study:

The use of gaseous fuels as the main fuel and with a small amount of diesel in compression ignition engines is possible and improves the engine's performance characteristics.

In the diesel-CNG mode, torque, brake power and BMEP at all engine speeds and in the diesel-LPG mode at low engine speeds significantly increased compared to pure diesel because of improved combustion inside the cylinder.

At low engine speeds, increasing the coolant temperature reduced the BSFC and BSEC. Also, in the dual-fuel mode compared to the engine with baseline diesel fuel, the BSFC and BSEC were significantly lower due to the higher calorific value of gaseous fuels and higher power generation.

The BTE at high engine speeds and when the engine was in dual-fuel mode showed a significant increase. Also, increasing the coolant temperature due to reducing the heat losses of the engine increased the BTE.

When using the engine in the dual-fuel mode, due to the volume of air replaced by the gas, the volumetric efficiency showed a significant reduction. Also, raising the coolant temperature diminished the volumetric efficiency.

Overall, it can be stated that the use of a diesel-CNG dual-fuel mode with a coolant temperature of 60 °C at entire engine speeds has the best outputs on the performance and combustion characteristics of the engine.

Keywords: Brake power, Coolant temperature, Dual-fuel diesel engine, Engine performance, Gaseous fuels

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۶۶-۳۵۱

تأثیر سوخت‌های گازی و دمای مایع خنک‌کننده بر مشخصه‌های عملکردی و احتراقی یک موتور تک سیلندر دیزل دور پایین

بهرام صباحی^{۱*}، هوشنگ بهرامی^۲، محمد جواد شیخ داودی^۳، سید محمد صفی الدین اردبیلی^۴، احسان هوشیار^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

چکیده

در این پژوهش تأثیر استفاده از سوخت‌های گاز طبیعی فشرده و گاز نفتی مایع بر مشخصه‌های عملکردی و احتراقی یک موتور دیزل تک سیلندر، چهار زمانه، آب خنک با مکش طبیعی و به‌صورت مختلط‌سوز مطالعه شد. هدف اصلی در این پژوهش تعیین شاخص‌های عملکردی و مشخصه‌های احتراقی موتور در محدوده عملکرد گاورنر و در سرعت‌ها و دماهای مختلف مایع خنک‌کننده موتور بوده است. آزمایش‌ها در شرایط پایدار برای حالت‌های کارکرد موتور با سوخت گازوییل خالص و مختلط‌سوز گازوییل-گاز و در سرعت‌ها و دماهای مختلف مایع خنک‌کننده موتور به‌صورت آزمایش‌های فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام و مشخصه‌های عملکردی موتور اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش موتور نشان داد که گشتاور، توان ترمزی و فشار مؤثر متوسط ترمزی در حالت مختلط‌سوز گازوییل-CNG نسبت به حالت سوخت گازوییل خالص در تمامی سرعت‌ها و در حالت مختلط‌سوز گازوییل-LPG در سرعت‌های پایین موتور افزایش معنی‌داری یافتند. مصرف سوخت و انرژی ویژه ترمزی نیز با افزایش دمای مایع خنک‌کننده در سرعت‌های پایین موتور و همچنین کارکرد موتور به‌صورت مختلط‌سوز کاهش معنی‌داری را نشان دادند. همچنین با افزایش دمای مایع خنک‌کننده و کارکرد موتور با حالت مختلط‌سوز بازده حرارتی ترمزی و بازده حجمی به‌ترتیب افزایش و کاهش معنی‌داری را نشان دادند. به‌طور کلی، نتیجه‌گیری شد که استفاده از موتور به‌صورت مختلط‌سوز گازوییل-CNG و دمای مایع خنک‌کننده ۶۰ درجه سلسیوس در تمامی سرعت‌ها بهترین نتیجه را روی مشخصه‌های عملکردی و احتراقی موتور دارد.

واژه‌های کلیدی: توان ترمزی، دمای مایع خنک‌کننده، سوخت‌های گازی، عملکرد موتور، موتور مختلط‌سوز

مقدمه

امروزه موتورهای دیزلی قدرت بسیاری از تجهیزات در جهان را تأمین کرده و متداول‌ترین مولد حرکتی در صنعت و کشاورزی

می‌باشند. این موتورها به علت راندمان احتراق بالا، قابلیت اطمینان، سازگاری و مقرون به صرفه‌بودن به‌طور گسترده‌ای در جهان استفاده می‌شوند (Wei et al., 2015). همچنین این موتورها یکی از مهمترین مصرف‌کنندگان سوخت و یکی از عوامل ایجادکننده آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌شمار می‌روند (Wei and Geng, 2016). یکی از راه‌های مناسب و کم‌هزینه برای کاهش آلودگی این موتورها، مختلط‌سوز کردن آن‌ها و استفاده از سوخت‌های گازی به‌عنوان سوخت جایگزین و به‌صورت مکمل با سوخت گازوییل می‌باشد. در یک نگاه ایده‌آل، سوخت جایگزین مناسب برای موتورهای دیزل باید حفظ مزایای عملکردی و احتراقی این موتورها را تضمین کند (Najafi et al., 2007). در موتورهای دیزل مختلط‌سوز، سوخت گازی به‌طور کم‌وبیش همگن در سیلندر با هوا مخلوط شده و سپس این مخلوط به‌وسیله تزریق مقدار کمی از سوخت دیزل به‌عنوان سوخت آتش‌زا مشتعل می‌شود.

- ۱- دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، ایران
- ۳- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، ایران
- ۴- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، ایران
- ۵- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه چهرم، چهرم، اهواز، اهواز، اهواز، اهواز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: b-sabahi@phdstu.scu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.2021.68089.1007

جدول ۱- خصوصیات گازوییل، گاز طبیعی و گاز نفتی مایع (Anonymus, 2010; Mehmet et al., 2019)

خصوصیت سوخت	گازوییل	گاز طبیعی	گاز نفتی مایع
Fuel property	Diesel	Natural gas	Liquefied petroleum gas
فرمول	C ₈ to C ₁₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Formula			
دانشیه			
Density (kg m ⁻³)	0.846	0.777	0.537
ارزش حرارتی پایین‌تر			
Latent heat value (MJ kg ⁻¹)	42.791	47.141	46.607
ارزش حرارتی بالاتر			
Higher heat value (MJ kg ⁻¹)	45.766	52.225	50.152
عدد اکتان/استان			
Octane/Cetane number	40-55	120	112
گرمای نهان تبخیر			
Latent heat of vaporization (°C)	233	510	426
دمای خود اشتعالی			
Auto ignition temperature (°C)	316	540	457

برای هر یک از سوخت‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از سوخت‌های بیولوژیک بیودیزل و بیوگاز در موتور مختلط‌سوز امکان‌پذیر بوده ولی موجب افت توان موتور می‌شود. همچنین انتشار آلایندگی اکسیدهای نیتروژن کاهش و مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته افزایش می‌یابد (Najafi, 2011). در مطالعه‌ای دیگر پژوهشگران تأثیر جایگزینی بالاتر از ۷۵ درصد سوخت گاز طبیعی فشرده به جای گازوییل را در یک موتور دیزل دو سیلندر، چهار زمانه با پاشش سوخت مستقیم مورد بررسی قرار دادند. نتایج، کاهش سطح صدا، مصرف سوخت ویژه و اکسیدهای نیتروژن و افزایش سطح آلایندگی هیدروکربن‌های نسوخته را نشان داد (Maji et al., 2008). همچنین در پژوهشی تأثیر تزریق LPG در مانیفولد هوا بر شاخص‌های عملکردی و آلایندگی موتور مورد بررسی قرار گرفت. موتور دیزل مورد بررسی به‌منظور بهبود کیفیت انتشار آلایندگی‌ها و همزمان حفظ بازده حرارتی اصلاح شد. نرخ تزریق LPG بر پایه‌های وزنی، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ درصد انتخاب شد. حداکثر بازده حرارتی و حداقل مصرف سوخت ویژه در سرعت‌های ۱۴۰۰ تا ۱۸۰۰ دور در دقیقه در نرخ ۱۵ درصد گاز به‌دست آمد. از نظر انتشار آلایندگی‌ها و شاخص‌های عملکردی موتور، نرخ تزریق بهینه در ۵ درصد گاز LPG به‌دست آمد. در این نرخ تزریق و در سرعت ۱۶۰۰ دور در دقیقه مصرف سوخت ویژه، اکسیدهای نیتروژن و دود به‌ترتیب ۹، ۲۷/۶ و ۲۰ درصد کاهش نشان داد (Ayhan et al., 2011). در مطالعه‌ای دیگر پژوهشگران خصوصیات عملکردی و آلایندگی یک موتور دیزل را با سوخت بیوگاز فشرده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها موفق شدند که سوخت بیوگاز را

گاز طبیعی، گاز نفتی مایع، هیدروژن و بیوگاز برخی از سوخت‌های گازی هستند که برای موتورهای احتراق داخلی مناسب می‌باشند (Hariprasad, 2013). از جمله مزیت‌های این سوخت‌ها فراوانی، دسترسی محلی، انرژی ارزان قیمت، ایمنی در استفاده، احتراق پاک و غیره می‌باشد (Papagiannakis, 2018). متداول‌ترین سوخت‌های گازی در موتورهای دیزلی گاز طبیعی فشرده^۱ و گاز نفتی مایع^۲ می‌باشد. این سوخت‌ها با توجه به خصوصیات نظیر وجود ذخایر عظیم در کشور، امکان دسترسی به آن در اکثر نقاط کشور، تولید آلودگی‌های زیست محیطی کمتر و عدم نیاز به فناوری‌های پیشرفته برای استفاده از آن‌ها، در حال حاضر بهترین سوخت‌های جایگزین می‌باشند. دمای خودسوزی بالای این سوخت‌ها مزیت مهمی برای آن‌ها است تا در نسبت تراکم‌های بالا کار کرده و در نتیجه بازده حرارتی بالاتر و انتشار آلایندگی‌های کمتری ایجاد نمایند (Mahla et al., 2018). برخی از خصوصیات گاز طبیعی، گاز نفتی مایع و گازوییل در جدول ۱ آورده شده است.

مطالعات مختلفی در رابطه با استفاده از سوخت‌های گازی در موتورهای دیزل انجام شده است. در پژوهشی تأثیر استفاده از بیودیزل و بیوگاز به‌جای گازوییل و گاز طبیعی در یک موتور دیزل مدل لیستر M8/1 مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور ابتدا موتور دیزل با استفاده از تجهیزاتی مانند میکسر، رگولاتور، فیلتر، شیر قطع‌کن سریع و فلوومتر به یک موتور مختلط‌سوز تبدیل شده و سپس آزمون عملکردی و آلایندگی در بار کامل و در دور ثابت ۷۵۰ دور در دقیقه

- 1- Compressed Natural Gas (CNG)
- 2- Liquefied Petroleum Gas (LPG)

در مطالعه حاضر تأثیر جایگزینی گاز طبیعی فشرده و گاز نفتی مایع به جای گازوییل و به‌صورت مختلط‌سوز بر ویژگی‌های عملکردی و احتراقی موتور دیزل در محدوده عملکرد گاورنر مورد مطالعه قرار گرفت. گرچه محققان تأثیر دمای مایع خنک‌کننده در موتورهای با استفاده از سوخت‌های گازوییل و بنزین و حتی بیوفیول‌ها را بر عملکرد موتور و آلاینده‌های آگروز مورد بررسی قرار داده‌اند، در هنگام استفاده از سوخت‌های گازی مطالعه‌ای صورت نگرفته است. از این‌رو در این پژوهش تأثیر دمای مایع خنک‌کننده موتور به‌عنوان یک روش کم‌هزینه و کم‌تغییر بر شاخص‌های عملکردی و احتراقی موتور مختلط‌سوز گازوییل-گاز مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به‌منظور مطالعه تأثیر سوخت‌های گازی و دمای مایع خنک‌کننده بر شاخص‌های عملکردی و احتراقی، از یک موتور دیزل تک سیلندر، چهار زمانه با پاشش مستقیم و مجهز به سیستم خنک‌کننده‌ی مایعی با مکش طبیعی و قدرت خروجی ۳/۶ کیلووات در ۱۵۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. این موتور به‌طور وسیعی در کاربردهای تجاری کوچک، ژنراتورهای دیزلی، پمپ‌های کشاورزی به‌خصوص در مناطق روستایی کاربرد دارد. مشخصات موتور مورد استفاده در آزمون در جدول ۲ آورده شده است.

کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی موتور گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت. نگاره‌ی سامانه پژوهش به همراه تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ آورده شده است. موتور مورد استفاده با نصب و اضافه نمودن تجهیزاتی مانند مخزن گاز، رگولاتور تنظیم‌کننده‌ی فشار گاز، شیر دستی قطع جریان گاز، میکسر و لوله‌های رابط توانایی استفاده از سوخت گازی را پیدا کرده و به یک موتور دیزل مختلط‌سوز تبدیل شد. به‌منظور کنترل بار موتور، با استفاده از یک ژنراتور سه‌فاز ۷/۵ کیلووات، یک دینامومتر الکتریکی ساخته و به‌صورت یک گهواره^۱ به موتور کوپل شد. برای مشخص شدن نیروی اعمالی به ژنراتور از یک لودسل با ظرفیت ۲۵ کیلوگرم استفاده شد. همچنین به‌منظور بارگذاری‌های متغیر روی موتور از تعدادی مصرف‌کننده شامل ۱۵ عدد مقاومت الکتریکی ۷۰۰ وات، ۶ عدد لامپ ۲۰۰ وات و ۹ عدد لامپ ۱۰۰ وات استفاده شد که به‌طور مساوی روی هر سه‌فاز ژنراتور نصب شد.

به میزان ۸۵ درصد جایگزین سوخت دیزل نمایند. نتایج کاهش انتشار مونواکسید کربن و هیدروکربن را در بارهای مختلف نشان داد. بهترین نتیجه برای شاخص‌های عملکردی و آلایندگی موتور در ۶۰ درصد بیوگاز و ۴۰ درصد سوخت دیزل مشاهده شد (Santosh and Kumarappa, 2015). در مطالعه‌ای دیگر پژوهشگران تأثیر استفاده از ترکیب سوختی گازوییل-گاز طبیعی را بر شاخص‌های عملکردی و آلایندگی و مشخصه‌های احتراقی یک موتور دیزل چهار زمانه، آب خنک با مکش طبیعی و تک سیلندر در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه و ۱۰۰ درصد بار و سطوح انرژی گاز طبیعی مختلف (۰، ۱۵، ۴۰ و ۷۵ درصد) مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از دو انژکتور یکی برای تزریق گازوییل در سیلندر و دیگری برای تزریق CNG در مانیفولد هوا استفاده شد. نتایج نشان داد که هنگام استفاده از گاز طبیعی مصرف سوخت ویژه افزایش یافته و آلاینده اکسید نیتروژن و دوده در سطوح ۱۵ درصد و ۴۰ درصد سوخت گازی کاهش می‌یابد. از طرفی انتشار مونواکسید کربن در سطح ۱۵ درصد گاز طبیعی افزایش نشان داد. همچنین انتشار اکسید نیتروژن در سطح ۷۵ درصد گاز طبیعی به‌میزان قابل‌توجهی افزایش یافت (Karagöz et al., 2016). در پژوهشی دیگر یک موتور دیزل L233 به‌عنوان موتور مختلط‌سوز استفاده شد و سوخت LPG به‌عنوان سوخت ثانویه در نظر گرفته شد. سوخت LPG در سه سطح ۳۵، ۴۵ و ۷۵ درصد و در سرعت‌های ۱۵۰۰، ۱۸۰۰، ۲۱۰۰ و ۲۷۰۰ دور در دقیقه در موتور استفاده شد. نتایج نشان داد که بازده حرارتی، مصرف سوخت و ویژه‌ی ترمزی و توان خروجی در حالت مختلط‌سوز بهتر از سوخت گازوییل خالص است. بهبود بازده حرارتی ترمزی در غلظت ۴۵ درصد سوخت گازی LPG کاملاً مشهود بود (Nugroho et al., 2018). در پژوهشی دیگر تأثیر دمای مایع خنک‌کننده بر شاخص‌های عملکردی و آلایندگی یک موتور دیزل چهار سیلندر و چهار زمانه با پاشش مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت. دمای مایع خنک‌کننده از ۵۰ تا ۹۵ درجه سلسیوس متغیر بود. نتایج نشان داد که دمای مایع خنک‌کننده تأثیر معنی‌داری بر بازده حجمی دارد، به‌طوری‌که با افزایش دمای مایع خنک‌کننده بازدهی حجمی موتور کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای مایع خنک‌کننده، مصرف سوخت و ویژه‌ی ترمزی کاهش و بازده حرارتی افزایش یافت (Abdelghaffar et al., 2002). در پژوهشی دیگر تأثیر دمای مایع خنک‌کننده بر شاخص‌های عملکردی و آلایندگی یک موتور دیزل برای ترکیب‌های بیوفیول مخلوط با اتانول و بوتانول مورد مطالعه قرار گرفت. دمای مایع خنک‌کننده بین ۵۰ تا ۹۵ درجه سلسیوس متغیر بود. با افزایش دما و هنگام استفاده از بیوفیول مصرف سوخت و ویژه‌ی ترمزی کاهش می‌یابد. انتشار دی‌اکسید کربن برای هر دو سوخت دیزل و مخلوط‌های بیوفیول افزایش و مونواکسید کربن کاهش نشان داد (Hossain et al., 2017).

جدول ۲- مشخصات موتور مورد استفاده در آزمون

Table 2- Specifications of the test engine

نوع موتور و مدل Engine type and model	موتور دیزل، دیکو Diesel engine, DIPCO
تعداد سیلندر Number of cylinder	تک سیلندر Single cylinder
قطر سیلندر * کورس Bore * Stroke	80*110 (mm)
توان اسمی Power (rated output)	3.7 (kW)
سرعت اسمی Speed range (rated speed)	1500 (rpm)
گنجایش موتور Cubic capacity	553 (cc)
مصرف سوخت ویژه در بار کامل Specific fuel consumption at full load	236/240 (g.kW.h ⁻¹)
نسبت تراکم Compression ratio	16:1

محفظه و هوای بیرون از یک فشارسنج (مانومتر) مورب استفاده گردید.

به‌منظور پایداری مشخصه‌های عملکردی موتور، قبل از هر آزمون موتور به مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه کار می‌کرد تا دمای قسمت‌های مختلف آن به حالت پایدار برسد و پس از آن آزمون اصلی انجام می‌شد. به‌طور کلی آزمایش‌ها به‌صورت تمام گاز از دور هرز بالا شروع شده و با بارگذاری تا بسته‌شدن کامل گاورنر ادامه پیدا کرد. برای هر یک از آزمایش‌ها نیرو، سرعت، مصرف سوخت‌های گازوییل و گاز، ارتفاع مانومتر آب و دمای هوای محیط در روی سکوی آزمون اندازه‌گیری شد و گشتاور، توان ترمزی، مصرف سوخت ویژه ترمزی^۳، مصرف انرژی ویژه ترمزی^۴، فشار مؤثر متوسط ترمزی^۵، راندمان حرارتی و بازده حجمی محاسبه گردید.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمایش‌های فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار استفاده گردید. آزمایش‌ها شامل ۹۹ تیمار بود که از ترکیب ۱۱ سطح سرعت موتور (۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ دور در دقیقه با فاصله ۱۰ دور)، سه ترکیب سوختی (۱۰۰ درصد گازوییل، ۲۰ درصد گازوییل و ۸۰±۲ درصد گاز طبیعی و ۲۰ درصد گازوییل و ۸۰±۲ درصد گاز نفتی مایع) و سه دمای مایع خنک‌کننده موتور (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) حاصل شدند. در پایان، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شد. همچنین رسم نمودارها با کمک نرم‌افزار اکسل و مقایسه‌ی میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

برای اندازه‌گیری دقیق و مستمر سرعت موتور از یک دورسنج مغناطیسی در نزدیکی محور موتور استفاده شد. سوخت گازوییل مورد استفاده از جایگاه شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی و سوخت‌های گازی نیز از شبکه عرضه این گاز در سطح کشور تهیه شد. به‌منظور اندازه‌گیری سوخت‌های مصرفی از روش وزنی استفاده شد. برای این منظور مخزن هر یک از سوخت‌ها بر روی یک ترازو قرار داده شده و از کاهش در وزن کلی ظرف که طی یک مدت معین برداشته می‌شود، دبی سوخت تعیین شد. برای اندازه‌گیری سوخت گازوییل از یک ترازوی الکترونیکی مدل ای اند دی^۱ با دقت ۰/۰۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری سوخت‌های گازی از یک ترازوی الکترونیکی مدل فوری^۲ با دقت ۵ گرم استفاده شد. برای اندازه‌گیری مدت مصرف سوخت از دو عدد کرنومتر با دقت ۰/۰۱ ثانیه استفاده گردید. به‌منظور کنترل دمای مایع خنک‌کننده موتور از یک ترموستات با دمای متغیر استفاده شد. برای کنترل بیشتر روی نرخ جریان آب سیستم خنک‌کننده موتور از یک مخزن استفاده شد، به‌طوری‌که جریان آب ورودی و خروجی به موتور توسط پمپ از این مخزن تأمین گردید. به‌منظور اندازه‌گیری جریان جرمی هوای وارد شده به سیلندر از روش مخزن هوا و روزنه و اندازه‌گیری افت فشار داخل مخزن استفاده شد. برای این منظور از یک مخزن با حجم مناسب که در موتورهای تک سیلندر معمولاً باید ۵۰۰ تا ۶۰۰ برابر حجم جاروب شده سیلندر (Chandra et al., 2011) باشد، استفاده گردید. قطر روزنه با توجه به حجم سیلندر موتور ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد (Martyr and Plint, 2011). برای اندازه‌گیری اختلاف فشار بین هوای موجود در

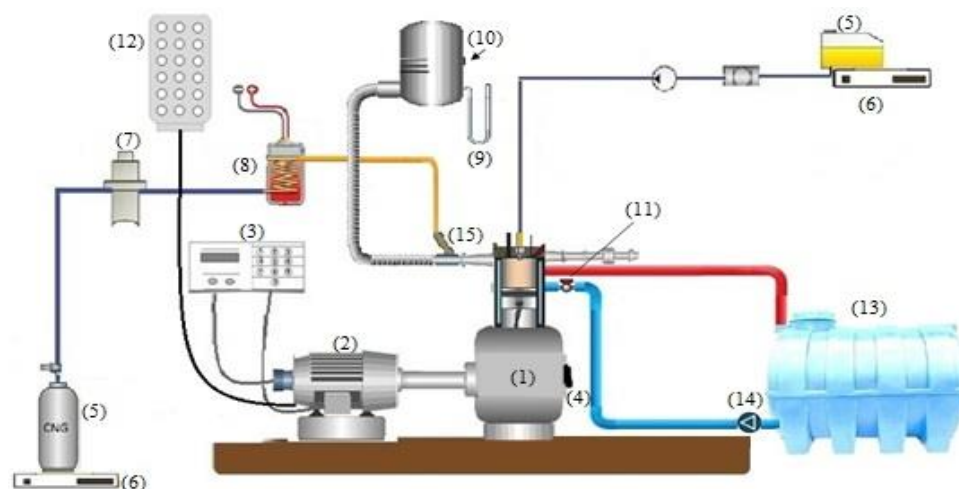
3- Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)

4- Brake Specific Energy Consumption (BSEC)

5- Brake Mean Effective Pressure (BMEP)

1- A & D

2- Furi



شکل ۱- نگاره سامانه پژوهش شامل: ۱- موتور، ۲- دینامومتر، ۳- واحد کنترل دینامومتر، ۴- دورسنج مغناطیسی، ۵- مخزن سوخت گازوییل و سیلندر گاز، ۶- ترازوها، ۷- رگولاتور فشار، ۸- گرم‌کن، ۹- مانومتر، ۱۰- مخزن هوا و روزه، ۱۱- ترموستات دما متغیر، ۱۲- مصرف‌کننده‌ها، ۱۳- مخزن آب، ۱۴- پمپ آب و ۱۵- میکسر

Fig.1. Schematic diagram of the experimental setup: 1. Engine, 2. Dynamometer, 3. Dynamometer control unit, 4. Inductive pick-up, 5. Fuel tank and gas cylinder, 6. Scales, 7. Pressure regulator, 8. Heater, 9. Manometer, 10. Airbox with sharp edge orifice, 11. Thermostat with variable temperature, 12. Consumers, 13. Water tank, 14. Water pump and 15. Mixer

نتایج و بحث

سطح ۱ درصد بر متغیرهای عملکردی موتور داشته‌اند. همچنین اثر متقابل این عوامل نیز بر برخی از متغیرهای عملکردی موتور معنی‌دار بوده است.

در جدول ۳ نتایج تجزیه‌ی واریانس اثر عوامل بررسی شده بر مشخصه‌های عملکردی موتور مورد مطالعه آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تمامی عوامل اصلی تأثیر معنی‌داری در

جدول ۳- نتایج تجزیه‌ی واریانس (میانگین مربعات) داده‌های صفات اندازه‌گیری شده

Table 3- Results of analysis of variance (mean squares) in measurement traits data

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Df	میانگین مربعات (Mean square)						
		گشتاور Torque	توان ترمزی Brake power	مصرف سوخت ویژه Brake specific fuel consumption	مصرف انرژی ویژه Brake specific energy consumption	بازده حرارتی Brake thermal efficiency	فشار مؤثر متوسط Brake mean effective pressure	بازده حجمی Volumetric efficiency
Block	2	0.152 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.179 ^{ns}	2.746 ^{ns}	0.001 ^{ns}	13.953 ^{**}
A	10	2951.6 ^{**}	71.745 ^{**}	0.229 ^{**}	417.2 ^{**}	775.43 ^{**}	9.526 ^{**}	23.511 ^{**}
B	2	506 ^{**}	13.018 ^{**}	0.022 ^{**}	43.81 ^{**}	168.54 ^{**}	1.632 ^{**}	8915.57 ^{**}
C	2	89.5 ^{**}	2.36 ^{**}	0.024 ^{**}	43.29 ^{**}	78.301 ^{**}	0.288 ^{**}	3261.3 ^{**}
A*B	20	16.8 ^{**}	0.419 ^{**}	0.001 ^{ns}	1.247 ^{ns}	5.788 ^{**}	0.54 ^{**}	2.81 [*]
B*C	4	7.68 ^{**}	0.1 ^{**}	0.001 ^{ns}	1.395 ^{ns}	2.161 ^{ns}	0.025 ^{**}	126.37 ^{**}
A*C	20	3.75 ^{**}	0.203 ^{**}	0.002 ^{**}	3.221 ^{**}	1.773 ^{ns}	0.012 ^{**}	1.77 ^{ns}
A*B*C	40	0.782 ^{**}	0.02 ^{**}	0.000 ^{ns}	0.752 ^{ns}	1.394 ^{ns}	0.003 ^{**}	0.692 ^{ns}
Error	196	0.172	0.268	0.001	1.007	1.27	0.001	1.643

^{**}, ^{*} و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی‌داری. A= سرعت موتور، B= نوع سوخت و C= دمای مایع خنک‌کننده

^{**}, ^{*}, Indicate that variances are significant at the level of 1%, 5% and ns is non-significant, respectively. A=Engine speed, B=Fuel type and C=Engine coolant temperature

گشتاور، توان ترمزی و فشار مؤثر متوسط ترمزی

در شکل ۲ تغییرات توان ترمزی و گشتاور و در شکل ۳ تغییرات فشار مؤثر متوسط ترمزی در حالت کارکرد موتور با سوخت گازوییل خالص و مختلط‌سوز گازوییل-گاز نشان داده شده است. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که اثر متقابل نوع سوخت در سرعت‌های مختلف موتور بر گشتاور، توان ترمزی و فشار مؤثر متوسط ترمزی معنی‌دار می‌باشد. مقایسه‌ی میانگین مربوط به این اثر متقابل در جدول ۴ آورده شده است. گشتاور، توان ترمزی و فشار مؤثر متوسط ترمزی در حالت مختلط‌سوز گازوییل-CNG تقریباً در تمامی سرعت‌های موتور نسبت به حالت گازوییل خالص افزایش معنی‌داری به‌میزان ۱۸/۶۷ درصد، ۱۹/۵۶ درصد و ۱۹/۸۵ درصد نشان دادند. در حالت مختلط‌سوز گازوییل-LPG، در سرعت‌های بالای موتور افزایش اندکی در این کمیت‌ها نسبت به گازوییل خالص مشاهده شد. اما در سرعت‌های پایین موتور این متغیرها نسبت به سوخت گازوییل خالص به‌طور میانگین ۱۴/۰۲ درصد، ۱۳/۸۶ درصد و ۱۴/۲ درصد افزایش یافتند. علت افزایش گشتاور و توان ترمزی در حالت‌های کارکرد موتور به‌صورت مختلط‌سوز گازوییل-گاز به‌سبب ارزش حرارتی بالاتر سوخت‌های CNG و LPG می‌باشد. همچنین تزریق CNG و LPG به شکل گاز به بهبود احتراق در درون سیلندر کمک می‌کند. تأثیر ترکیب این دو عامل می‌تواند منجر به افزایش گشتاور و توان در حالت مختلط‌سوز نسبت به سوخت گازوییل خالص در شرایط بار کامل شود (Ayhan et al., 2011; Yusaf et al., 2010). این نتایج با یافته‌های آبهان و همکاران (Ayhan et al., 2011)، جیان و همکاران (Jian et al., 2001)، نگره‌وو و همکاران (Nugroho et al., 2018)، باراتا (Barata, 1995) و باری و حسین (Bari and Hossain, 2019) مطابقت دارد.

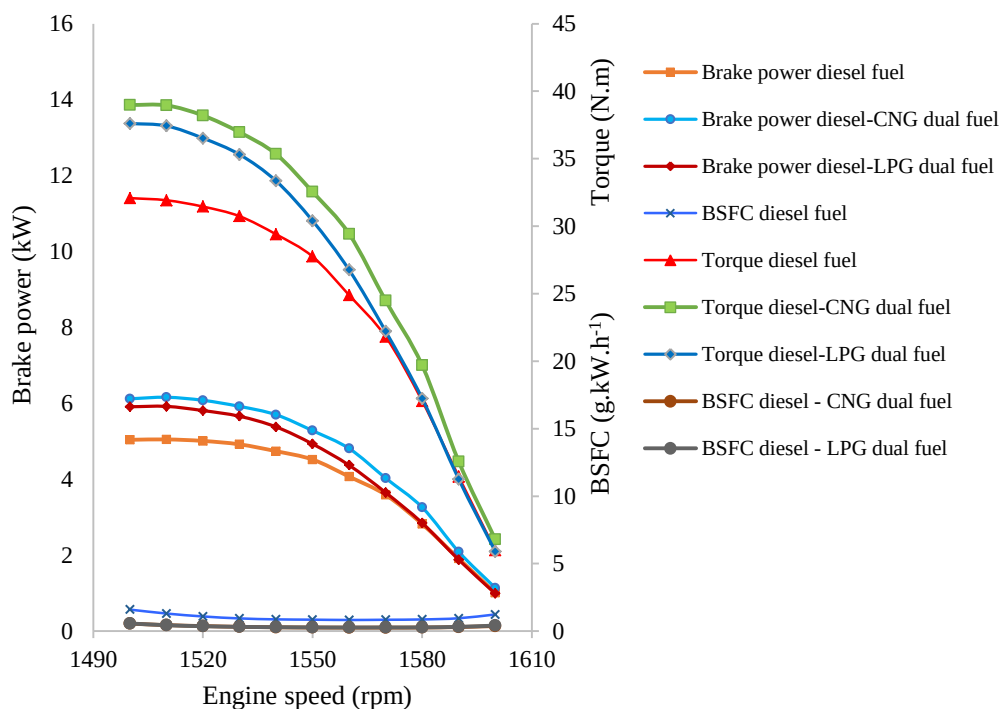
در شکل ۴ تغییرات گشتاور و توان ترمزی و در شکل ۵ تغییرات فشار مؤثر متوسط ترمزی با توجه به دمای مایع خنک‌کننده در سرعت‌های مختلف موتور نشان داده شده است. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که دماهای مایع خنک‌کننده و سرعت موتور اثر متقابل معنی‌داری نسبت به هم داشته و مقایسه‌ی میانگین تیمارهای مورد بررسی (جدول ۵) نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالا و پایین موتور دمای مایع خنک‌کننده تأثیر معنی‌داری بر گشتاور، توان ترمزی و فشار مؤثر متوسط ترمزی ندارد. تنها در سرعت‌های متوسط اعمالی به موتور دمای مایع خنک‌کننده ۶۰ درجه سلسیوس گشتاور، توان ترمزی و فشار مؤثر متوسط ترمزی را نسبت به دمای ۵۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۱۲/۲۱ درصد، ۱۲/۱۱ درصد و ۱۰/۶ درصد افزایش می‌دهد. یافته‌های توماس و همکاران نشان داد که با کاهش دمای مایع خنک‌کننده گشتاور خروجی افزایش می‌یابد. افزایش در

گشتاور در محدوده سرعت‌های پایین موتور معنی‌دار و در سرعت‌های بالای موتور ناچیز بود (Thomas et al., 2011).

در جدول ۶ تغییرات گشتاور، توان و فشار مؤثر متوسط ترمزی با توجه به دمای مایع خنک‌کننده و نوع سوخت استفاده شده در موتور نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در حالت کارکرد موتور به‌صورت مختلط‌سوز و سوخت گازوییل خالص، دماهای مایع خنک‌کننده ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس گشتاور، توان ترمزی و فشار مؤثر متوسط ترمزی موتور را به‌طور معنی‌داری تغییر نمی‌دهند و افزایش در دمای مایع خنک‌کننده افزایش غیرمعنی‌داری را در این کمیت‌ها ایجاد کرد.

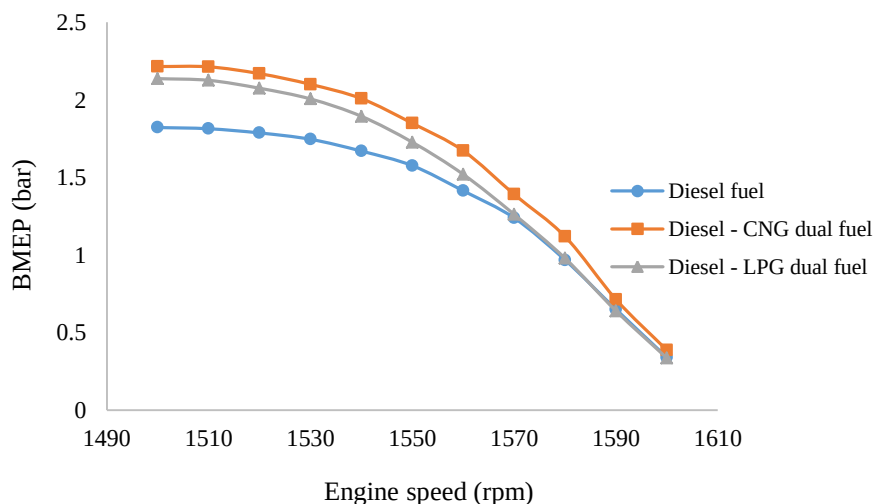
مصرف سوخت و انرژی ویژه‌ی ترمزی

در شکل ۴ تغییرات مصرف سوخت ویژه‌ی ترمزی و در شکل ۶ تغییرات مصرف انرژی ویژه‌ی ترمزی به‌صورت تابعی از سرعت‌های دورانی موتور و برای دماهای مختلف نشان داده شده است. مطابق با جدول ۳ مشاهده می‌شود که دمای مایع خنک‌کننده و سرعت‌های موتور اثر متقابل معنی‌داری بر مصرف سوخت و انرژی ویژه‌ی ترمزی داشته و مقایسه‌ی میانگین تیمارهای مورد بررسی (جدول ۵) نشان می‌دهد که در سرعت‌های دورانی بالای موتور دمای مایع خنک‌کننده تأثیر معنی‌داری بر BSFC و BSEC نشان نمی‌دهد. اما در سرعت‌های دورانی پایین موتور، دمای مایع خنک‌کننده ۶۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۵۰ درجه سلسیوس، BSFC و BSEC را به‌ترتیب ۱۱/۲۱ درصد و ۱۰/۷۷ درصد کاهش می‌دهد. دمای مایع خنک‌کننده ۷۰ درجه سلسیوس نیز نسبت به دمای ۵۰ درجه سلسیوس این دو متغیر را به‌ترتیب و به‌طور میانگین ۹/۸۶ درصد و ۹/۷۵ درصد کاهش داد. همچنین در تمامی دوره‌های موتور دمای مایع خنک‌کننده ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس از لحاظ آماری برای این دو متغیر اختلاف معنی‌داری نشان ندادند. این نتایج با نتایج انجام شده قبلی توسط عبدالقار و همکاران (Abdelghaffar et al., 2002) و توماس و همکاران (Thomas et al., 2011) مطابقت دارد. نوع سوخت موتور نیز تأثیر معنی‌داری بر BSFC و BSEC داشت. مطابق با جدول ۷ مشاهده می‌شود که BSFC و BSEC در حالت موتور مختلط‌سوز گازوییل-گاز کاهش معنی‌داری نسبت به موتور در حالت گازوییل خالص دارد. BSFC و BSEC در حالت مختلط‌سوز گازوییل-CNG نسبت به سوخت گازوییل خالص به‌ترتیب ۸/۱۲ درصد و ۱۰/۸۱ درصد و در حالت گازوییل-LPG نیز ۵/۴ درصد و ۲/۴ درصد کاهش یافت. این نتایج با یافته‌های ماجی و همکاران (Maji et al., 2008)، لونیسی و همکاران (Lounici et al., 2014)، یوسف و همکاران (Yusaf et al., 2010) و آبهان و همکاران (Ayhan et al., 2011) مطابقت دارد.



شکل ۲- تغییرات گشتاور، توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه‌ی ترمزی به‌صورت تابعی از سرعت دورانی موتور برای حالت‌های گازوییل خالص و مختلط‌سوز

Fig.2. Variations of torque, brake power and brake specific fuel consumption with engine speed for pure diesel fuel and dual fuel mode



شکل ۳- تغییرات فشار مؤثر متوسط ترمزی به‌صورت تابعی از سرعت دورانی برای حالت‌های کارکرد موتور با سوخت گازوییل و مختلط‌سوز

Fig.3. Variations of brake mean effective pressure with engine speed for diesel fuel mode and dual fuel mode

جدول ۴- مقایسه‌ی میانگین اثر متقابل سرعت و نوع سوخت بر صفات اندازه‌گیری شده در آزمایش

Table 4- Means comparison of interaction between speed and fuel type on the traits measured in the experiment

نوع سوخت Fuel type	سرعت Speed (rpm)	صفات اندازه‌گیری در آزمایش Traits measured in the experiment				
		گشتاور Torque (N.m)	توان ترمزی Brake power (kW)	بازده حرارتی Brake thermal efficiency (%)	فشار مؤثر متوسط Brake mean effective pressure (bar)	بازده حجمی Volumetric efficiency (%)
گازوئیل Diesel	1600	6 ^p	1.01 ^p	19.16 ^o	0.341 ^p	73.41 ^a
	1590	11.45 ^o	1.91 ^o	24.82 ^j	0.65 ^o	73.59 ^a
	1580	17.05 ^m	2.82 ^m	27.3 ^{efgh}	0.968 ^m	73.51 ^a
	1570	21.81 ^k	3.59 ^k	28.11 ^{cdef}	1.239 ^k	73.67 ^a
	1560	24.89 ^j	4.07 ^j	28.61 ^{cde}	1.414 ^j	73.91 ^a
	1550	27.75 ⁱ	4.52 ⁱ	27.89 ^{defg}	1.576 ⁱ	73.85 ^a
	1540	29.4 ^h	4.74 ^h	27.19 ^{efgh}	1.67 ^h	74.08 ^a
	1530	30.74 ^g	4.92 ^{fg}	25.19 ^{ij}	1.746 ^g	73.44 ^a
	1520	31.45 ^{fg}	5.01 ^f	21.82 ^{lm}	1.787 ^{fg}	73.32 ^a
	1510	31.92 ^f	5.05 ^f	18.26 ^o	1.814 ^f	72.67 ^a
	1500	32.08 ^f	5.04 ^f	15.01 ^p	1.822 ^f	72.11 ^a
گازوئیل-گاز طبیعی فشرده Diesel - Compressed natural gas	1600	6.81 ^p	1.14 ^p	22.23 ^{kl}	0.387 ^p	59.39 ^b
	1590	12.57 ⁿ	2.09 ⁿ	28.19 ^{cde}	0.714 ⁿ	59.68 ^b
	1580	19.69 ^l	3.26 ^l	31.43 ^a	1.119 ^l	59.6 ^b
	1570	24.48 ^j	4.03 ^j	32.17 ^a	1.391 ^j	59.38 ^b
	1560	29.43 ^h	4.81 ^{gh}	32.28 ^a	1.672 ^h	58.97 ^{bc}
	1550	32.54 ^{ef}	5.28 ^e	31.38 ^a	1.849 ^{ef}	58.77 ^{bc}
	1540	35.34 ^d	5.7 ^d	29.49 ^{bc}	2.008 ^d	58.33 ^{bc}
	1530	36.96 ^c	5.92 ^{bc}	26.3 ^{hi}	2.1 ^c	57.09 ^{bc}
	1520	38.2 ^{ab}	6.08 ^{ab}	22.57 ^{kl}	2.169 ^{ab}	58.16 ^{bc}
	1510	38.95 ^a	6.16 ^a	19.03 ^o	2.213 ^a	57.39 ^{bc}
	1500	38.98 ^a	6.12 ^a	15.19 ^p	2.215 ^a	56.79 ^{bc}
گازوئیل-گاز نفتی مایع Diesel - Liquefied petroleum gas	1600	5.91 ^p	0.99 ^p	20.64 ^{mn}	0.336 ^p	56.79 ^{bc}
	1590	11.26 ^o	1.88 ^o	26.65 ^{gh}	0.64 ^o	56.81 ^{bc}
	1580	17.24 ^m	2.85 ^m	30.84 ^{ab}	0.979 ^m	56.73 ^{bc}
	1570	22.21 ^k	3.65 ^k	31.22 ^a	1.262 ^k	56.85 ^{bc}
	1560	26.76 ⁱ	4.37 ⁱ	31.63 ^a	1.52 ⁱ	56.77 ^{bc}
	1550	30.4 ^{gh}	4.93 ^{fg}	30.8 ^{ab}	1.727 ^{gh}	56.53 ^{bc}
	1540	33.35 ^e	5.38 ^e	29.07 ^{cd}	1.894 ^e	56.07 ^{bc}
	1530	35.31 ^d	5.66 ^d	26.72 ^{fgh}	2.006 ^d	55.45 ^{bc}
	1520	36.52 ^c	5.81 ^{cd}	23.44 ^k	2.075 ^c	54.82 ^{bc}
	1510	37.43 ^{bc}	5.92 ^{bc}	19.45 ^{no}	2.126 ^{bc}	54.03 ^{bc}
	1500	37.61 ^{bc}	5.91 ^{bc}	15.07 ^p	2.137 ^{bc}	52.87 ^c

*در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف انگلیسی کوچک یکسان، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱ درصد معنی‌دار نیستند.

*In each column, means followed by the same lowercase letter are not significant at $P \leq 0.01$, according to Duncan Multiple Test.

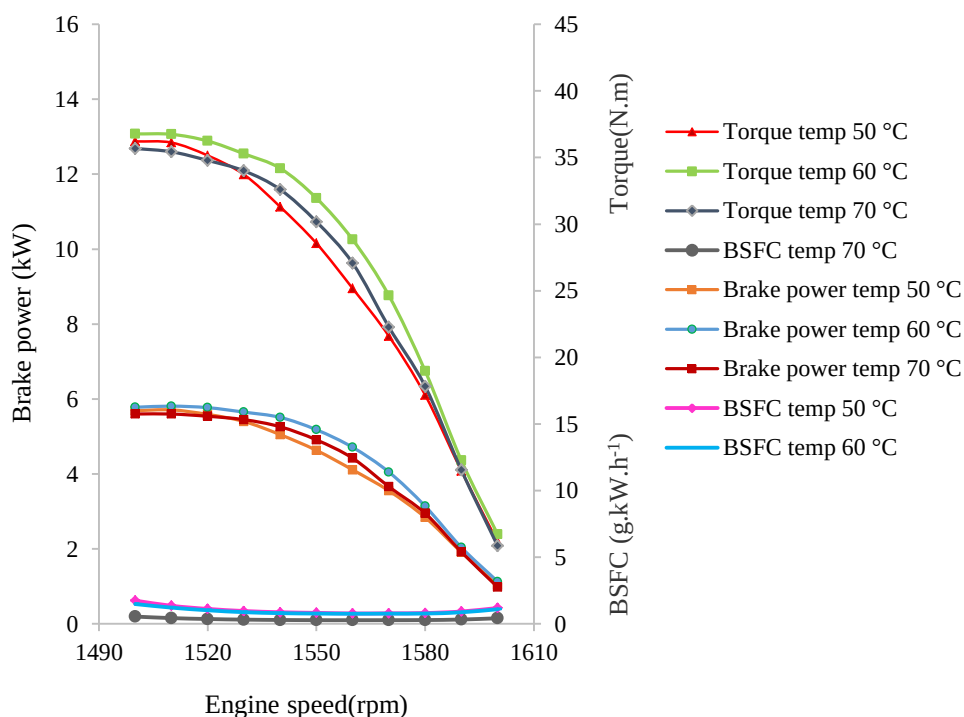
بازده حرارتی ترمزی

همان گونه که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، سرعت موتور و نوع سوخت اثر متقابل معنی‌داری بر بازده حرارتی موتور دارند. به‌طوری‌که در دورهای بالا و برای موتور در حالت مختلط‌سوز نسبت به موتور در حالت گازوئیل خالص بازده حرارتی افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. میزان این افزایش در حالت مختلط‌سوز گازوئیل-CNG، ۱۱/۳۲ درصد می‌باشد. در سرعت‌های دورانی پایین موتور افزایش اندکی در بازده حرارتی برای حالت مختلط‌سوز گازوئیل-CNG نسبت به گازوئیل خالص مشاهده شد. در حالت مختلط‌سوز گازوئیل-LPG

بازده حرارتی در تمامی سرعت‌های موتور نسبت به حالت گازوئیل خالص به‌طور میانگین افزایش معنی‌داری به میزان ۸/۴۴ درصد نشان داد. دمای خودسوزی بالای سوخت‌های گازی مزیت مهمی برای آن‌ها محسوب شده تا در نسبت تراکم‌های بالا کار کرده و در نتیجه بازده حرارتی بالاتری را ایجاد نمایند. شکل ۷ تغییرات بازده حرارتی ترمزی را به‌صورت تابعی از سرعت دورانی و برای حالت‌های کارکرد موتور به صورت مختلط‌سوز و کارکرد با سوخت گازوئیل خالص نشان می‌دهد. باراتا (Barata, 1995) نیز دریافت که در بارهای بالاتر بازده حرارتی در حالت مختلط‌سوز نسبت به حالت دیزل خالص اندکی بهبود می‌یابد. یوسف و همکاران (Yusaf et al., 2010) نشان دادند که

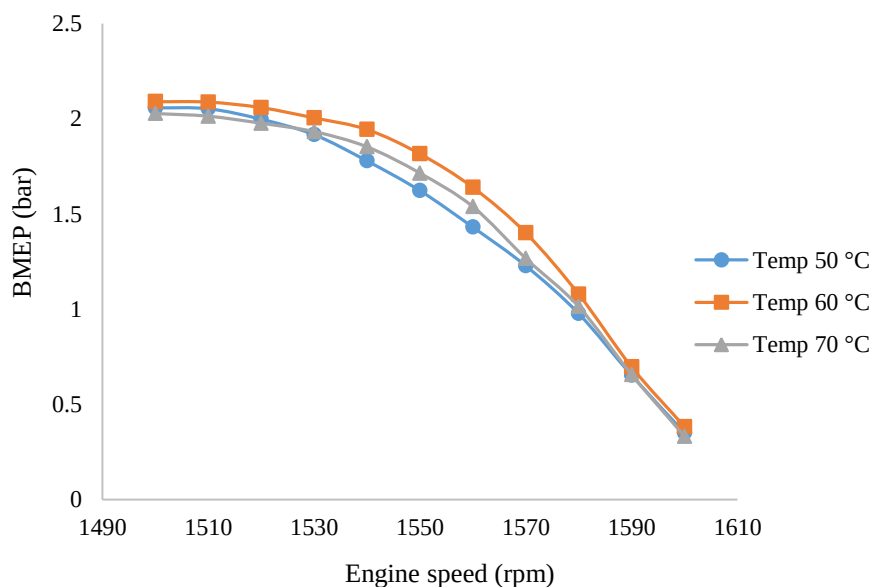
از سرعت دورانی برای حالت‌های مختلف سوخت و دیزل خالص نشان می‌دهد.

افزایش در بازده حرارتی و در حالت مختلف سوخت و به‌خصوص در سرعت‌های پایین به‌طور میانگین ۱۳ درصد بیشتر از حالت دیزل خالص است. شکل ۷ تغییرات بازده حرارتی ترمزی را به‌صورت تابعی



شکل ۴- تغییرات گشتاور، توان و مصرف سوخت ویژه ترمزی به‌صورت تابعی از سرعت دورانی در دماهای مختلف مایع خنک‌کننده موتور

Fig.4. Variations of torque, power and brake specific fuel consumption with engine speed for different engine coolant temperature



شکل ۵- تغییرات فشار مؤثر متوسط ترمزی به‌صورت تابعی از سرعت دورانی در دماهای مختلف مایع خنک‌کننده موتور

Fig.5. Variations of brake mean effective pressure with engine speed for different engine coolant temperature

جدول ۵- مقایسه‌ی میانگین اثر متقابل سرعت و دمای مایع خنک‌کننده موتور بر صفات اندازه‌گیری شده در آزمایش

Table 5- Means comparison of interaction between speed and engine coolant temperature on the traits measured in the experiment

دمای مایع خنک‌کننده Coolant temperature (°C)	سرعت Engine speed (rpm)	صفات اندازه‌گیری شده در آزمایش Traits measured in the experiment				
		گشتاور Torque (N.m)	توان ترمزی Brake power (kW)	مصرف سوخت ویژه Brake specific fuel consumption (g.kW.h ⁻¹)	مصرف انرژی ویژه Brake specific energy consumption (MJ.kW.h ⁻¹)	فشار مؤثر متوسط Brake mean effective pressure (bar)
دمای مایع خنک‌کننده ۵۰ درجه سلسیوس Engine coolant temperature 50 °C	1600	6.16 ⁿ	1.03 ⁿ	0.424 ^{de}	18.81 ^{de}	0.35 ⁿ
	1590	11.48 ^m	1.91 ^m	0.33 ^{hi}	14.06 ^{hi}	0.652 ^m
	1580	17.17 ^l	2.84 ^l	0.289 ^{klm}	12.33 ^{klm}	0.976 ^l
	1570	21.59 ^k	3.55 ^k	0.282 ^{lm}	12.01 ^{lm}	1.227 ^k
	1560	25.17 ^{ij}	4.11 ^{ij}	0.278 ^m	11.86 ^m	1.43 ^{ij}
	1550	28.56 ^{gh}	4.63 ^{gh}	0.294 ^{klm}	12.54 ^{klm}	1.622 ^{gh}
	1540	31.3 ^{ef}	5.05 ^{def}	0.31 ^{ijkl}	13.21 ^{ijkl}	1.778 ^{ef}
	1530	33.72 ^{bcd}	5.4 ^{abcd}	0.343 ^{gh}	14.65 ^{gh}	1.916 ^{bcd}
	1520	35.15 ^{ab}	5.59 ^{ab}	0.399 ^{ef}	17 ^{ef}	1.997 ^{ab}
	1510	36.12 ^{ab}	5.71 ^a	0.482 ^c	20.56 ^c	2.052 ^{ab}
	1500	36.21 ^{ab}	5.69 ^a	0.621 ^a	26.47 ^a	2.057 ^{ab}
دمای مایع خنک‌کننده ۶۰ درجه سلسیوس Engine coolant temperature 60 °C	1600	6.72 ⁿ	1.13 ⁿ	0.39 ^l	16.63 ^l	0.382 ⁿ
	1590	12.26 ^m	2.04 ^m	0.309 ^{ijkl}	13.17 ^{ijkl}	0.696 ^m
	1580	18.98 ^l	3.14 ^l	0.276 ^m	11.79 ^m	1.078 ^l
	1570	24.64 ^j	4.05 ^j	0.273 ^m	11.65 ^m	1.4 ^j
	1560	28.84 ^{gh}	4.71 ^{fgh}	0.27 ^m	11.5 ^m	1.639 ^{gh}
	1550	31.95 ^{def}	5.18 ^{cde}	0.275 ^m	11.73 ^m	1.815 ^{def}
	1540	34.19 ^{abcd}	5.51 ^{abc}	0.286 ^{klm}	12.18 ^{klm}	1.943 ^{abcd}
	1530	35.28 ^{ab}	5.65 ^{ab}	0.312 ^{ijk}	13.31 ^{ijk}	2.004 ^{ab}
	1520	36.24 ^{ab}	5.77 ^a	0.363 ^g	15.48 ^g	2.058 ^{ab}
	1510	36.74 ^a	5.81 ^a	0.434 ^d	18.85 ^d	2.087 ^a
	1500	36.77 ^a	5.78 ^a	0.529 ^b	22.57 ^b	2.089 ^a
دمای مایع خنک‌کننده ۷۰ درجه سلسیوس Engine coolant temperature 70 °C	1600	5.85 ⁿ	0.98 ⁿ	0.42 ^{de}	17.92 ^{de}	0.332 ⁿ
	1590	11.54 ^m	1.92 ^m	0.326 ^{hi}	13.9 ^{hi}	0.656 ^m
	1580	17.83 ^l	2.95 ^l	0.287 ^{klm}	12.25 ^{klm}	1.013 ^l
	1570	22.27 ^k	3.66 ^k	0.279 ^m	11.9 ^m	1.266 ^k
	1560	27.07 ^{hi}	4.42 ^{hi}	0.276 ^m	11.79 ^m	1.538 ^{hi}
	1550	30.18 ^{fg}	4.91 ^{efg}	0.278 ^m	11.88 ^m	1.714 ^{fg}
	1540	32.6 ^{cde}	5.26 ^{bcd}	0.293 ^{klm}	12.51 ^{klm}	1.852 ^{cde}
	1530	34 ^{bcd}	5.45 ^{abc}	0.319 ^{hij}	13.63 ^{hij}	1.932 ^{bcd}
	1520	34.78 ^{abc}	5.54 ^{abc}	0.364 ^g	15.55 ^g	1.976 ^{abc}
	1510	35.43 ^{ab}	5.6 ^{ab}	0.433 ^d	18.5 ^d	2.013 ^{ab}
	1500	35.68 ^{ab}	5.6 ^{ab}	0.547 ^b	23.33 ^b	2.027 ^{ab}

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف انگلیسی کوچک یکسان، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱ درصد معنی‌دار نیستند.

*In each column, means followed by the same lowercase letter are not significant at $P \leq 0.01$, according to Duncan Multiple Test.

بازده حجمی

شکل ۸ تغییرات بازده حجمی را به صورت تابعی از سرعت دورانی موتور برای کارکرد موتور با سوخت‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۴ مشاهده می‌شود که بازده حجمی در هنگام کار موتور به صورت مختلط‌سوز کاهش معنی‌داری نسبت به سوخت گازوئیل خالص نشان می‌دهد.

همچنین مطابق با جدول ۸ دمای مایع خنک‌کننده تأثیر

معنی‌داری بر بازده حرارتی ترمزی موتور دارد. نتایج نشان می‌دهد که بازده حرارتی ترمزی با افزایش دمای مایع خنک‌کننده افزایش می‌یابد، زیرا افزایش دمای مایع خنک‌کننده تلفات حرارتی موتور را کاهش می‌دهد. این کمیت در دمای مایع خنک‌کننده ۶۰ درجه سلسیوس ۴/۱۹ درصد و در دمای مایع خنک‌کننده ۷۰ درجه سلسیوس ۴/۳۷ درصد افزایش را نسبت به دمای ۵۰ درجه سلسیوس نشان داد.

جدول ۶- مقایسه‌ی میانگین اثر متقابل نوع سوخت و دمای مایع خنک‌کننده بر صفات اندازه‌گیری در آزمایش

Table 6- Means comparison of interaction between fuel type and engine coolant temperature on the traits measured in the experiment

نوع سوخت Fuel type	دمای مایع خنک‌کننده Engine coolant temperature (°C)	صفات اندازه‌گیری شده در آزمایش traits measured in the experiment			
		گشتاور Torque (N.m)	توان ترمزی Brake power (kW)	فشار مؤثر متوسط Brake mean effective pressure (bar)	بازده حجمی Volumetric efficiency (%)
گازوئیل Diesel	50	23.57 ^b	3.8 ^b	1.34 ^b	79.49 ^a
	60	24.81 ^{ab}	4 ^{ab}	1.41 ^{ab}	75.72 ^b
	70	23.77 ^b	3.83 ^b	1.35 ^b	65.05 ^c
گازوئیل-گاز طبیعی فشرده Diesel-Compressed natural gas	50	27.28 ^{ab}	4.39 ^{ab}	1.55 ^{ab}	64.42 ^c
	60	29.72 ^a	4.79 ^a	1.69 ^a	57.77 ^e
	70	28.63 ^{ab}	4.61 ^{ab}	1.63 ^{ab}	53.33 ^g
گازوئیل-گاز نفتی مایع Diesel-Liquefied petroleum gas	50	26.24 ^{ab}	4.22 ^{ab}	1.49 ^{ab}	59.76 ^d
	60	28 ^{ab}	4.51 ^{ab}	1.59 ^{ab}	56.52 ^f
	70	25.95 ^{ab}	4.18 ^{ab}	1.47 ^{ab}	51.09 ^h

*در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف انگلیسی کوچک یکسان، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱ درصد معنی‌دار نیستند.

*In each column, means followed by the same lowercase letter are not significant at $P \leq 0.01$, according to Duncan Multiple Test.

جدول ۷- مقایسه‌ی میانگین اثر نوع سوخت بر صفات اندازه‌گیری در آزمایش

Table 7- Means comparison fuel type on the traits measured in the experiment

نوع سوخت Fuel type	صفات اندازه‌گیری شده در آزمایش Traits measured in the experiment	
	مصرف سوخت ویژه ترمزی Brake specific fuel consumption (g.kW.h ⁻¹)	
	مصرف انرژی ویژه ترمزی Brake specific energy consumption (MJ.kW.h ⁻¹)	
گازوئیل Diesel	0.37 ^a	16.28 ^a
گازوئیل-گاز طبیعی فشرده Diesel-Compressed natural gas	0.34 ^c	14.52 ^b
گازوئیل-گاز نفتی مایع Diesel-Liquefied petroleum gas	0.35 ^b	16.67 ^b

*در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف انگلیسی کوچک یکسان، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱ درصد معنی‌دار نیستند.

*In each column, means followed by the same lowercase letter are not significant at $P \leq 0.01$, according to Duncan Multiple Test.

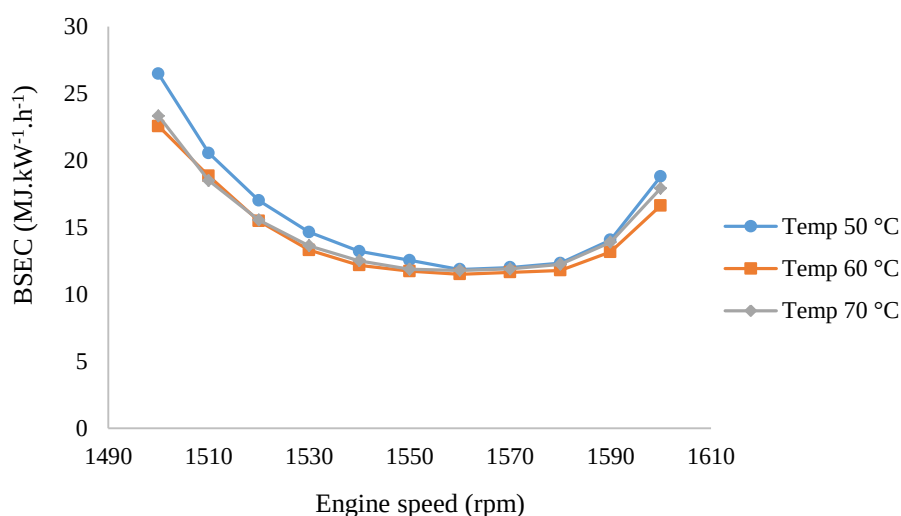
جدول ۸- مقایسه‌ی میانگین اثر دمای مایع خنک‌کننده بر بازده حرارتی و بازده حجمی

Table 8- Means comparison of the effect of engine coolant temperature on brake thermal and volumetric efficiency

دمای مایع خنک‌کننده Engine coolant temperature (°C)	صفات اندازه‌گیری شده در آزمایش Traits measured in the experiment	
	بازده حرارتی Brake thermal efficiency (%)	
	بازده حجمی Volumetric efficiency (%)	
دمای مایع خنک‌کننده ۵۰ درجه Coolant temperature 50°C	24.48 ^c	67.99 ^a
دمای مایع خنک‌کننده ۶۰ درجه Coolant temperature 60°C	26.24 ^a	63.34 ^b
دمای مایع خنک‌کننده ۷۰ درجه Coolant temperature 70°C	25.55 ^b	56.49 ^c

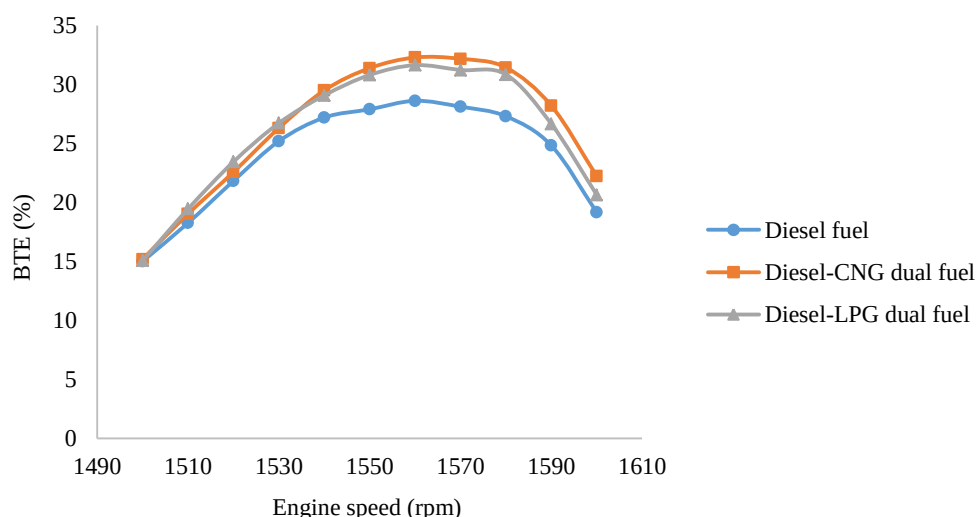
*در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف انگلیسی کوچک یکسان، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱ درصد معنی‌دار نیستند.

*In each column, means followed by the same lowercase letter are not significant at $P \leq 0.01$, according to Duncan Multiple Test.



شکل ۶- تغییرات مصرف انرژی ویژه ترمزی به صورت تابعی از سرعت دورانی موتور در دماهای مختلف مایع خنک کننده

Fig.6. Variations of brake specific energy consumption with engine speed for different engine coolant temperature



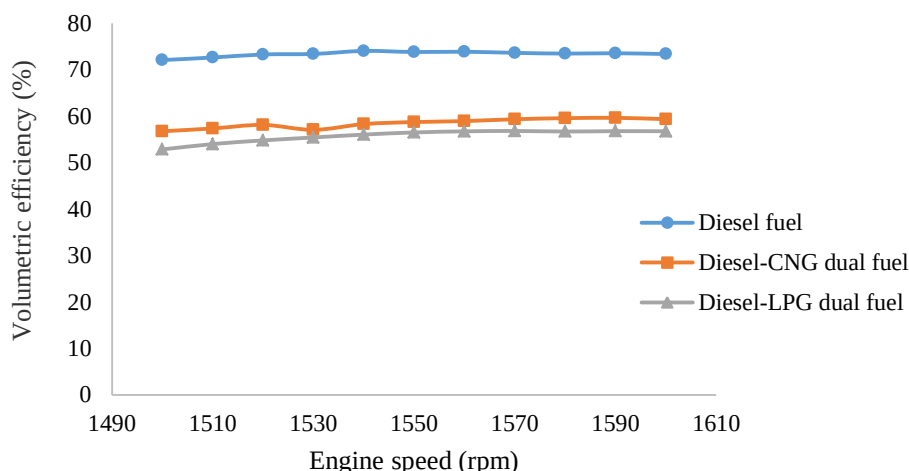
شکل ۷- تغییرات بازده حرارتی ترمزی به صورت تابعی از سرعت دورانی موتور برای حالت‌های گازوئیل خالص و مختلط‌سوز

Fig.7. Variations of brake thermal efficiency with engine speed for pure diesel fuel and dual fuel mode

دماهای مایع خنک کننده ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۶/۸۴ درصد و ۱۹/۹۱ درصد کاهش نشان داد. توماس و همکاران (Thomas et al., 2011) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. همان گونه که جدول ۶ نشان می‌دهد نوع سوخت و دمای مایع خنک کننده نیز اثر متقابل معنی‌داری بر بازده حجمی موتور دارند به طوری که در حالت مختلط‌سوز گازوئیل-CNG و دماهای مایع خنک کننده ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس نسبت به حالت گازوئیل خالص در این دماها بازده حجمی به ترتیب ۱۸/۹۶ درصد، ۱۷/۲۳

در هنگام استفاده از گازوئیل-CNG و گازوئیل-LPG نسبت به گازوئیل خالص بازده حجمی به ترتیب ۲۰/۳۱ درصد و ۲۴ درصد کاهش نشان داد. دلیل کاهش بازده حجمی در هنگام استفاده از سوخت‌های گازی بدین سبب است که این سوخت‌ها به شکل گاز وارد سیلندر شده و نسبت هوا را کاهش می‌دهند (Chaichan, 2014). همچنین مطابق با جدول ۸ دمای مایع خنک کننده‌ی موتور نیز تأثیر معنی‌داری بر بازده حجمی داشت به طوری که با افزایش دمای مایع خنک کننده بازده حجمی کاهش می‌یابد. بازده حجمی در

درصد و ۱۸/۰۱ درصد کاهش نشان داد. در حالت گازوییل-LPG نیز دماهای یاد شده بازده حجمی را به ترتیب ۲۴/۸۲ درصد، ۲۵/۳۶ درصد و ۲۱/۴۶ درصد کاهش دادند.



شکل ۸- تغییرات بازده حجمی به صورت تابعی از سرعت دورانی موتور برای حالت‌های گازوییل خالص و مختلط‌سوز

Fig.8. Variations of volumetric efficiency with engine speed for pure diesel fuel and dual fuel mode

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و تحلیل عملکرد یک موتور دیزل تک سیلندر در حالت مختلط‌سوز و در محدوده عملکرد گاورنر پرداخته شد. متغیرهای نوع سوخت و دمای مایع خنک‌کننده موتور به عنوان متغیرهای اثرگذار بر عملکرد موتور در سرعت‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سوخت‌های گازی به عنوان سوخت اصلی و همراه با مقدار کمی گازوییل (تقریباً ۲۰ درصد کل سوخت مصرفی) در موتورهای دیزل امکان‌پذیر بوده و شاخص‌های عملکردی و احتراقی موتور را در مقایسه با مصرف گازوییل به تنهایی بهبود می‌بخشد. در حالت کارکرد موتور به صورت مختلط‌سوز گازوییل-CNG، گشتاور، توان ترمزی و فشار مؤثر متوسط ترمزی در تمامی سرعت‌های دورانی موتور و در حالت گازوییل-LPG در سرعت‌های پایین موتور به سبب ارزش حرارتی بالای سوخت‌های گازی و همچنین ایجاد یک مخلوط همگن و در نتیجه بهبود احتراق در درون سیلندر به طور معنی‌داری نسبت به حالت گازوییل خالص افزایش یافتند. در دوره‌های پایین موتور، افزایش دمای مایع خنک‌کننده موجب کاهش مصرف سوخت ویژه و مصرف انرژی ویژه ترمزی می‌شود. همچنین در حالت کارکرد موتور به صورت

مختلط‌سوز گازوییل-گاز نسبت به حالت کارکرد موتور با سوخت گازوییل خالص، مصرف سوخت و انرژی ویژه ترمزی به سبب ارزش حرارتی بالاتر سوخت‌های گازی و تولید توان بالاتر به طور معنی‌داری کاهش یافتند. بازده حرارتی ترمزی نیز در دوره‌های بالا و در هنگام استفاده از موتور به صورت مختلط‌سوز افزایش معنی‌داری را نشان داد. در دوره‌های پایین موتور افزایش اندکی در بازده حرارتی برای حالت مختلط‌سوز نسبت به سوخت گازوییل خالص مشاهده شد. همچنین افزایش دمای مایع خنک‌کننده به سبب کاهش تلفات حرارتی موتور باعث افزایش در بازده حرارتی شد. به سبب این که سوخت‌های گازی به شکل گاز وارد سیلندر موتور شده و نسبت هوا را کاهش می‌دهند، در هنگام استفاده از موتور به حالت مختلط‌سوز بازده حجمی کاهش معنی‌داری را نشان داد. همچنین افزایش دمای مایع خنک‌کننده نیز بازده حجمی را به صورت معنی‌داری کاهش داد. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان داشت که هنگام استفاده از موتور در حالت مختلط‌سوز گازوییل-CNG و دمای مایع خنک‌کننده ۶۰ درجه سلسیوس بهترین نتیجه روی مشخصه‌های عملکردی و احتراقی موتور در تمامی سرعت‌ها حاصل شد.

References

1. Abdelghaffar, W. A., M. M. Osman, M. N. Saeed, and A. I. Abdelfatteh. 2002. Effects of coolant temperature on the performance and emissions of a diesel engine. Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference. 16885: 187-197. DOI: [10.1115/ICES2002-464](https://doi.org/10.1115/ICES2002-464)
2. Anonymus. 2010. The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use In Transportation Model. GREET Argonne, IL.
3. Ayhan, V., A. Parlak, I. Cesur, B. Boru, and A. Kolip. 2011. Performance and exhaust emission characteristics of a diesel engine running with LPG. International Journal of Physical Sciences 6: 1905-1914. DOI:

10.5897/IJPS11.288

4. Barata, J. M. 1995. Performance and emissions of a dual fueled DI diesel engine. SAE Technical Paper. Report no. 0148-7191. DOI: [10.4271/952364](https://doi.org/10.4271/952364)
5. Bari, S., and S. Hossain. 2019. Performance of a diesel engine run on diesel and natural gas in dual-fuel mode of operation. *Energy Procedia* 160: 215-222. DOI: [10.1016/j.egypro.2019.02.139](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.139)
6. Chaichan, M. T. 2014. Combustion of dual fuel type natural gas/liquid diesel fuel in compression ignition engine. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR JMCE)* 11: 48-58.
7. Chandra, R., V. Vijay, P. Subbarao, and T. Khura. 2011. Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas. *Applied Energy* 88: 3969-3977. DOI: [10.1016/j.apenergy.2011.04.032](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.032)
8. Hariprasad, T. 2013. Effect of injection pressure on performance of dual fuel diesel engine. SAE Technical Paper. Report no. 0148-7191. DOI: [10.4271/2013-01-2887](https://doi.org/10.4271/2013-01-2887)
9. Hossain, A., D. Smith, and P. Davies. 2017. Effects of engine cooling water temperature on performance and emission characteristics of a CI engine operated with biofuel blend. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 5: 46-57. DOI: [10.13044/j.sdewes.d5.0132](https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0132)
10. Jian, D., G. Xiaohong, L. Gesheng, and Z. Xintang. 2001. Study on diesel-LPG dual fuel engines. SAE Technical Paper. Report no. 0148-7191. DOI: [10.4271/2001-01-3679](https://doi.org/10.4271/2001-01-3679)
11. Karagöz, Y., T. Sandalcı, U. O. Koylu, A. S. Dalkılıç, and S. Wongwises. 2016. Effect of the use of natural gas–diesel fuel mixture on performance, emissions, and combustion characteristics of a compression ignition engine. *Advances in Mechanical Engineering* 8 (4): 1-13. DOI: [10.1177/1687814016643228](https://doi.org/10.1177/1687814016643228)
12. Lounici, M. S., K. Loubar, L. Tarabet, M. Balistrrou, D. C. Niculescu, and M. Tazerout. 2014. Towards improvement of natural gas-diesel dual fuel mode: An experimental investigation on performance and exhaust emissions. *Energy* 64: 200-211. DOI: [10.1016/j.energy.2013.10.091](https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.091)
13. Mahla, S. K., V. Singla, S. S. Sandhu, and A. Dhir. 2018. Studies on biogas-fuelled compression ignition engine under dual fuel mode. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 9722-9729. DOI: [10.1007/s11356-018-1247-4](https://doi.org/10.1007/s11356-018-1247-4)
14. Maji, S., A. Pal, and B. Arora. 2008. Use of CNG and diesel in CI engines in dual fuel mode. SAE Technical Paper. Report no. 0148-7191. DOI: [10.4271/2008-28-0072](https://doi.org/10.4271/2008-28-0072)
15. Martyr, A. J., and M. A. Plint. 2011. *Engine testing: theory and practice*. Elsevier.
16. Mehmet, Selim Tangoz, S. O. Akansu, and N. Kahraman. 2019. Alternative Fuels for Internal Combustion Engines. PP 27-55 in A. P. Carlucci eds. *The Future of Internal Combustion Engines*. IntechOpen., London.
17. Najafi, B. 2011. Experimental investigation of the effect of using biodiesel and biogas on dual fuel diesel engine. *Fuel and combustion* 4: 73-85. (In Persian).
18. Najafi, B., V. Pirouzpanah, G. Najafi, T. Yusaf, and B. Ghobadian. 2007. Experimental investigation of performance and emission parameters of a small diesel engine using CNG and biodiesel. SAE Technical Paper. Report no. 2007-32-0075.
19. Nugroho, A., N. Sinaga, and I. Haryanto. 2018. Performance of a compression ignition engine four strokes four cylinders on dual fuel (diesel–LPG). *AIP Conference Proceedings*: 2014, 020166-1–020166-7. DOI: [10.1063/1.5054570](https://doi.org/10.1063/1.5054570)
20. Papagiannakis, R. G. 2018. Comparative Assessment for Improvement of Performance and Exhaust Emissions in Existing Dual-Fuel Diesel Engines. *Journal of Energy Engineering* 144 (5): 04018054 DOI: [10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000572](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000572)
21. Santosh, B., and S. Kumarappa. 2015. Engine Performance and Emission Characteristics of a Single Cylinder Four Stroke CI Engine on Dual Fuel Mode by Using Compressed Biogas as a Fuel. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 3 (9): 376-382.
22. Thomas, S., A. Saroop, R. Rajak, and S. Muthiah. 2011. Investigation on the effect of coolant temperature on the performance and emissions of naturally aspirated gasoline engine. SAE Technical Paper. Report no. 0148-7191. DOI: [10.4271/2011-26-0089](https://doi.org/10.4271/2011-26-0089)
23. Wei, L., and P. Geng. 2016. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. *Fuel Processing Technology* 142: 264-278. DOI: [10.1016/j.fuproc.2015.09.018](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.018)
24. Wei, L., C. Yao, Q. Wang, W. Pan, and G. Han. 2015. Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel. *Fuel* 140: 156-163. DOI: [10.1016/j.fuel.2014.09.070](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.070)
25. Yusaf, T. F., D. Buttsworth, K. H. Saleh, and B. Yousif. 2010. CNG-diesel engine performance and exhaust emission analysis with the aid of artificial neural network. *Applied Energy* 87 (5): 1661-1669 DOI: [10.1016/j.apenergy.2009.10.009](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.009)



Economic Evaluation of using Different Tillage Methods and Crop Rotation in Rain-Fed Wheat Cultivation

S. M. Seyedan¹, A. Heidari^{2*}

1- Assistant Professor of Economic, Social and Extension Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Hamedan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering Research, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension organization (AREEO), Hamadan, Iran

(*- Corresponding Author Email: heidari299@gmail.com)

DOI: [10.22067/jam.2021.68182.1008](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68182.1008)

Received: 06-01-2021

Revised: 15-06-2021

Accepted: 22-09-2021

Available Online: 22-09-2021

How to cite this article:

Seyedan, S. M., and A. Heidari. 2022. Economic Evaluation of using Different Tillage Methods and Crop Rotation in Rain-Fed Wheat Cultivation. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 367-377. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.2021.68182.1008](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68182.1008)

Introduction

Soil protection against water and wind erosion is of great importance. Since most soils of arid and semi-arid regions of Iran are poor in organic matter and continuous use of conventional tillage (moldboard plow) has increased the severity of soil organic matter depletion and degradation of soil structure. Therefore replacing conventional tillage with conservation tillage (reduced tillage and no tillage) is needed to improve soil structure and increase soil organic matter. Due to the increasing population growth and the limitation of arable land, it is necessary to remove the fallow year in dryland. Legumes are crops that can be in rotation with wheat.

Materials and Methods

This study was conducted to evaluate the effect of crop rotation and different tillage systems on rain-fed wheat farming in Kaboudarahang Township during 2012-2014. The experiment was conducted as split-plot in a randomized complete block design with three replications. In this study, different crop rotations including fallow-wheat rotation, and chickpea-wheat rotation as main plots and different tillage systems including conventional tillage (moldboard plow + power harrow), conservation tillage (chisel plow equipped with roller), conservation tillage (sweep plow equipped with roller) and direct drilling were investigated as subplots.

In the economic evaluation of this project, the economic impacts of the treatments were analyzed using the partial budgeting method and the cost-benefit ratio. For this purpose, the difference between treatments income and cost compared with control treatment has been calculated and compared. The differences in the benefits of the treatments are due to the different yields of wheat.

Results and Discussion

Results showed:

1- The highest wheat yield in the first and second years of the study was 605.3 and 2135.1 kg ha⁻¹, respectively in rotation of fallow wheat.

2- In the first year, the highest wheat yield (690.7 kg ha⁻¹) was related to direct planting (no tillage), but in the second year, the highest yield (2268.6 kg ha⁻¹) was related to conservation tillage (sweep blades + roller).

3- In the first and second year, the highest value of treatment was related to direct planting and conservation tillage (sweep tiller + roller), respectively.

4- In the chickpea-wheat rotation, the highest net income in the first and second year was related to direct planting and conservation tillage (sweep + roller), respectively. The benefit-cost ratio in the conservation tillage (sweep + roller) (second year) and direct drilling (first year) methods shows that for each rial of expenses, 5.7 and 2.8 rials can be earned respectively. Therefore, economically, these tillage treatments are superior to the control treatment (conventional cultivation).

5- In the wheat rotation, the highest net income in the first and second year was related to direct planting and conservation tillage (sweep + roller), respectively. The benefit-cost ratio in the conservation tillage (sweep + roller) (second year) and direct drilling (first year) methods shows that for each rial of expenses, 4.2 and 1.3 rials can be earned respectively. Therefore, it is economically justified and these tillage treatments are superior to the control treatment (conventional tillage).

Conclusion

The results of this study showed that in the first and second years, economically the direct method and the conservation tillage treatment (sweep blades + roller) were superior to the conventional method, respectively. Therefore, conservation tillage methods can be replaced by the conventional method (plowing with moldboard plow) in dryland farming. Also, in dry years, direct cultivation (no tillage) is a good and economical method.

Keywords: Chickpea, Conservation tillage, Cost-benefit ratio, Fallow, Net value, No-till, Wheat

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۶۷-۳۷۷

ارزیابی اقتصادی اثر به‌کارگیری روش‌های مختلف خاک‌ورزی و تناوب زراعی در کشت گندم

دیم

سید محسن سیدان^۱، احمد حیدری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

چکیده

انجام عملیات خاک‌ورزی مرسوم در اراضی دیم منجر به مشکلاتی نظیر فرسایش آبی و بادی خاک و ایجاد گرد و غبار می‌شود. علی‌رغم این‌که انجام عملیات خاک‌ورزی حفاظتی در طول دوره آیش، روش شناخته شده‌ای برای کاهش فرسایش خاک است، اما هنوز عمده اراضی دیم استان همدان تحت خاک‌ورزی مرسوم قرار دارند. فرسایش خاک در استان همدان عمدتاً به علت کاهش کیفیت خاک و تأثیر آن بر کاهش عملکرد محصولات، سالانه هزینه‌های درون مزرعه‌ای قابل ملاحظه‌ای را بر کشاورزان منطقه تحمیل می‌نماید. از طرفی زارعین در صورتی در راستای حفاظت از خاک سرمایه‌گذاری انجام خواهند داد که منافع حاصله بیش از هزینه‌های آن باشد. این پژوهش به منظور ارزیابی اقتصادی اثر تناوب زراعی و روش‌های مختلف خاک‌ورزی در زراعت گندم دیم، در شهرستان کبودرآهنگ در دو سال زراعی ۱۳۹۱-۹۲ و ۹۳-۱۳۹۲ اجرا گردید. برای این منظور اثرات اقتصادی ناشی از اعمال تیمارها با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی و شاخص نسبت منفعت به هزینه مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و در سه تکرار انجام شد. در این تحقیق تأثیر دو تناوب زراعی شامل آیش-گندم و نخود-گندم به‌عنوان عامل اصلی و روش‌های مختلف خاک‌ورزی شامل روش مرسوم (گاواهن برگرداندار + سیکلوتیلر)، خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چپزل با تیغه‌های قلمی + غلتک)، خاک‌ورزی حفاظتی (گاواهن چپزل با تیغه‌های پنجه‌غازی + غلتک) و کشت مستقیم (بی‌خاک‌ورزی) به‌عنوان عامل فرعی بر عملکرد و هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که در سال خشک (۹۲-۱۳۹۱) تیمار بی‌خاک‌ورزی (کشت مستقیم) در مقایسه با سایر روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی عملکرد بیشتری (حدود ۲۵ درصد) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم داشت و از نظر اقتصادی درآمد خالص به میزان ۳۳۵۷ هزار ریال در هکتار افزایش داشته است و دارای نسبت به منفعت به هزینه ۲/۸ است که عدد قابل قبولی است. در سال دوم (۹۳-۱۳۹۲) که آبیاری تکمیلی انجام شد از نظر اقتصادی و میزان عملکرد محصول، تیمار خاک‌ورزی حفاظتی (گاواهن چپزل با تیغه‌های پنجه‌غازی + غلتک) نسبت به سایر تیمارهای خاک‌ورزی برتری داشت. این تیمار نسبت به روش مرسوم عملکرد گندم را ۶/۲ درصد و درآمد را ۲۸۹۷ هزار ریال در هکتار افزایش داد، شاخص نسبت منفعت به هزینه در این تیمار برابر با ۵/۷ است که نشان‌دهنده توجیه‌پذیری این روش است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان در کشت دیم گندم روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی را جایگزین روش مرسوم نمود.

واژه‌های کلیدی: آیش، بی‌خاک‌ورزی، درآمد خالص، خاک‌ورزی حفاظتی، گندم، منفعت به هزینه، نخود

مقدمه

مقوله توسعه پایدار به‌عنوان محوری‌ترین اهداف توسعه‌ای در

۱- استادیار بخش تحقیقات اقتصادی، اجتماعی و ترویج کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران

۲- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران

(*) نویسنده مسئول:

(Email: heidari299@gmail.com)

DOI: 10.22067/jam.2021.68182.1008

بخش کشاورزی کشور زمانی محقق خواهد شد که منابع پایه نظیر خاک در چارچوب ضوابط فنی حفاظت‌شده و به‌صورت اصولی مورد بهره‌برداری قرار گیرند. حفاظت خاک به مجموعه اقداماتی که به منظور پیشگیری و کنترل آلودگی و تخریب و فرسایش خاک و تبعات آن انجام می‌شود و موجب تقویت پایداری خاک یا سبب افزایش حاصلخیزی آن می‌شود گفته می‌شود (Soil and Water Research Institute, 2019). علت عمده فرسایش خاک استفاده بیش از حد از آن است. از جمله عوامل از بین رفتن خاک سوزاندن باقی‌مانده محصولات کشاورزی پس از درو در کشورهای کمتر توسعه‌یافته و نابودی جنگل‌ها و بیابان‌زایی است (Vieth et al.,

2001). به‌طور کلی می‌توان گفت هرگونه سرمایه‌گذاری که باعث حفظ و یا افزایش بهره‌وری و یا جلوگیری از کاهش بهره‌وری بالقوه زمین شود، حفاظت خاک محسوب می‌شود. حفاظت خاک یک مسئله اقتصادی است چرا که نوعی سرمایه‌گذاری جاری جهت کسب درآمدهای بیشتر در آینده است. خاک زراعی یکی از مهم‌ترین نهاده‌ها در فرایند تولید محصولات کشاورزی است که کیفیت آن نقش مهمی در میزان عملکرد محصول و رسیدن به امنیت غذایی و توسعه پایدار دارد. به‌طوری‌که پایین بودن میزان تولیدات کشاورزی ایران در مقایسه با استانداردهای جهانی را به میزان زیادی به کاهش مداوم حاصلخیزی خاک‌های زراعی نسبت می‌دهند (Refahi, 2012).

حفظ خاک از فرسایش آبی و بادی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. از آنجا که اکثر خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران از نظر ماده آلی ضعیف بوده و استفاده مداوم از گاوآهن برگرداندار برای شخم بر شدت کم شدن ماده آلی خاک و از بین رفتن ساختمان خاک افزوده است، بنابراین، جایگزین نمودن خاک‌ورزی مرسوم با خاک‌ورزی حفاظتی (کم خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی) به‌منظور بهبود ساختمان خاک و افزایش ماده آلی خاک نیاز می‌باشد (Mirza shahi and Bazargan, 2015). همچنین کاربرد فن‌آوری‌های مطلوبی همانند سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی به‌عنوان یکی از روش‌های کاربردی در کشاورزی پایدار می‌تواند سبب کند کردن روند تخریب زمین‌های زراعی و افزایش پایداری در کشاورزی گردد. متأسفانه متوسط میزان فرسایش سالانه خاک ناشی از عوامل طبیعی و غیر طبیعی در ایران معادل ۳۳ تن در هکتار گزارش شده است. این پدیده سالانه هزینه‌های درون مزرعه‌ای چشمگیری را بر کشاورزان به علت کاهش کیفیت خاک و عملکرد محصولات و نیز هزینه‌های برون مزرعه‌ای فراوانی بر جامعه تحمیل می‌نماید (Refahi, 2012). در این زمینه عدم اعمال عملیات حفاظت خاک از سوی زارعین به جهت عدم آگاهی از منافع اقتصادی، اجتماعی آن به‌عنوان یکی از دلایل اصلی این پدیده به‌شمار می‌رود. برای حفاظت آب و خاک از روش‌های مکانیکی و غیرمکانیکی استفاده می‌شود. عملیات مکانیکی شامل تراس‌بندی، احداث بندهای خاکی و سنگی، بادشکن‌ها، کانال‌های زهکشی و ایجاد آبراهه‌های انحرافی است که نوعی مبارزه مستقیم با فرسایش خاک است و اجرای آن‌ها مشکل و نیازمند صرف هزینه زیادی است. عملیات غیر مکانیکی عبارت از پیشگیری از فرسایش خاک با انجام یکسری عملیات مدیریتی صحیح می‌باشد که این روش‌ها نسبتاً ارزان بوده و کاربرد آن‌ها در هر شرایطی امکان‌پذیر است. این روش‌ها شامل مدیریت بهینه خاک نظیر مصرف کودهای آلی و نیز مدیریت زراعی شامل مالچ‌پاشی، کشت روی خطوط تراز، تناوب‌های زراعی و کشت نواری می‌باشد (Refahi, 2012; Refahi, 2017; Ghadiri, 1993; Morgan, 1995).

مناطق دیم مدیرانه‌ای، عملکرد گندم در روش بی‌خاک‌ورزی بیشتر از روش شخم با گاوآهن برگرداندار بود و برعکس در سال‌های پر باران، عملکرد گندم در روش خاک‌ورزی مرسوم بهتر بود. همچنین اثرات متقابل خاک‌ورزی و تناوب در سال‌های خشک معنی‌دار بوده به طوری که به‌ترتیب تناوب نخود- گندم، باقلا- گندم، آیش- گندم نسبت به بقیه تناوب‌ها از عملکرد بالایی برخوردار بودند (Lopez-Bellido et al., 1996). اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر عملکرد گندم با توجه به شرایط بارندگی منطقه می‌تواند متفاوت باشد به‌طوری‌که در مناطق خشک‌تر، خاک‌ورزی حفاظتی به‌دلیل افزایش راندمان مصرف آب موثرتر بوده در حالی که هرچه بارندگی‌ها مناسب‌تر شده، اثر خاک‌ورزی حفاظتی (به‌دلیل کافی بودن رطوبت) کاهش پیدا کرد (Cantero-Martinez et al., 2007). دستاورد سایر محققین در رابطه با اثرات بلندمدت تناوب‌های زراعی مختلف و روش‌های متفاوت خاک‌ورزی بیانگر افزایش عملکرد گندم در شرایط دیم به میزان ۷۸٪ در روش خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به روش خاک‌ورزی مرسوم بوده است (Mejhed and Sander, 1998).

پژوهشگران از روش‌های متفاوتی برای برآورد منافع حاصل از حفاظت خاک استفاده کرده‌اند. در جمهوری دومینیک برای یک دوره ۲۵ ساله به روش برآورد تابع عملکرد، درآمد خالص حفاظت خاک از طریق حفظ بقایای گیاهی، ۲۶۰ دلار دومینیک در هر هکتار برآورد شده است (Veloz et al., 1985). اثر فرسایش خاک بر کاهش درآمد کشاورزان را به روش تخمین تابع عملکرد در منطقه پالوز آیداهوی شمالی و واشنگتن غربی، به‌ترتیب ۴ و ۶ دلار در جریب برآورد کردند (Walker and Young, 1986). ارزش خسارت فرسایش بادی خاک روی خانوارها در نیومکزیکو به روش هزینه جایگزینی، حدود ۴۵۴ میلیون دلار در سال برآورد شد (Husar, 1989). ارزش حفاظت خاک در بازار کشت و کار مانیلای استرالیا را به روش هدونیک (قیمت‌گذاری بر اساس اصل لذت‌گرایی) حدود ۲/۲۸ دلار در هکتار تخمین زدند (King and Sinden, 1998). به‌منظور ارزیابی اقتصادی روش‌های حفاظت خاک در مناطق کوهستانی اتیوپی، سود زارعین در دو حالت با حفاظت و بدون حفاظت خاک محاسبه و سپس سود خالص تنزیل شده از تفاوت آن دو به‌دست آمد. نتایج نشان داد که منافع حفاظت خاک، کم بوده و کشاورزان خرده‌پا حاضر به انجام آن نبودند. مگر این که یارانه داده شود. از آنجا که دادن یارانه هزینه‌بر و توجیه آن مشکل بود، در نهایت بهترین سیاست را پایین آوردن هزینه روش‌های حفاظت خاک دانستند (Shiferaw and Holden, 1998). برای برآورد منافع حفاظت خاک جنگل زراعی در ویسایاس شرقی فیلیپین، ابتدا شاخص حفاظت خاک را محاسبه و مدل پروبیت را برای بررسی عوامل مؤثر بر قبول تکنولوژی جنگل زراعی برآورد کردند و در نهایت از تابع سود برآوردی

نسبت به متغیر شاخص کیفیت خاک مشتق گرفته و ارزش نهایی حفاظت خاک را محاسبه کردند. آن‌ها در واقع از روش هکمن دو مرحله‌ای استفاده نمودند (Pattanayak and Mercer, 1998). برای برآورد منافع حفاظت خاک در یک طرح آبخیزداری در سریلانکا از روش فایده هزینه اجتماعی استفاده کردند و نشان دادند که منافع حاصله در بیرون از مزرعه‌ای که حفاظت خاک انجام شده بیشتر از منافع آن در درون مزرعه است (Viet et al., 2001). هزینه فرسایش خاک را با استفاده از روش هزینه جایگزین با بهره‌گیری از اطلاعات میدانی در عرصه هفت استان برآورد نمودند. یافته‌ها نشان داد که میانگین هزینه سالانه فرسایش خاک برای کل اراضی گندم دیم کشور، (۳۹۵۱ هزار هکتار) تقریباً ۸۰۷ میلیارد ریال می‌باشد (Ghorbani and Hosseini, 2006).

قهرمانزاده (Ghahremanzadeh, 2002) برای محاسبه منافع حفاظت خاک در اراضی دیم با استفاده از آمار و اطلاعات قربانی و حسینی (Ghorbani and Hosseini, 2006)، به تفکیک برای مزارعی که شخم موازی و عمود بر شیب زمین زده بودند، ابتدا عملکرد گندم را به‌عنوان تابعی از مؤلفه‌های خاک برآورده کرده و در نهایت با استفاده از بخشی از کارهای پاتاناکاک و مرسر (Pattanayak and Mercer, 1998) منافع حفاظت خاک را برآورد نمود. وی متوسط سود سالانه بهره‌بردار ناشی از شخم حفاظتی را بین ۸۷۸۵ تا ۱۲۰۱۳ ریال در هکتار برای استان‌های مختلف محاسبه نمود. عقیلی (Akheli, 2003) ارزش هزینه‌های درون مزرعه‌ای فرسایش خاک در کشور را به روش هزینه جایگزینی مواد مغذی، حدود ۷۷۶۲ میلیارد ریال محاسبه نمود. هدف از این پژوهش، برآورد نسبت منفعت به هزینه عملیات حفاظت خاک شامل سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی و تناوب زراعی در اراضی گندم دیم شهرستان کبودرآهنگ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در ایستگاه تحقیقاتی تحرک مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان در خاکی با بافت لوم رس سیلتی در طی دو سال زراعی ۱۳۹۱-۹۲ و ۱۳۹۲-۹۳ اجرا شد. این ایستگاه در موقعیت جغرافیایی ۴۸/۴۵ طول شرقی و ۳۵/۱۴ عرض شمالی واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۷۰۰ متر و میانگین

بارندگی بلند مدت محل آزمایش ۳۳۲/۷ میلی‌متر است (Iran Meteorological Organization, 2014). در حالی که میانگین بارندگی در سال زراعی ۱۳۹۱-۹۲، ۱۹۰ میلی‌متر و در سال زراعی ۱۳۹۲-۹۳، ۱۷۰ میلی‌متر گزارش شده است. لازم به توضیح است که آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۱-۹۲ تحت شرایط معمول در حالی که در سال زراعی ۱۳۹۲-۹۳، آبیاری تکمیلی به میزان ۹۰ میلی‌متر در سه مرحله در بهار سال ۱۳۹۳ انجام شد. این پژوهش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تاثیر دو نوع تناوب زراعی (۱- آیش-گندم و ۲- نخود-گندم) به‌عنوان عامل اصلی در کرت‌های اصلی و روش خاک‌ورزی (شامل ۱- روش مرسوم (شخم باگاوآهن برگرداندار+ سیکلوتیلر)، ۲- خاک‌ورزی حفاظتی (گاوآهن چپزل با تیغه‌های قلمی+ غلتک)، ۳- خاک‌ورزی حفاظتی (گاوآهن چپزل با تیغه‌های پنجه‌غازی+ غلتک) و ۴- بی‌خاک‌ورزی (کشت مستقیم)) به‌عنوان عامل فرعی در کرت‌های فرعی بر عملکرد گندم و هزینه‌های تولید مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد پلات‌ها ۱۰×۲۵ متر و فاصله بلوک‌ها از یکدیگر ۱۰ متر بود. جهت بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، قبل از کشت یک نمونه خاک مرکب از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک تهیه و به آزمایشگاه خاک و آب منتقل شد. نتایج آزمایش خاک در جدول ۱ و مشخصات کاشت در جدول ۲ و نیز مشخصات فنی ادوات مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است. عملیات آماده‌سازی بستر برای کاشت گندم دیم در سه روش خاک‌ورزی مرسوم، خاک‌ورزی حفاظتی با خاک‌ورز مرکب (گاوآهن چپزل با تیغه قلمی+ غلتک) و خاک‌ورزی حفاظتی با خاک‌ورز مرکب (گاوآهن چپزل با پنجه‌غازی و غلتک) با دستگاه عمیق‌کار مدل الوند شرکت ماشین برزگر انجام شد. همچنین در روش بی‌خاک‌ورزی (کشت مستقیم)، از بذکار کشت مستقیم دیم شرکت ماشین برزگر استفاده شد. لازم به توضیح است که تمام کود فسفات و دو سوم کود اوره توصیه شده بر اساس نتایج آزمون خاک در پاییز و مابقی کود اوره در بهار مصرف گردید. پس از عملیات برداشت، بقایای ایستاده گندم و نیز بقایای نخود بعد از انجام عملیات برداشت، برای کشت بعدی حفظ می‌شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک محل آزمایش

Table 1- Some soil physical and chemical properties of the test site

عمق خاک	هدایت الکتریکی	اسیدیته خاک	کربن-آلی	نیتروژن کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	شن	سیلت	رس	بافت
Soil depth (cm)	Electrical conductivity (dS.m ⁻¹)	pH	O.C (%)	Total nitrogen (%)	Available phosphorus (mg.kg ⁻¹)	Available potassium (mg.kg ⁻¹)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture
0-30	0.84	8.05	0.38	0.03	11.20	310	49	25	26	Silty Clay Loam

جدول ۲- تاریخ کاشت و سایر مشخصات
Table 2- Planting date and other specifications

مکان آزمایش Experiment site	سال Year	محصول کشت شده Crop cultivated	تاریخ کاشت Planting date	رقم Cultivar	مقدار بذر مصرفی Amount of seed (kg.ha ⁻¹)	مقدار کود مصرفی Amount of fertilizet (kg.ha ⁻¹)	
						فسفات آمونیم (%۴۶ فسفر) Ammonium phosphate (%46 P)	اوره (%۴۶ ازت) Urea (%46 N)
ایستگاه تحقیقاتی تجرک Tajarak Research Station	۱۳۹۱-۱۳۹۳	گندم Wheat	مهرماه October	سرداری Sardary	120	30	75
	2012-2014	نخود Chickpea	آذرماه December	آزاد Azad	80	30	75

جدول ۳- مشخصات فنی ادوات مورد استفاده
Table 3- Technical specifications of used machines

نوع ادوات کشاورزی Implements	عرض کار Working width (cm)	مشخصات فنی Technical specifications
گاواهن برگرداندار Moldboard plow	90	سوارشونده، سه خیش Mounted, three bottoms
خاک‌ورز حفاظتی Conservation tiller	200	مج‌زه به تیغه‌های قلمی (قابل تعویض با تیغه‌های پنجه‌غازی) و غلتک- ساخت شرکت ماشین برزگر همدان Equipped with chisel blades (replaceable with sweep blades) and roller- Hamedan Barzegar Machine Company
سیکلوتیلر (کلوخه خردکن دوار+بسترساز) Power harrow	250	مدل HRB 225 D- مج‌زه به غلتک HRB 252D model- equipped with roller
عمیق‌کار Deep drill	230	مدل الوند - ۱۳ ردیفه- فاصله بین ردیف ۱۷ سانتی‌متر- ساخت شرکت ماشین برزگر همدان Alvand model, No. of rows=13, Space rows=17cm Hamedan Barzegar Machine Company
بذرکار کودکار کشت مستقیم دیم Direct drill	295	سوار شونده- مدل (NT-DFD-11)- ۱۱ ردیفه- فاصله بین ردیف ۲۰ سانتی‌متر- ساخت شرکت ماشین برزگر همدان NT-DFD-11 model, No. of rows=11, Space rows=20cm Hamedan Barzegar Machine Company

بودن عملکرد گندم است (Zare Mehrjerdi, 2015).

رابطه (۱) روش بودجه‌بندی جزئی را نشان می‌دهد. NB: سود/ زیان، Dib اختلاف منافع تیمار با شاهد و Dic اختلاف هزینه تیمار با شاهد را نشان می‌دهد.

$$NB = (Dib - Dic) \quad (1)$$

در روش دوم نسبت میانگین منافع (B) به هزینه‌های هر یک از تیمارها (C) محاسبه شده است. برای این منظور منفعت هر یک از تیمارها از حاصل ضرب عملکرد و قیمت محصول حاصل شده است. هزینه‌ها شامل هزینه ثابت و متغیر است. هزینه ثابت، شامل هزینه‌هایی است که به مقدار تولید بستگی ندارد و هزینه متغیر، شامل هزینه‌هایی است که به مقدار تولید وابسته است. هزینه متغیر شامل

روش اقتصادی تحقیق

در ارزیابی اقتصادی این پروژه، اثرات اقتصادی ناشی از اعمال تیمارها با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی^۱ و شاخص نسبت منفعت به هزینه^۲ مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور اختلاف درآمد و هزینه تیمارها نسبت به شاهد (شخم با گاواهن برگرداندار و تهیه بستر با سیکلوتیلر) محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته است. هزینه‌های مورد بررسی شامل هزینه عملیات خاک‌ورزی و کاشت در تناوب‌های مختلف است. اختلاف در منافع تیمارها، ناشی از متفاوت

- 1- Partial Budjecting
- 2- Benfit-cost- ratio

تهیه زمین، بذر، کاشت بذر، کود شیمیایی، کنترل علف هرز، برداشت، کوبیدن و تمیزکردن محصول، کارگری، تعمیر و نگهداری ادوات و ماشین‌آلات و هزینه سوخت است. هزینه ثابت شامل استهلاک ادوات و ماشین‌آلات و بهره سرمایه است. در این معیار در صورتی که شاخص (B/C) بزرگتر از یک باشد گزینه مورد نظر دارای توجیه اقتصادی، اگر کوچکتر از یک باشد فاقد توجیه اقتصادی و برابر با یک بدین معنی است که با مقدار عملکرد حاصل شده در نقطه سر به سر قرار دارد (رابطه ۲) (Soltani and Najafi, 2007).

$$\text{Benefit/ Cost} = B/C$$

(۲)

نتایج و بحث

در جدول ۴ اثر تناوب زراعی در سال اول بر عملکرد گندم معنی‌دار بود در حالی که در سال دوم، تناوب زراعی اثر معنی‌داری بر عملکرد گندم نداشت. بیشترین عملکرد گندم در سال اول و دوم

جدول ۴- میانگین عملکرد گندم در تناوب‌های مختلف زراعی

Table 4- Average wheat yield in different crop rotations

تناوب زراعی Crop rotation	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)		میانگین Average
	سال اول First year	سال دوم Second year	
آیش-گندم Fallow-wheat	605.3 ^a	2135.1 ^a	1379.6 ^a
نخود-گندم Chickpea-wheat	477.1 ^b	2085.3 ^a	1281.2 ^a

اعداد هر ستون که دارای حرف‌های یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱٪ ندارند.

The numbers of each column having the same letters do not differ statistically based on Duncan's multiple range tests at the 1% level.

خاک‌ورز مرکب (تیغه‌های پنجه‌غازی و غلطک) با میانگین عملکرد ۲۴۰۵/۳ کیلوگرم در هکتار حاصل شد.

برای ارزیابی اقتصادی، هزینه و درآمد هر یک از تیمارها در طی دو سال محاسبه شد. جدول ۷ منافع و هزینه‌های خاک‌ورزی را در چهار تیمار خاک‌ورزی نشان می‌دهد. در این محاسبات هزینه شخم با گاواهن برگرداندار و سیکلوتیلر ۲۰۰۰ هزار ریال در هکتار، هزینه خاک‌ورزی با خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چپزل با تیغه قلمی و غلتک) ۸۰۰ هزار ریال در هکتار، هزینه خاک‌ورزی با خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چپزل با پنجه‌غازی و غلتک) ۸۰۰ هزار ریال در هکتار، هزینه کارنده کشت مستقیم ۸۰۰ هزار ریال و هزینه کاشت با بذرکار معمولی (عمیق‌کار) ۴۰۰ هزار ریال در هکتار در نظر گرفته شده است. قیمت گندم ۱۲۷۰۵ ریال در هر کیلوگرم در محاسبات مربوط به تعیین منافع لحاظ شده است. به این ترتیب در سال اول و دوم بیشترین ارزش تیمار به‌ترتیب مربوط به کشت مستقیم و خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چپزل با پنجه‌غازی + غلتک) است (جدول ۷).

در جدول ۵ میزان عملکرد گندم را در ۴ روش خاک‌ورزی نشان می‌دهد. در سال اول بیشترین عملکرد گندم با ۶۹۰/۷ کیلوگرم در هکتار مربوط به کشت مستقیم (بدون خاک‌ورزی) است ولی در سال دوم تحقیق بیشترین عملکرد با ۲۲۶۸/۶ کیلوگرم در هکتار مربوط به خاک‌ورزی حفاظتی (گاواهن چپزل با تیغه‌های پنجه‌غازی + غلتک) است. می‌توان نتیجه گرفت که در سال‌های خشک، کشت مستقیم (بی‌خاک‌ورزی) احتمالاً به دلیل حفظ بیشتر رطوبت خاک می‌تواند عملکرد بیشتری داشته باشد. نتایج به‌دست آمده با گزارشات لوپز بلیدو و همکاران (Lopez-Bellido et al., 1996) و کانتر و مارتینز و همکاران (Cantero-Martinez et al., 2007) مطابقت دارد.

جدول ۶ اثرات متقابل تناوب زراعی و خاک‌ورزی بر عملکرد گندم را نشان می‌دهد. در سال اول بیشترین عملکرد گندم مربوط به تناوب زراعی آیش-گندم و روش کشت مستقیم (بی‌خاک‌ورزی) با میانگین عملکرد ۶۵۲/۷ کیلوگرم در هکتار بود. در سال دوم بیشترین عملکرد گندم در تناوب زراعی آیش-گندم و روش خاک‌ورزی با

جدول ۵- میانگین عملکرد گندم در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی

Table 5- Average wheat yield in different tillage methods

روش خاک‌ورزی Tillage method	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)		
	سال اول First year	سال دوم Second year	میانگین Average
خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + سیکلوتیلر) Conventional tillage (Moldboard plow+Power harrow)	552.4 ^c	2135.1 ^{ab}	1343.8 ^{ab}
خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چیزل با تیغه قلمی + غلتک) Conservation tiller (Chisel blade+Roller)	612 ^b	1902.3 ^b	1257.2 ^b
خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چیزل با تیغه پنجه‌غازی + غلتک) Conservation tiller (Sweep blade+Roller)	540.3 ^c	2268.6 ^a	1404.4 ^a
کشت مستقیم (بدون خاک‌ورزی) Direct drill (no-till)	690.7 ^a	1964.8 ^{ab}	1327.7 ^{ab}

اعداد هر ستون که دارای حرف‌های یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱٪ ندارند.

The numbers of each column having the same letters do not differ statistically based on Duncan's multiple range tests at the 1% level.

جدول ۶- اثرات متقابل تناوب زراعی و روش‌های خاک‌ورزی بر عملکرد گندم

Table 6- Interactions of crop rotation and tillage methods on wheat yield

تناوب زراعی Crop rotation	روش خاک‌ورزی Tillage method	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)		
		سال اول First year	سال دوم Second year	میانگین Average
آیش-گندم Fallow-wheat	خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + سیکلوتیلر) Conventional tillage (Moldboard plow+Power harrow)	578.3 ^e	2159.7 ^{ab}	1369 ^{abc}
	خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چیزل با تیغه قلمی + غلتک) Conservation tiller (Chisel blade+Roller)	595 ^{de}	2085.3 ^{ab}	1340.2 ^{abc}
	خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چیزل با تیغه پنجه‌غازی + غلتک) Conservation tiller (Sweep blade+Roller)	595 ^{de}	2405.3 ^a	1500.2 ^a
	کشت مستقیم (بدون خاک‌ورزی) Direct drill (no-till)	652.7 ^c	1965.7 ^{ab}	1309.2 ^{abc}
	خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + سیکلوتیلر) Conventional tillage (Moldboard plow+Power harrow)	393 ^g	2304 ^{ab}	1348.7 ^{abc}
نخود-گندم Chickpea-wheat	خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چیزل با تیغه قلمی + غلتک) Conservation tiller (Chisel blade+Roller)	541 ^f	1879 ^{ab}	1165 ^c
	خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چیزل با تیغه پنجه‌غازی + غلتک) Conservation tiller (Sweep blade+Roller)	447 ^f	2061.7 ^{ab}	1254.3 ^{bc}
	کشت مستقیم (بدون خاک‌ورزی) Direct drill (no-till)	617 ^d	2096.7 ^{ab}	1356.8 ^{abc}
	خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + سیکلوتیلر) Conventional tillage (Moldboard plow+Power harrow)	393 ^g	2304 ^{ab}	1348.7 ^{abc}

اعداد هر ستون که دارای حرف‌های یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱٪ ندارند.

The numbers of each column having the same letters do not differ statistically based on Duncan's multiple range tests at the 1% level.

هزینه تهیه زمین، بذر، کاشت بذر، کود شیمیایی، کنترل علف هرز، برداشت، کوبیدن و تمیزکردن محصول می‌باشد. بر این اساس، هزینه تولید یک هکتار نخود ۵۳۰۰ هزار ریال است. با کسر هزینه‌های تولید از ارزش ناخالص، میزان درآمد خالص یک هکتار کشت نخود ۲۷۰۰ هزار ریال برآورد گردید. میزان درآمد و هزینه روش خاک‌ورزی بر اساس تناوب نخود-گندم در جدول ۸ نشان داده شده است. همانطور

جهت لحاظ نمودن اثر تناوب نخود-گندم بر منافع حاصل از تیمارهای خاک‌ورزی لازم است که منافع و هزینه محصول قبلی نیز محاسبه و به نتایج در جدول ۷ اضافه شود. بر این اساس با عملکرد نخود به میزان ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار و با احتساب قیمت هر کیلوگرم نخود ۲۰ هزار ریال، میزان درآمد ناخالص این محصول ۸۰۰۰ هزار ریال محاسبه شده است. هزینه‌های تولید نخود شامل

است. این شاخص در روش‌های خاک‌ورز حفاظتی (گاواهن چیزل با پنجه‌غازی + غلتک) (سال دوم) و کشت مستقیم (سال اول) نشان‌دهنده این است که در ازای هر واحد هزینه، می‌توان به‌ترتیب ۵/۷ و ۲/۸ ریال کسب کرد. بنابراین از نظر اقتصادی دارای توجیه بوده و این تیمارهای خاک‌ورزی نسبت به تیمار شاهد (کشت مرسوم) دارای برتری می‌باشند.

که ملاحظه می‌شود بالاترین درآمد خالص در سال اول و دوم به‌ترتیب مربوط به روش‌های کشت مستقیم و خاک‌ورزی حفاظتی (گاواهن چیزل با پنجه‌غازی + غلتک) می‌باشد. درآمد خالص در روش خاک‌ورز حفاظتی (پنجه‌غازی + غلتک) و کشت مستقیم به‌ترتیب برابر با ۳۰۳۲۳ هزار ریال و ۱۰۶۷۵ هزار ریال در هکتار است. جهت ارزیابی اقتصادی پروژه، از شاخص نسبت منافع به هزینه استفاده شده

جدول ۷- منافع و هزینه گندم در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی

Table 7- Benefits and costs of wheat in different tillage systems

روش خاک‌ورزی Tillage method	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)		ارزش ناخالص Gross value (1000 Rials per hectare)		هزینه خاک‌ورزی و کاشت Cost of tillage and planting (1000 Rials per hectare)	
	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year
خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + سیکلوتیلر) Conventional tillage (moldboard plow+power harrow)	552.4	2135.1	7018	27126	2400	2400
خاک‌ورز حفاظتی (تیغه قلمی + غلتک) Conservation tiller (chisel blade+roller)	612	1902.3	7775	24169	1200	1200
خاک‌ورز حفاظتی (تیغه پنجه‌غازی + غلتک) Conservation tiller (sweep blade+roller)	540.3	2268.6	6865	28823	1200	1200
کشت مستقیم (بدون خاک‌ورزی) Direct drill(no-till)	690.7	1964.8	8775	24963	800	800

جدول ۸- منافع و هزینه سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی در تناوب نخود-گندم

Table 8- Benefits and costs of different tillage systems in chickpea-wheat rotation

روش خاک‌ورزی Tillage method	ارزش ناخالص Gross value (1000 Rials per hectare)		هزینه کل Total cost (1000 Rials per hectare)		ارزش خالص Net value (1000 Rials per hectare)		نسبت منافع به هزینه‌ها The ratio of benefits to costs	
	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year
خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + سیکلونیلر) Conventional tillage (Moldboard plow+Power harrow)	15018	35126	7700	7700	7318	27426	1.9	4.6
خاک‌ورز حفاظتی (تیغه قلمی + غلتک) Conservation tiller (Chisel blade+Roller)	15775	32169	6500	6500	9275	25669	1.4	4.9
خاک‌ورز حفاظتی (تیغه پنجه‌غازی + غلتک) Conservation tiller (Sweep blade+Roller)	14865	36823	6500	6500	8365	30323	1.8	5.7
کشت مستقیم (بدون خاک‌ورزی) Direct drill (no-till)	16775	32963	6100	6100	10675	26863	2.8	5.4

هزینه سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی با روش خاک‌ورزی مرسوم مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس نتایج این پژوهش در سال اول کشت مستقیم با ۳۳۵۷ هزار ریال در هکتار بیشترین ارزش خالص را

به‌منظور نشان دادن تغییرات درآمد خالص در هر یک از سیستم‌های خاک‌ورزی اعمال شده نسبت به شاهد، از روش بودجه‌بندی جزئی استفاده شده است. برای این منظور اختلاف درآمد و

ریال در هکتار، نسبت به روش خاک‌ورزی مرسوم دارا بوده است (جدول ۹).

در میان سایر روش‌های خاک‌ورزی نسبت به روش کشت مرسوم داشته است و در سال دوم روش خاک‌ورزی حفاظتی (گاواهن چیزل با پنجه‌غازی + غلتک) بالاترین ارزش خالص را با میزان ۲۸۹۷ هزار

جدول ۹- تغییرات منافع و هزینه سیستم‌های خاک‌ورزی نسبت به کشت مرسوم در تناوب نخود-گندم

Table 9- Changes in benefits and costs of tillage systems compared to conventional cultivation in chickpea-wheat rotation

روش خاک‌ورزی Tillage method	تغییرات ارزش ناخالص Gross value changes (1000 Rials per hectare)		تغییرات هزینه کل Total cost changes (1000 Rials per hectare)		تغییرات ارزش خالص Net value changes (1000 Rials per hectare)	
	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year
	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year	سال اول First year	سال دوم Second year
خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + سیکلوتیلر) Conventional tillage (Moldboard plow+Power harrow)	-	-	-	-	-	-
خاک‌ورز حفاظتی (تیغه قلمی + غلتک) Conservation tiller (Chisel blade+Roller)	757	-2957	-1200	-1200	1957	-1757
خاک‌ورز حفاظتی (تیغه پنجه‌غازی + غلتک) Conservation tiller (Sweep blade+Roller)	-153	1697	-1200	-1200	1047	2897
کشت مستقیم (بدون خاک‌ورزی) Direct drill (no-till)	1757	-2163	-1600	-1600	3357	-563

نتیجه‌گیری

حفاظتی (گاواهن چیزل با تیغه‌های پنجه‌غازی + غلتک) نسبت به سایر تیمارهای خاک‌ورزی برتری داشت. این تیمار نسبت به روش مرسوم عملکرد گندم را ۶/۲ درصد افزایش داد. بالاترین نسبت منفعت به هزینه مربوط به تیمار خاک‌ورز حفاظتی (تیغه پنجه‌غازی + غلتک) با عدد ۵/۷ است که نشان می‌دهد به ازای هر واحد هزینه در این روش ۵/۷ واحد منفعت حاصل می‌شود. در روش مرسوم این نسبت برابر با ۴/۶ است. بنابراین می‌توان روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی را جایگزین روش مرسوم (گاواهن چیزل با شخم با گاواهن برگرداندار) در زراعت دیم نمود. همچنین در سال‌های خشک، استفاده از کشت مستقیم (بی‌خاک‌ورزی) روشی مناسب و اقتصادی می‌باشد. از نظر عملکرد گندم در هر دو سال آزمایش، تناوب آیش-گندم نسبت به تناوب نخود-گندم برتری داشت. در سال اول و دوم به ترتیب تناوب آیش-گندم و کشت مستقیم و تناوب آیش-گندم و خاک‌ورزی حفاظتی با خاک‌ورز مرکب (تیغه‌های پنجه‌غازی و غلتک) بیشترین عملکرد را به خود اختصاص دادند.

با توجه به یافته‌های منتج از این پژوهش تأثیر انواع روش‌های خاک‌ورزی و تناوب زراعی بر عملکرد گندم در شرایط دیم معنی‌دار ارزیابی می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که از نظر اقتصادی و عملکرد گندم در سال اول و دوم به ترتیب تیمار روش مستقیم و تیمار خاک‌ورزی حفاظتی (تیغه‌های پنجه‌غازی + غلتک) نسبت به روش مرسوم برتری داشتند. در سال خشک (۹۲-۱۳۹۱) تیمار بی‌خاک‌ورزی (کشت مستقیم) در مقایسه با سایر روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی عملکرد بیشتری (حدود ۲۵ درصد) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم داشت. در این شرایط (سال خشک) شاخص نسبت منفعت به هزینه در روش مستقیم برابر با ۲/۸ است که نشان‌دهنده این است که به ازای هر واحد هزینه در روش بی‌خاک‌ورزی ۲/۸ واحد منفعت ایجاد می‌شود که نسبت به روش خاک‌ورزی مرسوم (۱/۹) عدد بالاتری است. در سال دوم (۹۳-۱۳۹۲) که آبیاری تکمیلی انجام شد از نظر اقتصادی و میزان عملکرد محصول، تیمار خاک‌ورزی

References

- Akheli, L. A. 2003. Calculation of green GNP and degree of sustainability of national income in Iran. PhD Dissertation, College of Humanities, Tarbiat Modares University, Iran. (In Persian with English abstract).
- Cantero-Martinez, C., P. Angeles, and J. Lampurlanes. 2007. Long-term yield and water use efficiency under

- various tillage systems in Mediterranean rainfed conditions. *Annals of Applied Biology* 150 (3): 293-305. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00142.x>.
3. Cayci, G., L. K. Heng, H. S. Ozturk, D. Surec, and C. Kutuk. 2008. Crop yield and water use efficiency in semi-arid region of Turkey. *Soil and Tillage Research* 103 (1): 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.09.004>.
4. Ghadiri, H. 1993. Soil conservation. Shahid Chamran university of Ahvaz. Pp. 470. (In Persian).
5. Ghahremanzadeh, M., and S. S. Hoseini. 1993. Economic study of soil conservation benefits in Iranian rainfed wheat fields: A case study: Golestan Province. 4th Iranian Conference on Agricultural Economics. Tehran. Iran. (In Persian with English abstract).
6. Ghorbani, M., and S. Hosseini. 2006. The application of replacement cost approach in estimating the annual cost of water soil erosion in Iran. *Research Journal* 7 (3): 177-186. (In Persian with English abstract).
7. Huszar, P. C. 1989. Economics of reducing off - site costs of wind Erosion. *Land Economics* 65 (4): 333-340. <https://doi.org/10.2307/3146801>.
8. King, D. A., and J. A. Sinden. 1988. Influence of soil conservation on farm land values. *Ecological Economics* 64 (3): 242-255. <https://doi.org/10.2307/3146248>.
9. Lopez-Bellido, L., M. Fuentes, J. E. Castillo, and E. J. Fernandez. 1996. Long-term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rained Mediterranean condition. *Agronomy Journal* 88 (5): 783-791. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050016x>.
10. Mejahed, E. I., and K. D. H. Sander. 1998. Rotation, tillage and fertilizer effects on wheat-based rain fed crop rotation in semiarid Morocco. Proceeding of third European conference on grain legumes. Opportunities for high quality, healthy and added-value crops to meet European demands. Valladolid, Spain, p. 442-454.
11. Meteorological data. Calendar. 2013-2014. Publications of I. R. of Iran Meteorological Organization.
12. Mirzah Shahi, K., and K. Bazargan. 2015. Soil organic matter management. *Technical Journal*. No 535. Publication of Soil & Water Research Institute. (In Persian with English abstract).
13. Morgan, R. P. C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*. Longman, London, UK, p. 60-67.
14. Pattanayak, S., and Mercer, D. E. 1998. Valuing soil conservation benefits of agroforestry: Contour hedgerows in the Eastern Visayas, Philippines. *Journal of Agricultural Economics* 18 (1): 31-46. [https://doi.org/10.1016/S0169-5150\(97\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5150(97)00037-6).
15. Refahi, H. G. 2012. *Wind erosion and its control*. University of Tehran Publications. Edition 6. Pp.320. Tehran. (In Persian).
16. Refahi, H. G. 2017. *Water erosion and its control*. University of Tehran Publications. Edition 7. Pp.672. (In Persian).
17. Shiferaw, B., and S. T. Holden. 1998. Investment in soil conservartion in the Ethiopoian soil conservation programs in a Hihly. *Ecological Economics* 64: 242-255.
18. Soil Protection Act. 2019. Ministry of Jihad Agriculture. Agricultural Research, Education and Extension Organization. Soil and Water Research Institute.
19. Soltani, G. R., and B. D. Najafi. 2007. *Agricultural economics*. Academic Publicaion. Pp. 300. Tehran. (In Persian).
20. Veloz, A., D. Southgate, F. Hitzhusen, and R. Macgregor. 1985. The Economics of Erosion control in a subtropical watershed: A Dominican case. *Land Economics* 61 (2): 145-155. <https://doi.org/10.2307/3145807>.
21. Vieth, G. R., M. Gunatilake, and L. J. Cox. 2001. Economic of soil Conservation: The upper Mahaweli watershed of Sirlanka. *Journul of Agricultural Economics* 52 (1): 139-152. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2001.tb00914.x>.
22. Walker, D. I., and D. L. Young. 1986. The effect of technical progress Erosion Damage and Economic insentives for soil conservation. *Land Economics* 62 (1): 83-93. <https://doi.org/10.2307/3146566>.
23. Zare Mehrjerdi, A. 2015. *Engineering economics*. Mehrjerdi Publication. Pp. 464.Tehran. (In Persian).



Investigation of the Motive Steam Pressure Effect on Performance and Reverse Flows in Sugar Factory Thermo-compressor: Validation and Numerical Study

A. Rezvanivand fanaei^{1*}, A. Hassanpour¹, A. M. Nikbakht²

1- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: a.rezvanivand@urmia.ac.ir)

DOI: [10.22067/jam.2021.68318.1010](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68318.1010)

Received: 13-01-2021

Revised: 05-05-2021

Accepted: 22-05-2021

Available Online: 22-05-2021

How to cite this article:

Rezvanivand fanaei, A., A. Hassanpour, and A. M. Nikbakht. 2022. Investigation of the Motive Steam Pressure Effect on Performance and Reverse Flows in Sugar Factory Thermo-compressor: Validation and Numerical Study. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 379-397. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.2021.68318.1010](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68318.1010)

Introduction

Thermo-compressors or ejectors are used to enhance the vapor enthalpy in the process industry. The low costs of construction and maintenance, and simple structure, have increased by using this equipment in relevant fields of industry and agriculture. The thermo-compressor's inlet parameters, including the thermodynamic properties of the motive steam and suction vapor, are the foremost affecting factor of a thermo-compressor.

The steam used in processing factories loses its capability after passing through evaporators due to the reduction of pressure and temperature, gets cooled again, and returns to the boiler despite having a moderate energy level. Therefore, the use of vapor-recovery equipment can increase the efficiency of energy systems. That will lead to a significant reduction in greenhouse gas emissions and harmful environmental effects, which increase the lifetime of energy resources.

Materials and Methods

The realizable $k-\epsilon$ turbulence model is used to simulate turbulence within the flow. The thermo-compressor geometry has meshed in 2D and 3D modes to apply the conservation laws. For this purpose, quadratic (quad) and hexahedral (hex) types are used for two and three-dimensional meshing, respectively. Structured meshes have a high ability to obtain numerical results due to creation of structural meshes in the flow direction.

The axisymmetric structure of the thermo-compressor leads to a half simulation of geometry. The thermodynamic properties of the input flows and their variations in the output, such as pressure, velocity, Mach number, and mass ratios for different motive steam pressure are extracted and discussed.

Results and Discussion

Different levels of meshes are examined to investigate the mesh-independence test. In axisymmetric two-dimensional analysis, these levels include 33460, 51340, 78620, and 103590 cells, respectively. The relatively insignificant difference in motive flow for the third and fourth mesh levels (which proves less than 5%) clearly shows the independence of the results from the mesh size. Regarding the time considerations, the grid with 78,620 meshes was used in the simulations.

The experimental data from the article by Sriveerakul *et al.* (2007) are used to validate the numerical results of the present work. Validation shows that the results obtained from the simulations are in good agreement with the experimental data. Since the final results of the two-dimensional analysis are very close to the three-dimensional one, the first one is selected due to the time considerations and higher computational costs of the three-dimensional mesh analysis.

Considering the problem conditions, pressures of 10 and 15 bars are appropriate for practical application. Since the 15 bar motive stem creates a longer development length in the diffuser section, it is a better choice. At this level (15 bar), the temperature field within the thermo-compressor is well distributed in the presence of ideal temperature conditions. The ideal velocity distribution within the thermo-compressor and the uniformity of the motive and suction flows indicate the high performance of the thermo-compressor in these operating conditions. Applying the motive steam of 15 bars, the values of 0.59 and 0.41 for the motive and suction mass ratios of the diffuser output were achieved, respectively.

Conclusion

Geometrically, the study was examined in asymmetrical two-dimension and three-dimension. It was observed that there is a slight difference between the two analysis modes by comparing the velocities along the longitudinal line of the thermo-compressor. Therefore, to save computational and time costs, results are presented for the axisymmetric two-dimensional mode.

The effect of 4 levels of motive steam pressure on the thermodynamic properties within the computational domain, including pressure, temperature, velocity, Mach number, mass ratios of both motive steam, and suction vapor are evaluated. Finally, the values of the performance curve for steam with motive pressures of 3.7, 5, 10, and 15 bars are presented.

Keywords: Entrainment ratio, Mach number, Suction flow, Sugar processing

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۷۹-۳۹۷

بررسی تاثیر فشار بخار محرک بر روی عملکرد و جریان‌های بازگشتی ترموکمپرسور کارخانه قند: اعتبارسنجی و مطالعه عددی

عادل رضوانی وند فنائی^{۱*}، علی حسن پور^۱، علی محمد نیکبخت^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱

چکیده

ترموکمپرسور یا اجکتور به منظور افزایش آنتالپی بخار در صنایع تبدیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هزینه ساخت و تعمیر نگهداری پایین در کنار ساختار ساده آن باعث افزایش کاربرد این تجهیز در زمینه‌های مرتبط با صنعت و کشاورزی شده است. پارامترهای ورودی به ترموکمپرسور شامل مشخصات ترمودینامیکی بخار محرک و بخار مکشی مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر روی عملکرد یک ترموکمپرسور می‌باشند. در این مطالعه ۴ سطح فشار بخار محرک شامل بخار با فشار ۳/۷ بار، ۵ بار، ۱۰ بار و ۱۵ بار به عنوان سطوح مختلف فشار ورودی بخار محرک مورد بررسی قرار گرفته است. از مدل آشفتگی k-ε تحقیق‌پذیر برای شبیه‌سازی آشفتگی‌های داخل جریان استفاده شده است و ویژگی‌های ترمودینامیکی جریان‌های ورودی و تغییرات آن‌ها در خروجی، مانند فشار، سرعت، عدد ماخ و نسبت‌های جرمی به‌ازای فشارهای مختلف بخار محرک استخراج شده و مورد بحث قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن پارامترهای عملکردی، عدم وجود جریان‌های بازگشتی و همچنین میزان تقویت فشار و دما، فشار ۱۵ بار بهترین عملکرد را در بین ۴ سطح اولیه مورد بررسی به‌خود اختصاص داده است. در استفاده از فشار محرک ۱۵ بار، فشار بخار مکشی ۰/۱ بار، در خروجی تقویت شد و به مقدار ۰/۳ بار افزایش پیدا کرد. همچنین دما افزایشی قابل توجهی نسبت به جریان مکشی داشت و به مقدار ۱۳۵ درجه سلسیوس رسید. همچنین با اعمال فشار بخار محرک ۱۵ بار، به ترتیب مقادیر ۰/۵۹ و ۰/۴۱ برای نسبت‌های جرمی محرک و مکشی خروجی دیفیوزر به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بخار مکشی، عدد ماخ، فرآوری قند، نسبت ورود

مقدمه

فشار متوسط و دمای بالاتر از دمای بخار مکشی خارج می‌گردد که قابلیت استفاده دوباره را دارا می‌باشد (Sharifi et al., 2012). در صورتی که پیش‌بینی دقیقی از عملکرد ترموکمپرسور انجام پذیرد، باعث افزایش بازده عملکردی آن خواهد شد، چرا که الگوهای مختلف جریان را می‌تواند ارائه نماید (Myoungkuk et al., 2010). شمایکی از یک ترموکمپرسور به همراه بخش‌های مهم آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

بخار مورد استفاده در کارخانجات فرآوری بعد از استفاده به علت کاهش فشار و دمای آن قابلیت خود را از دست می‌دهد و با وجود داشتن سطح متوسطی از انرژی (شامل فشار و دما) دوباره خنک‌کاری شده و به بویلر بازگردانده می‌شود و دوباره با صرف سوخت به صورت بخار زنده (بخار خروجی از بویلر) وارد سیستم می‌گردد. لذا استفاده از تجهیزات تقویت بخار می‌تواند سبب افزایش بازده سیستم‌های انرژی گردد. علاوه بر این، اثرات مضر زیست‌محیطی انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند با افزایش بازده سیستم‌های انرژی، کاهش یابد. افزایش بازده سیستم‌های انرژی همچنین می‌تواند باعث افزایش طول

استفاده کامل از پتانسیل بخار در کارخانه‌های فرآوری محصولات کشاورزی از جمله کارخانه‌های قند، کارخانه‌های آبمیوه و صنایع تبدیلی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. ترموکمپرسورها یا اجکتورها نوع خاصی از کمپرسورها هستند که با استفاده از یک جریان محرک (اولیه) سبب افزایش فشار جریان مکشی (ثانویه) می‌شوند. در این تجهیز، از یک نازل همگرا-واگرا برای شتاب‌دهی به جریان استفاده می‌گردد. جریان محرک بعد از ورود به محفظه اختلاط، به دلیل کاهش فشار، موجب مکش جریان ثانویه می‌شود. سپس این دو جریان در طول ترموکمپرسور و طی یک فرآیند پیچیده با هم مخلوط شده و در انتهای بخش خروجی ترموکمپرسور (دیفیوزر) بخار با سطح

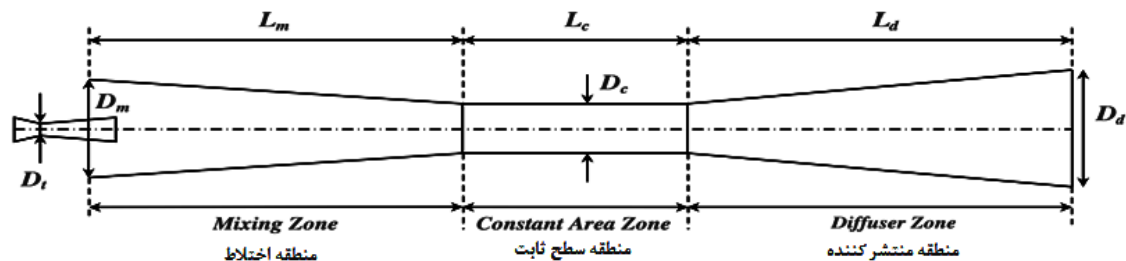
۱- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: a.rezvanivand@urmia.ac.ir)

اتلافی و بازیابی حرارت از جریان‌های انرژی به‌منظور بهبود سیستم انرژی کارخانه برای کاهش مصرف انرژی خواهد شد (Caliskan, 2017).

عمر منابع انرژی شود. اگرچه این افزایش به‌طور کلی مستلزم استفاده بیشتر از مواد، کار و دستگاه‌های پیچیده‌تر است، هزینه‌های اضافی را می‌توان با مزایای حاصل توجیه کرد. در نهایت یکپارچه‌سازی انرژی در صنایع تبدیلی محصولات کشاورزی، شامل استفاده از انرژی‌های



شکل ۱- شماتیکی از یک ترموکمپرسور به همراه بخش‌های مهم آن
Fig.1. Schematic of thermo-compressor along with main part

شده است. همچنین بخش عمده مطالعات انجام شده روی سیستم‌های خنک‌سازی اجکتوری و روش‌های طراحی برای انطباق شرایط بهتر تمرکز داشته‌اند (Riffat and Omer, 2001). اثرات آشفته‌گی بر روی الگوی جریان به‌صورت کامل توسط بارتوسیوویتز و همکاران تفسیر شده است. محققان در این مطالعه از ۶ مدل آشفتگی مختلف در شبیه‌سازی‌های CFD استفاده کردند و عملکرد یک اجکتور استفاده شده برای کاربردهای خنک‌سازی را ارزیابی نمودند (Bartosiewicz et al., 2006). در ادامه و در قالب مطالعاتی محققین الگوی جریان و پدیده اختلاط را با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت تفسیر کردند (Aphornratana, 2007; Sriveerakul et al., 2010).

در ادامه، مدل‌سازی فیزیکی ترموکمپرسور برای کاربردهای نمک‌زدایی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه کاربرد قوانین بقا در یک حجم کنترل و در نظر گرفتن اندازه‌های هندسی فیزیکی ترموکمپرسور اعمال شد. مدل برای دو ترموکمپرسور دلخواه به‌کار گرفته شد و نتایج با مدل‌های تجربی مقایسه گردید. در ادامه اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی در قالب خطای شبیه‌سازی عددی گزارش شد (Bonanos, 2017). در یک مطالعه عددی تأثیر مدل‌های آشفتگی مختلف از جمله اسپالارت آلماراس^۲، k-ε استاندارد، k-ε RNG^۳، k-ε تحقق‌پذیر^۴، SST^۵ و RSM^۶ را بر روی

اولین مطالعات انجام شده در زمینه بررسی ترموکمپرسورها و اجکتورها براساس تئوری کلاسیک، طراحی و تجزیه تحلیل شده‌اند (Keenan, 1942). در قالب اولین کارهای انجام شده در زمینه اجکتور، ارزیابی پارامترهای عملکردی تحت شرایط کاری متغیر انجام شده است. در این مطالعات با بهره‌گیری از معادلات مربوط به دینامیک گازها، پارامترهای مؤثر طراحی برای عملکرد یک اجکتور مانند قطر گلوگاه و موقعیت نازل اصلی تعیین می‌شوند (Dutton and Carroll, 1986; Huang et al., 1999). در این حوزه، بررسی مقایسه‌ای از عملکرد اجکتورهای استفاده شده در سیکل‌های خنک‌سازی به‌وسیله سان انجام گرفته است (Sun, 1997; Sun, 1999).

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۱) با توانایی نشان دادن جزئیات میدان جریان، درک بهتری از الگوهای داخلی جریان ارائه می‌دهد. انواع کاربردهای این تکنیک، فرآیندهای اختلاط، جداسازی، حرارتی مانند انواع خشک‌کن‌ها و همچنین محدوده وسیعی از کاربردهای مهندسی و کشاورزی را شامل می‌شود. حل عددی معادلات ناویر استوکس اساس تمام تکنیک‌های CFD می‌باشد که در نتیجه پیشرفت سریع کامپیوترها و درک بهتر از حل عددی آشفتگی امکان‌پذیر شده است. معادلات بقا شامل سه معادله بقای جرم، مومنتوم و انرژی در جریان‌های سیال در عبارتهای معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیان می‌گردد که راه‌حل را با روش‌های تحلیلی ارائه می‌دهد (ANSYS Fluent theory guide, 2013).

یکی از اولین پژوهش‌های انجام شده در زمینه مطالعه عددی ترموکمپرسورها و اجکتورها تعیین موقعیت محوری پهنه نازل انجام

2- Spalart Almaras
3- Renormalized Group
4- Realizable
5- Shear stress transport
6- Reynolds stress model

1- Computational Fluid Dynamics

شبیه‌سازی عددی مطالعه گردیده است. برای مدل‌سازی آشفتگی محفظه ته‌نشینی از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده گردید. طبق نتایج به‌دست آمده استفاده از تیغه منحرف‌کننده جریان راندمان ته‌نشینی را $11/4\%$ افزایش داده و همزمان باعث کاهش $6/67\%$ جریان هوای مورد نیاز سامانه می‌شود (Zobeiri et al., 2019). در یک مطالعه عددی و با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت، از مدل پهن باند در قالب یک مطالعه آیرودینامیکی برای تعیین نویز جریان پروانه‌ی ۶ پره موتور تراکتور ITM399 استفاده شده است. اختلاف بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده کم‌تر از ۱۰ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان داد که ارزیابی عددی آکوستیکی با استفاده از نویز پهن باند عملکرد فن را به‌صورت خوبی شبیه‌سازی نموده است (Sabralilou et al., 2019).

بنابراین با در نظر گرفتن موارد بیان شده و همچنین بررسی منابع می‌توان به این نتیجه رسید که تاکنون اثر فشار بخار محرک بر روی عملکرد ترموکمپرسور و بررسی پارامترهای ترمودینامیکی آن در جهت انتخاب مقدار مناسب مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین یک ارزیابی کامل در مورد تاثیر مقدار فشار بخار محرک (شامل فشارهای $3/7$ ، 5 ، 10 و 15 بار با توجه امکان ایجاد بخار با فشارهای مذکور در کارخانه قند) بر روی وجود یا عدم وجود جریان بازگشتی در سطوح مختلف فشار محرک مورد نیاز است. لذا با در نظر گرفتن موارد بیان شده، تاثیر فشار بخار محرک و مطالعه جریان‌های بازگشتی به‌عنوان اهداف اصلی این مطالعه انتخاب شده است. در کنار این دو هدف، منحنی عملکردی ترموکمپرسور برای حالت‌های مختلف فشار بخار محرک ارائه می‌گردد.

مواد و روش‌ها

این بخش، طراحی ترموکمپرسور را به همراه شبکه‌بندی، تبیین معادلات حاکم، موارد مربوط به انتخاب حلگر و مدل آشفتگی، شرایط مرزی مورد استفاده و فرض‌های مربوط به شبیه‌سازی را شامل می‌شود. در ابتدا با توجه به اهمیت پارامترهای عملکردی در طراحی و عملکرد ترموکمپرسور، نسبت ورود (ER^3) و نسبت تراکم (CR^4) معرفی می‌گردد.

پارامترهای عملکردی

حالت‌های عملکردی هر ترموکمپرسور می‌تواند در سه حالت متمایز شامل خفگی دابل^۵، خفگی منفرد^۶ و بازگشتی^۷ طبقه‌بندی

ویژگی‌های یک اجکتور فراصوت^۱ مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج تجربی به‌دست آمده مقایسه گردید (Besagni and Inzoli, 2017). برخی از مطالعات اخیر، صرفاً بر اساس قوانین ترمودینامیک بوده است و از روش حداقل مربعات غیرخطی برای تعیین عملکرد اجکتور بدون معادلات کوپل شده و بدون شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند (Zhu et al., 2018). در یک مطالعه عددی با فرض تراکم‌پذیر بودن سیال و با استفاده از حلگر بر پایه چگالی شبیه‌سازی عددی ترموکمپرسور بخار به‌منظور کاهش مصرف انرژی در خط تولید شکر با استفاده از CFD مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از یک بخار محرک ثابت، پتانسیل بالای دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان‌های با عدد ماخ^۲ بالا نشان داده شده است. محققین در این مطالعه جریان بازگشتی و اثر تغییرات فشار بخار محرک را مورد مطالعه قرار نداده‌اند (Rezvanivandefanayi et al., 2019). تحلیل انرژی، اکسرژی و اقتصادی یک واحد آب شیرین‌کن مجهز به سیستم ترموکمپرسور به هدف افزایش بازده انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. نسبت محصول سیستم ترکیب شده با ترموکمپرسور به اندازه ۳۵ درصد بیشتر از سیستم‌های مرسوم به‌دست آمد (Chen et al., 2019). همچنین در یک مطالعه تجربی- عددی، منحنی‌های عملکرد یک ترموکمپرسور بخار به همراه بررسی اختلاط کامل جریان‌های محرک و مکشی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، که با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۱۵ انجام پذیرفته است، از مدل $k-\epsilon$ تحقق‌پذیر برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده شد. با توجه به تراکم‌پذیر بودن جریان، از حلگر بر مبنای چگالی برای حل جریان بهره برده شد. نتایج به‌دست آمده تاییدکننده توانمندی بالای دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان‌های تراکم‌پذیر در داخل ترموکمپرسور می‌باشد (Rezvanivand Fanaei et al., 2021).

در زمینه کاربرد CFD در کاربردهای کشاورزی و در قالب یک مطالعه عددی، تاثیر قطر ذرات خوراک بر روی اندازه سرعت و افت فشار در داخل یک سیکلون جداکننده را مورد بررسی قرار دادند (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015). در مطالعه‌ای دیگری، جداسازی گندم با استفاده از سیکلون استرماند بازده بالا به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه و در ۶ سرعت مختلف ورودی مواد و همچنین ۳ دبی جرمی مختلف مشخصات داخل سیکلون از جمله بازده جداسازی، افت فشار، میدان سرعت، پارامترهای آشفتگی و سایش مورد بررسی قرار گرفت (Naimi et al., 2019). تاثیر وجود انحراف‌کننده جریان بر مشخصه‌های جریان در محفظه جداسازی نخود به‌صورت تجربی و

3- Entrainment ratio
4- Compression ratio
5- Double Choke
6- Single Choke
7- Reverse flow

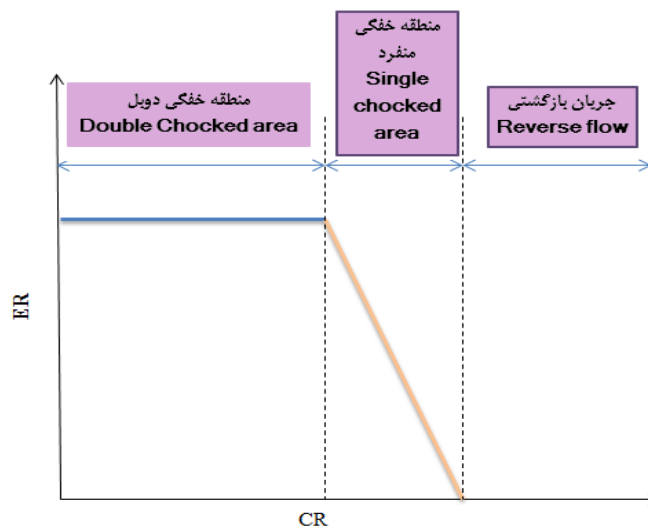
1- Supersonic
2- Mach number

$$CR = \frac{P_{dis}}{P_{suc}} \quad (2)$$

که $\dot{m}_{suc}$ دبی جریان مکشی (kg.s^{-1}) و $\dot{m}_{mot}$ دبی جریان محرک (kg.s^{-1}) می‌باشد. همچنین P_{dis} فشار تخلیه (Pa) و P_{suc} فشار مکش (Pa) می‌باشد. در ادامه و در شکل ۲ منحنی عملکردی یک ترموکمپرسور برای حالت‌های عملکردی مختلف ارائه شده است که سه حالت اتفاق افتاده در داخل ترموکمپرسور شامل حالت خفگی دوبل، خفگی منفرد و جریان بازگشتی را به ازای مقادیر مختلف ER و CR نشان می‌دهد.

شود. هر ترموکمپرسور دارای یک فشار بحرانی (بیشترین فشار تخلیه) می‌باشد، که در این شرایط یک انتقال از حالت پایدار به حالت غیرپایدار اتفاق می‌افتد. این شرایط پایدار به اسم حالت خفگی دوبل شناخته می‌شود و فشار تخلیه واقعی در وضعیت رایج کمتر از فشار بحرانی است. بنابراین پارامترهای عملکردی مانند ER و CR در این شرایط پایدار بر منحنی‌های عملکردی معمول ترموکمپرسور ارزیابی می‌شوند.

$$ER = \frac{\dot{m}_{suc}}{\dot{m}_{mot}} \quad (1)$$



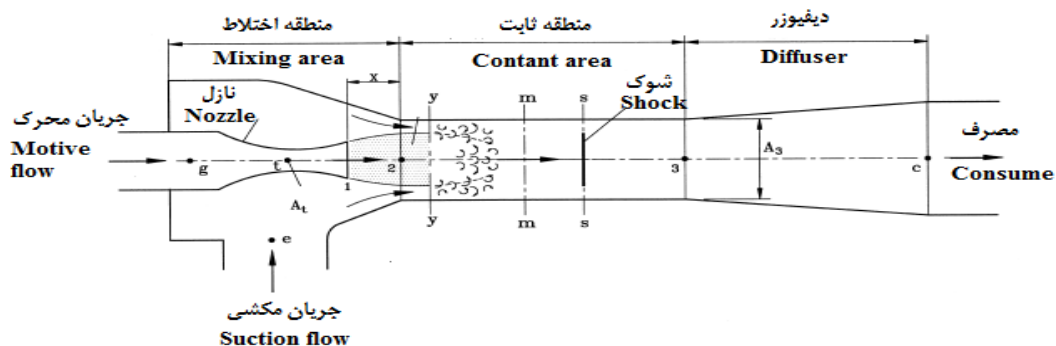
شکل ۲- منحنی عملکردی یک ترموکمپرسور با حالت‌های عملکردی مختلف

Fig.2. Schematic of thermo-compressor

روابط دینامیک گازها و در نظر گرفتن فشار و دمای ورودی و همچنین نسبت‌های جرمی برای ورودی‌های بخار محرک و مکشی محاسبه می‌شود.

طراحی ترموکمپرسور بر اساس مدل هوانگ

به منظور طراحی ترموکمپرسور از مدل تک بعدی هوانگ استفاده شده است (Huang et al., 1999). در مدل هوانگ طراحی ترموکمپرسور و آنالیز عملکرد ترموکمپرسور یا اجکتور بر اساس



شکل ۳- بخش بندی مناطق مختلف ترموکمپرسور در مدل هوانگ

Fig.3. Various section of thermo-compressor in Huang model

$$\left(\frac{A_{p1}}{A_t}\right)^2 = \frac{1}{M_{p1}^2} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{p1}^2 \right) \right]^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}} \quad (۴)$$

$$\frac{P_g}{P_{p1}} = \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{p1}^2 \right)^{\frac{\gamma}{(\gamma-1)}} \quad (۵)$$

بعد از استفاده از معادلات مدل یانگ، ابعاد ترموکمپرسور بر اساس شرایط ترمودینامیکی به‌دست آمد. این مقادیر به همراه توصیف بخش مربوطه در جدول ۱ نشان داده شده است.

رابطه (۳)، دبی جریان محرک ($\dot{m}_{mot}$) را به ویژگی‌های ترمودینامیکی سیال (T_g, P_g) مربوط می‌کند. جریان جرمی با سطح گلوئی نازل (A_t) متناسب است.

$$\dot{m}_{mot} = \frac{P_g A_t}{\sqrt{T_g}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}}} \sqrt{\eta_p} \quad (۳)$$

که P_g فشار جریان محرک (T_g, Pa)، دمای جریان محرک (K)، γ نسبت گرمایی ویژه (اتمیسیت)، R ثابت ویژه گاز ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$) و η_p بازده آیزنتروپیک جریان تراکم‌پذیر در نازل است. همچنین پارامترهای جریان در خروجی نازل از روابط دینامیک گازها و با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه شدند.

جدول ۱- ابعاد ترموکمپرسور طراحی شده بر اساس مدل هوانگ

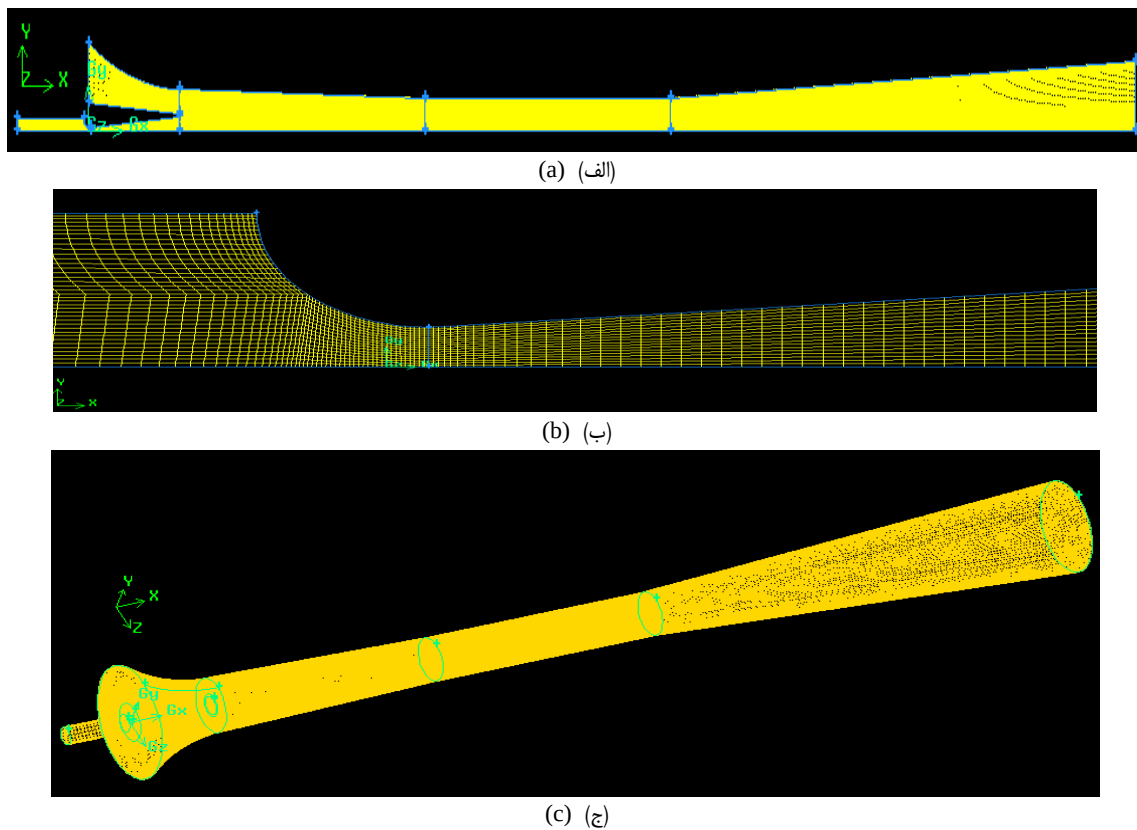
Table 1- The thermo-compressor dimensions based on Huang model

شرح Description	اندازه Value (mm)
قطر گلوئی نازل Throat diameter of nozzle (D_t)	36
قطر ورودی منطقه اختلاط Inlet diameter of mixing area (D_m)	915
طول منطقه اختلاط Mixing are length (L_m)	2140
طول منطقه ثابت Constant area length (L_c)	1425
قطر خروجی نازل Outlet diameter of nozzle (D_o)	210
قطر منطقه ثابت Constant area diameter (D_c)	485
قطر خروجی دیفیوزر Outlet diameter of diffuser (D_d)	710
طول دیفیوزر Diffuser length (L_d)	2515
طول کل Total length (L)	6080

در راستای جریان از قابلیت بالایی برای به‌دست آوردن نتایج عددی برخوردار است. با توجه به تحلیل دو بعدی متقارن محوری نصف هندسه ترموکمپرسور در حالت دوبعدی شبیه‌سازی شد (شکل ۴-الف). همچنین برای مشاهده بهتر تغییرات خروجی‌های مختلف به‌ازای مکان‌های مختلف (در محل‌های با گرادیان بالاتر)، در این مناطق از مش‌های ریزتر استفاده شده است (شکل ۴-ب).

شبکه‌بندی ترموکمپرسور

به‌منظور اعمال قوانین بقا (جرم، مومنتوم و انرژی)، هندسه ترموکمپرسور در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی شبکه‌بندی شدند. بدین منظور از مش نوع چهارضعی (quad) برای مش‌بندی حالت دوبعدی و از نوع مکعبی (hex) برای شبکه‌بندی حالت سه‌بعدی استفاده شد. مش‌های منظم به‌واسطه ایجاد شدن مش‌های ساختاری



شکل ۴- مش‌بندی ترموکمپرسور در نرم‌افزار گمبیت ۲، ۴، ۶؛ الف: شبکه‌بندی دوبعدی متقارن محوری، ب: بزرگنمایی بخش خروجی نازل، ج: شبکه‌بندی سه‌بعدی

Fig.4. Meshing of thermo-compressor in Gambit; a: 2Dimensional Axisymmetric meshing, b: magnifying of nozzle outlet, 3Dimensional meshing

معادلات حاکم در ترموکمپرسور
حالت عمومی از معادلات بقا برای سیال تراکم‌پذیر برای شبیه‌سازی الگوی داخلی جریان استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن جریان سه‌بعدی برای بخار، معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در سیستم دکارتی به صورت روابط (۶) تا (۸) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E + u_i p) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \tau_{ij}) \quad (8)$$

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (8)$$

در رابطه‌های فوق ρ چگالی (kg.m^{-3})، u اجزای سرعت (m.s^{-1})، τ تانسور تنش (Pa)، E انرژی کل (J)، k انرژی جنبشی آشفته

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r) \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r}(r) - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (14)$$

$$+ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (15)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

که G_k نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفتگی با توجه به گرادیان‌های سرعت میانگین، G_b تولید انرژی جنبشی با توجه به شناوری، Y_M نشان‌دهنده سهم نوسان در آشفتگی قابل تراکم به نرخ اتلاف (اضمحلال)، $C_{1\varepsilon}$ و C_2 مقادیر ثابت هستند. σ_k و σ_ε به ترتیب عدد پرتل آشفته برای k و ε می‌باشند. S_k و S_ε عبارتهای منبع با توجه به انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ تلفات (ε) هستند. این مدل آشفته با رفتارهای نزدیک به دیواره مانند "تابع دیواره استاندارد" سازگار است. به منظور داشتن رفتار سازگار با فرض تابع دیواره استاندارد، مش‌های نزدیک به دیواره‌ها حائز اهمیت هستند (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013).

شرایط مرزی مورد استفاده

در این مطالعه دو جریان ورودی متمایز در کنار یک جریان خروجی منفرد وجود دارد. از این رو شرط مرزی نوع "فشار ورودی" برای هر دو جریان اولیه (محرک) و ثانویه (مکشی) اعمال می‌گردد. شرایط ترمودینامیکی در این مرزها نیز در نظر گرفته می‌شود. دیواره‌های نازل و ترموکمپرسور به صورت سطوح غیرقابل نفوذ و بی‌دررو و بدون ویسکوزیته تعریف می‌گردند. همچنین از شرط مرزی تقارن برای تعریف محور استفاده می‌شود.

فرض‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

با در نظر گرفتن فرض گاز ایده‌آل، شبیه‌سازی‌ها دارای خطای چشم‌گیری نخواهند بود.

هیچ چگالشی در داخل هیچ‌کدام از دو جریان اتفاق نمی‌افتد.

هر دو جریان، سرعت بسیار ناچیزی در شرایط سکون^۳ دارند.

$$\rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} (\rho r) + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = \rho g_\theta + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) \right) + \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) \right] \quad (11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z = + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E + u_i p) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \tau_{ij}) \quad (13)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z)$$

که r و θ مربوط به راستاهای دستگاه مختصات استوانه‌ای می‌باشد.

انتخاب حلگر

انتخاب حلگر در نرم‌افزار انسیس فلونت به عدد بی‌بعد ماخ بستگی دارد. عدد ماخ به صورت سرعت یک جسم به سرعت صوت تعریف می‌شود. در شرایطی که این عدد بیشتر از 0.3 باشد، آن محیط تراکم‌پذیر و در صورتی که کمتر از 0.3 باشد، نشان‌دهنده یک محیط تراکم‌ناپذیر است. با توجه به شرایط حل، برای محیط‌های تراکم‌پذیر از حلگر بر پایه چگالی^۱ و برای محیط‌های تراکم‌ناپذیر از حلگر بر پایه فشار^۲ استفاده می‌گردد. با توجه به توضیحات ارائه شده و با در نظر گرفتن سرعت داخل ترموکمپرسور و عدد ماخ بالای 0.3 از حلگر بر پایه چگالی استفاده شده است.

مدل‌سازی آشفتگی

در نظر گرفتن مدل آشفتگی مناسب از آن جهت مهم است که پدیده اختلاط دو جریان در شرایط آشفته اتفاق می‌افتد و از این رو، به صورت چشم‌گیری الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با مطالعه منابع مختلف و مقالات پیرامون این موضوع از حالت تحقیق‌پذیر مدل $k-\varepsilon$ استفاده شده است (Gagan et al., 2014; Aidoun et al., 2019). دلیل اصلی استفاده از این روش، پیش‌بینی ویژگی‌های جت ظاهر شده در رژیم‌های جریانی هم‌جهت متقارن محوری است. دو معادله حاکم اساسی این مدل به صورت رابطه (۱۴) و (۱۵) بیان می‌گردد.

1- Density-based solver

2- Pressure-based solver

3- Stagnation

جدول ۲- شرایط مرزی استفاده شده

Table 2- Used boundary conditions

مقدار یا وضعیت	مقدار یا نوع شرط مرزی
Value or condition	Boundary condition value or type
3.7, 5, 10 and 15 bars	فشارهای ورودی بخار محرک Inlet pressures of motive flow
141, 152, 180 and 198 °C	دماهای ورودی بخار محرک Inlet temperatures of motive flow
0.1 bar	فشار ورودی بخار مکشی Inlet pressures of suction flow
46 °C	دمای ورودی بخار مکشی Inlet temperature of suction flow
تقارن محوری Axisymmetric	محور Axis
شرایط بدون لغزش No slip condition	دیواره Wall

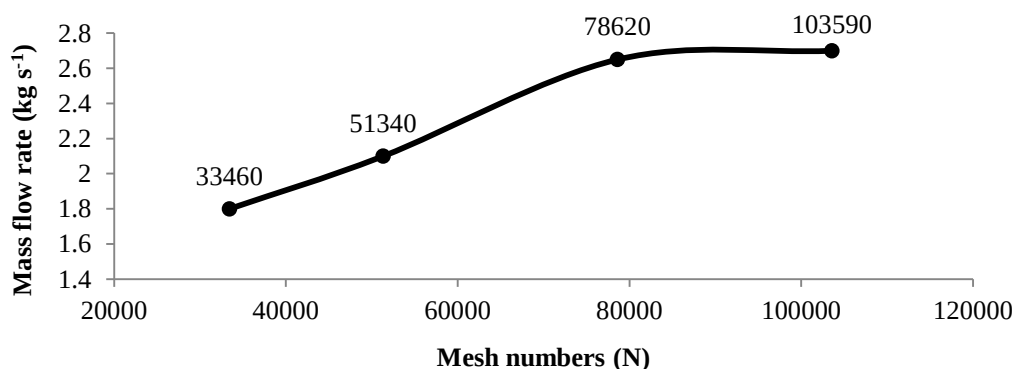
نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به بررسی آزمون استقلال از شبکه برای شبکه محاسباتی به همراه اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی حاصل پرداخته شده است. با توجه به استفاده از حالت دوبعدی، نمودار مربوط به سرعت برای این حالت دوبعدی و سه‌بعدی با یکدیگر ارائه شده است که نشان‌دهنده اختلاف بسیار کم بین این دو حالت است. در ادامه کانتورهای مربوط به فشار، دما، سرعت، عدد ماخ و نسبت‌های جرمی بخار محرک و بخار مکشی برای ۴ سطح فشار محرک با همدیگر مقایسه می‌گردد. همچنین بردارهای سرعت برای بررسی جریان‌های بازگشتی به‌ازای بخارهای محرک با فشارهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین به‌عنوان یک نتیجه مهم پارامترهای عملکردی هر یک از ۴ سطح فشار محرک، در قالب منحنی‌های عملکردی مورد ارزیابی می‌شوند. در نهایت بهترین حالت

فشار بخار محرک در بین ۴ سطح فشار بخار محرک مورد بررسی از نظر عملکرد و عدم وجود جریان بازگشتی جهت استفاده برای تقویت بخار انتخاب می‌گردد.

آزمون استقلال از شبکه

به‌منظور بررسی مستقل بودن نتایج از تعداد مش شبکه محاسباتی سطوح مختلف شبکه‌بندی در محاسبات ابتدایی مورد بررسی قرار گرفت. در تحلیل دوبعدی متقارن این سطوح به‌ترتیب شامل ۳۳۴۶۰، ۵۱۳۴۰، ۷۸۶۲۰ و ۱۰۳۵۹۰ عدد سلول بودند. به سبب اختلاف کم‌تر از ۵ درصد برای دبی سیال محرک برای سطح سوم و چهارم، که نشان‌دهنده مستقل بودن نتایج از اندازه مش است و با در نظر گرفتن ملاحظات زمانی از شبکه با تعداد ۷۸۶۲۰ عدد مش برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد (شکل ۵).



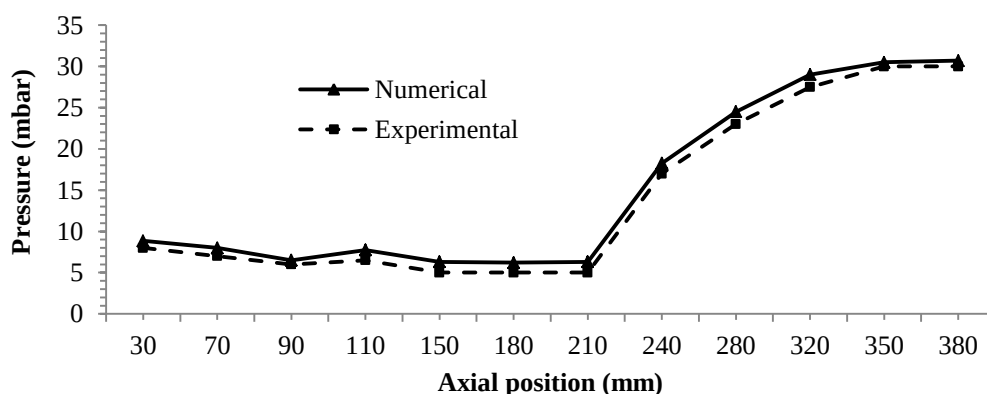
شکل ۵- آزمون استقلال از شبکه

Fig. 5. Mesh independency test

اعتبارسنجی

(*Striveerakul et al., 2007*) استفاده شده است. اعتبارسنجی نشان می‌دهد که نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی از تطابق خوبی با داده‌های تجربی برخوردار هستند (شکل ۶).

برای اطمینان از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نتایج بایستی اعتبارسنجی شوند. به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی کار حاضر، از داده‌های تجربی مورد استفاده در مقاله سریوراکول و همکاران



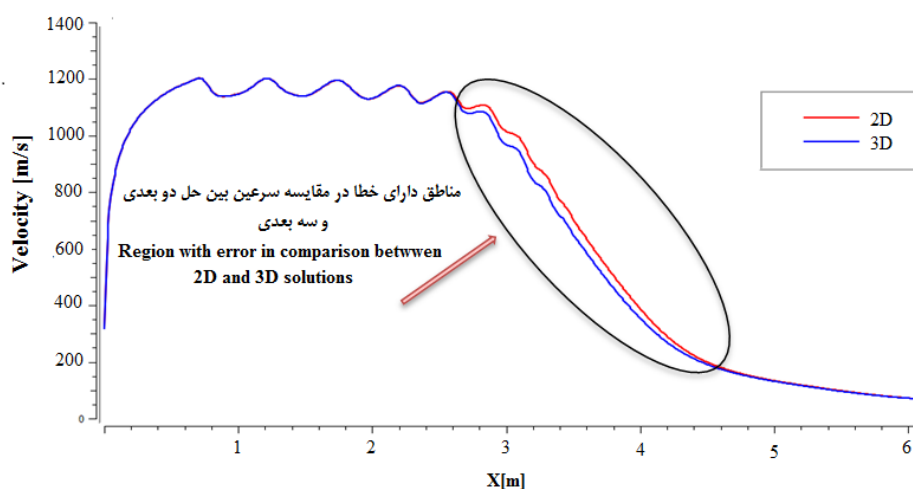
شکل ۶- اعتبارسنجی بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی

Fig. 6. Validation between experimental data and numerical results

دوبعدی متقارن برای مشاهده نتایج استفاده گردید. این مقایسه برای سرعت در راستای طولی در شکل ۷ نشان داده شده است. تطابق مناسب نتایج برای شبیه‌سازی حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی، در کارهای محققان دیگر نیز گزارش شده است و آن‌ها نیز از مدل دوبعدی استفاده نموده‌اند (*Besagni, 2019*).

مقایسه نتایج حالت دو بعدی متقارن با سه بعدی

به دلیل این که مقایسه بین شبیه‌سازی حالت دوبعدی متقارن با حالت سه‌بعدی تطابق خوبی را بین نتایج سرعت نشان می‌دهد، لذا با در نظر گرفتن ملاحظات زمانی و هزینه‌های محاسباتی بیشتر شبکه سه‌بعدی نسبت به شبکه دوبعدی متقارن، از شبیه‌سازی عددی



شکل ۷- مقایسه نمودار سرعت در راستای محور طولی ترموکمپرسور برای تحلیل‌های حالت دوبعدی و سه‌بعدی

Fig. 7. A Comparison of velocity plot in the longitudinal axis direction of thermo-compressor for 2D and 3D analyses

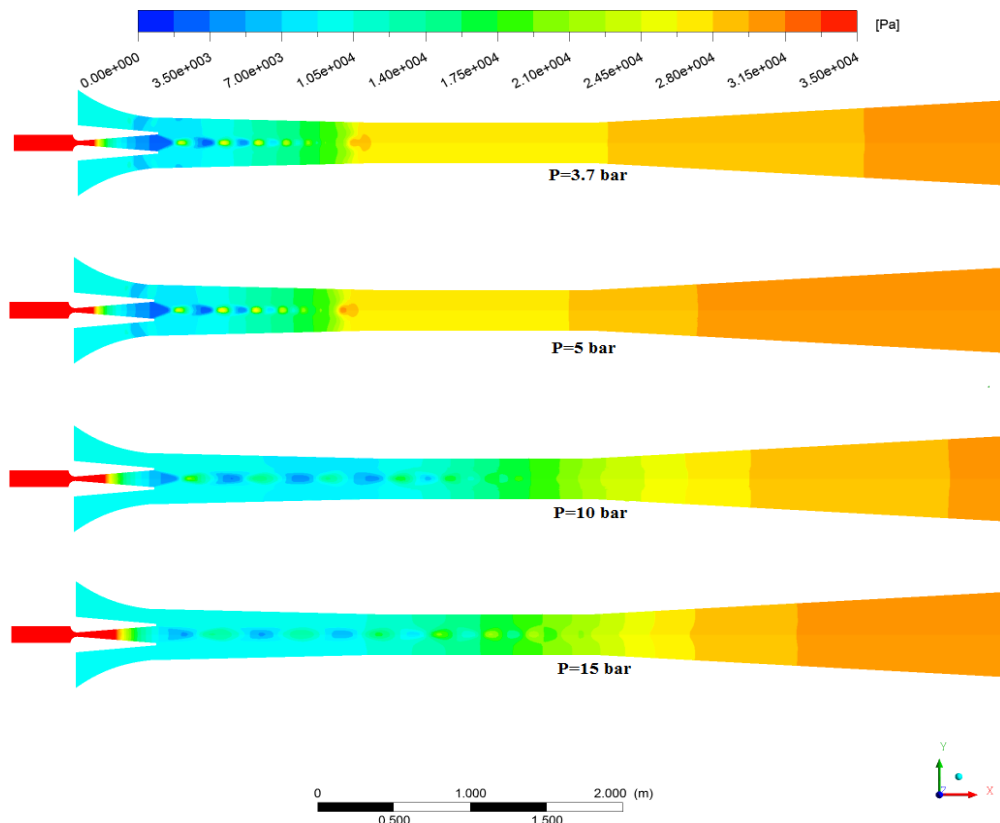
نشان داده شده است، می‌توان به این نتیجه رسید که از نقطه نظر فشار داخل ترموکمپرسور و برای شرایط مسئله، فشارهای ۱۰ و ۱۵ بار از

مقایسه کانتور فشار برای فشارهای محرک مختلف

با مقایسه مقادیر فشار برای ۴ سطح فشار محرک که در شکل ۸

ترموکمپرسور تشکیل شده است. الگوی تغییرات فشاری ایجاد شده داخل ترموکمپرسور در کارهای سایر محققین نیز تطابق خوبی با نتایج به‌دست آمده دارد (Sharifi et al., 2012). همچنین روندهای مشابهی برای کانتورهای فشار داخل ترموکمپرسور در کارهای گزارش شده وجود دارد (Ji et al., 2010).

شرایط مناسبی برای استفاده برخوردار هستند. البته از این نظر که فشار محرک ۱۵ بار طول توسعه‌یافتگی بیشتری را از نظر فشار در بخش دیفیوزر ایجاد می‌کند، در شرایطی که استفاده از هر دو فشار امکان‌پذیر باشد، می‌تواند انتخاب مطلوب‌تری باشد. الگوی فشاری جریان در داخل ترموکمپرسور مطابق با اصول دینامیک گازها ایجاد شده است. همچنین موج شوک ایجاد شده به‌واسطه الگوی هندسی



شکل ۸- کانتور فشار برای داخل ترموکمپرسور در فشارهای مختلف بخار محرک

Fig. 8. Pressure contour for within the thermo-compressor in various pressure of motive steam

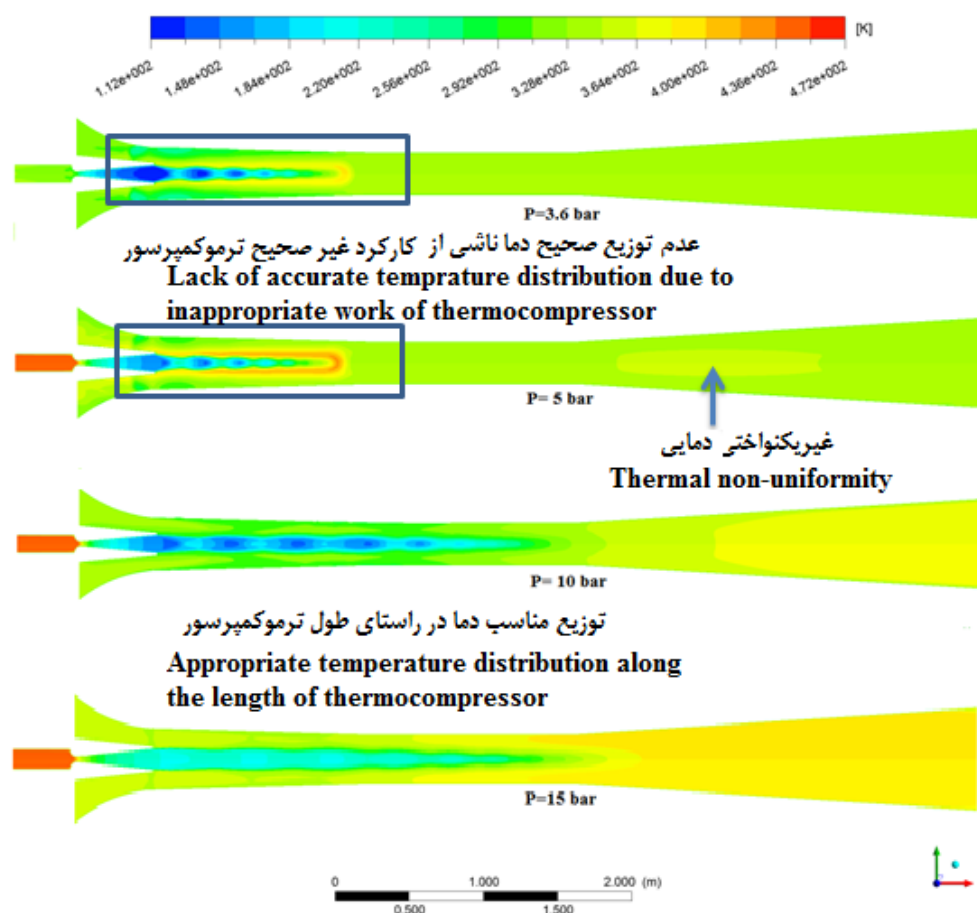
(شکل ۹).

مقایسه کانتور سرعت برای فشارهای محرک مختلف

سرعت جریان محرک بعد از خروج از بخش گلویی نازل سریعاً افزایش می‌یابد و سپس در مجاورت جریان مکشی وارد فاز اختلاط با این سیال می‌شود. با مقایسه بین مقادیر سرعت به ازای بخار محرک با فشارهای مختلف، می‌توان دریافت که بخار محرک با فشار ۱۵ بار بهترین انتخاب برای استفاده در شرایط عملی می‌باشد.

مقایسه کانتور دما برای فشارهای محرک مختلف

از نظر توزیع دمای داخل ترموکمپرسور فشار محرک ۱۵ بار، بهترین انتخاب در بین سایر فشارهای محرک استفاده شده است. در این از سطح فشار محرک، میدان دمایی در داخل ترموکمپرسور به‌خوبی توزیع شده و شرایط یکنواخت دمایی ایده‌آلی در داخل آن ایجاد شده است. البته در مرتبه دوم، فشار محرک ۱۰ بار نیز از نظر دمایی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. عدم توزیع مناسب دما در داخل ترموکمپرسور به دلیل مناسب نبودن (کم بودن) مقدار فشار بخار محرک برای کار ترموکمپرسور در شرایط مورد استفاده است



شکل ۹- کانتور دما برای داخل ترموکمپرسور در فشارهای مختلف بخار محرک

Fig. 9. Temperature contour for within the thermo-compressor in various pressure of motive steam

عملکرد کلی ترموکمپرسور را تحت الشعاع قرار می‌دهند. ایجاد شدن این جریان‌های چرخشی و عموماً بازگشتی سبب ایجاد نوسانات بسیاری در انتقال و اختلاط صحیح جریان‌های داخل ترموکمپرسور خواهد شد. همچنین ایجاد جریان‌های متقابل به‌خصوص در بخش مکش سبب می‌گردد که مقدار کافی از سیال مکشی به داخل ترموکمپرسور وارد نگردد و از نظر پارامترهای عملکردی باعث کاهش شدید مقدار نسبت ورود (ER) خواهد شد.

برای بخار محرک با فشار ۱۰ بار در ورودی جریان مکشی جریان بازگشتی ایجاد نشده، منتهی در نزدیکی دیواره بخش اختلاط جریان‌های چرخشی ایجاد شده‌اند که جریان‌یابی کامل را با مشکل مواجه می‌کنند. این جریان‌های چرخشی در بخش مربوط به فشار ۱۰ بار و در شکل ۱۱ قابل مشاهده‌اند. در انتها، برای بخار محرک با فشار ۱۵ بار جریان‌یابی به‌صورت کامل برای جریان‌های محرک و مکشی انجام شده و هیچ‌گونه جریان بازگشتی یا چرخشی در این وضعیت در داخل ترموکمپرسور ایجاد نشده است. لازم به ذکر است، بررسی

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، توزیع سرعت ایده‌آل در داخل ترموکمپرسور و یکنواختی بسیار خوب جریان محرک و جریان مکشی، نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب ترموکمپرسور در این شرایط کاری می‌باشد. همچنین از نقطه‌نظر جریان‌های بازگشتی فشارهای ۱۰ و ۱۵ شرایط بهتری دارد، که در این دو سطح نیز فشار محرک ۱۵ بار هیچ نوع جریان چرخشی یا ورتیسیته را در داخل ترموکمپرسور ایجاد نکرده است و از این نظر شرایط کامل مساعدی برای استفاده در شرایط عملکردی را دارا می‌باشد.

بردارهای سرعت^۱ برای فشارهای محرک مختلف

همان‌طوری که در شکل ۱۱ برای فشارهای محرک ۳/۷ و ۵ بار نشان داده شده است، جهت جریان در بخش مکشی به‌درستی ایجاد شده و جریان‌های چرخشی زیادی در این بخش‌ها ایجاد شده‌اند، که

1- Vector

بودن آن را نشان می‌دهد. روند مشابهی برای کانتور عدد ماخ در داخل ترموکمپرسور در سایر مطالعات انجام گرفته گزارش شده است (Ariafer and Toorani, 2012; Noori et al., 2016, Sharifi and Boroomand, 2013).

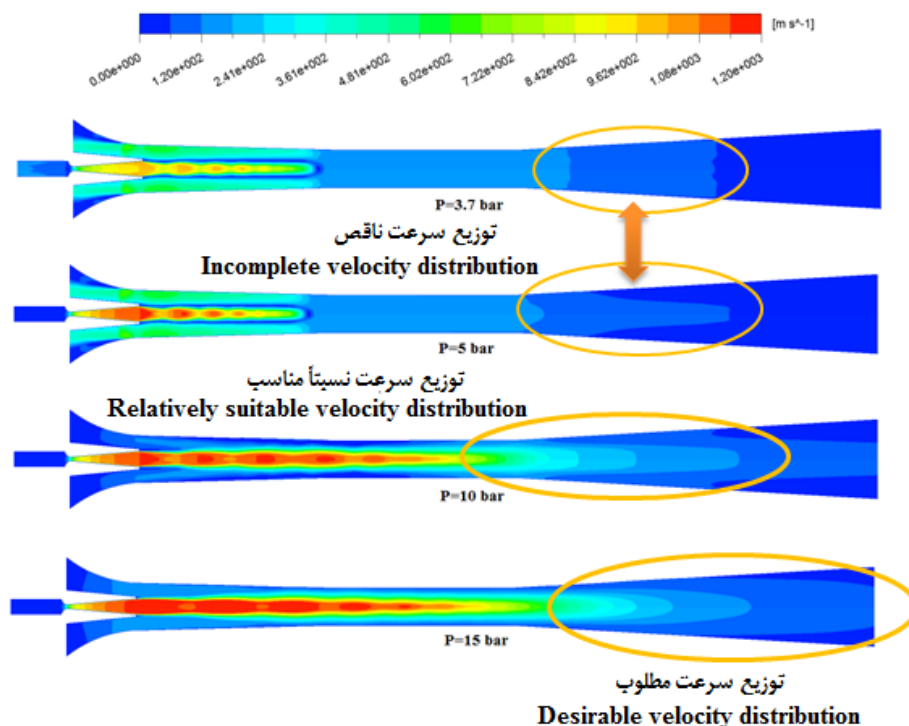
کانتور نسبت جرمی بخار محرک برای فشارهای محرک و مکشی مختلف

از نظر نسبت جرمی بخار محرک نیز فشارهای محرک ۱۰ و ۱۵ بار، شرایط مساعدی را دارا هستند. با مراجعه به شکل ۱۳ می‌توان این استنباط را داشت که فشار ۱۵ بار محرک از نظر نسبت جرمی بخار توزیع یکنواخت‌تری در بخش در تعامل با بخار مکشی در بالای محفظه اختلاط را دارا می‌باشد و با در نظر گرفتن این مورد می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد. هرچند دامنه یکنواختی برای فشار ۱۰ بار دارای گستره بیشتری است. همچنین در فشار محرک ۱۵ بار توزیع نسبت جرمی بهتری از بخش‌های مکشی به داخل ترموکمپرسور ایجاد شده است. در این مورد نیز طول بخش یکنواختی نسبت جرمی بخار مکشی برای بخار محرک با فشار ۱۵ بار از نسبت جرمی مکشی بهتری نسبت به بخار محرک با فشار ۱۵ بار برخوردار است.

کانتور و بردار سرعت برای تشخیص توزیع مناسب بخار در داخل ترموکمپرسور در کارهای دیگر انجام شده که توافق خوبی با مطالعه حاضر دارد (Sharifi and Boroomand, 2013).

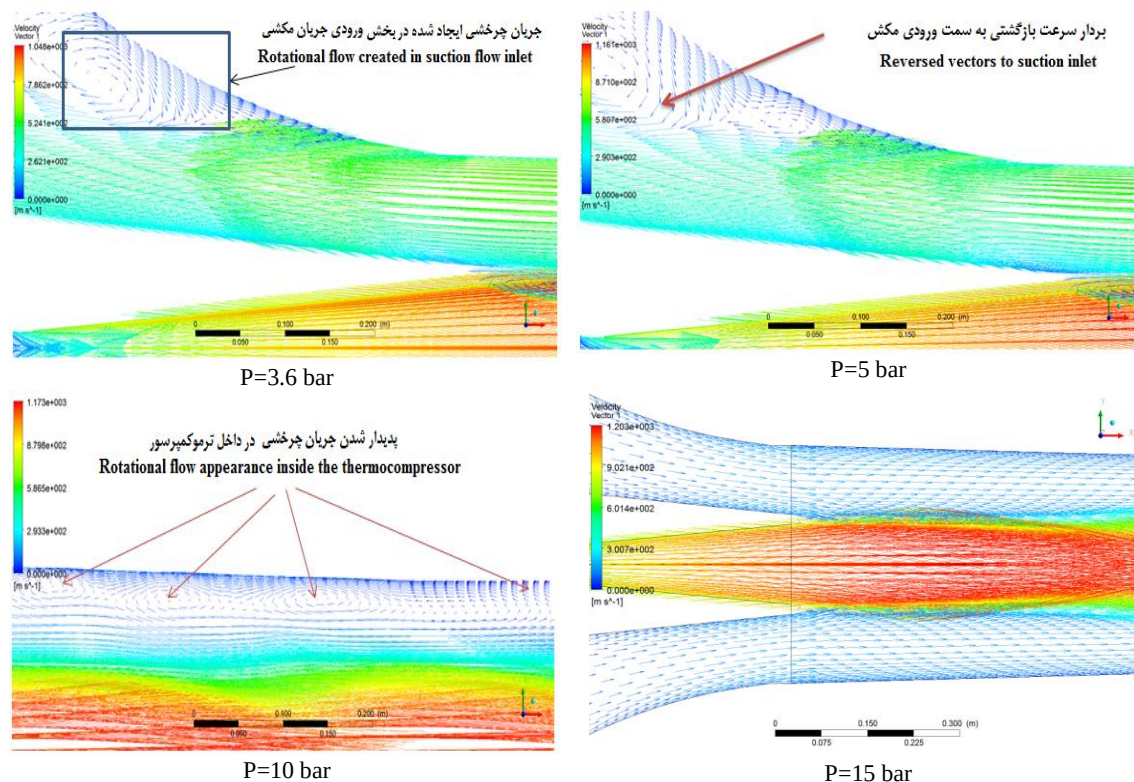
کانتور عدد ماخ برای فشارهای محرک مختلف

با توجه به ماهیت عدد ماخ، مطالعه توزیع آن می‌تواند مناطق فراصوت یا فروصوت جریان در داخل ترموکمپرسور را مشخص نماید. در رابطه با عدد ماخ نیز مشابه با سرعت، فشارهای محرک ۱۰ و ۱۵ بار شرایط خوبی را دارا بودند و در هر دوی این سطوح فشار جریان فراصوت در بخش هندسه ثابت به جریان فروصوت تبدیل شده است که نشان‌دهنده کارکرد صحیح ترموکمپرسور می‌باشد. متتبعی همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، فشار محرک ۱۵ بار شرایط بسیار بهتری را از نظر توزیع منظم عدد ماخ دارد. طبق بررسی‌های انجام شده، سطح بخار محرک با فشار ۱۵ بار بهترین انتخاب از نقطه نظر عدد ماخ در شرایط مسئله مورد نظر برای ترموکمپرسور است. بیشترین مقدار عدد ماخ برای ترموکمپرسور مقدار ۴/۲ است که در مناطق با تغییرات سرعت بالا (موج‌های شوک) ایجاد شده است. همچنین کمترین مقدار عدد ماخ متعلق به بخش خروجی دیفیوزر است که مقدار آن در حدود ۰/۰۵۴ می‌باشد که فروصوت

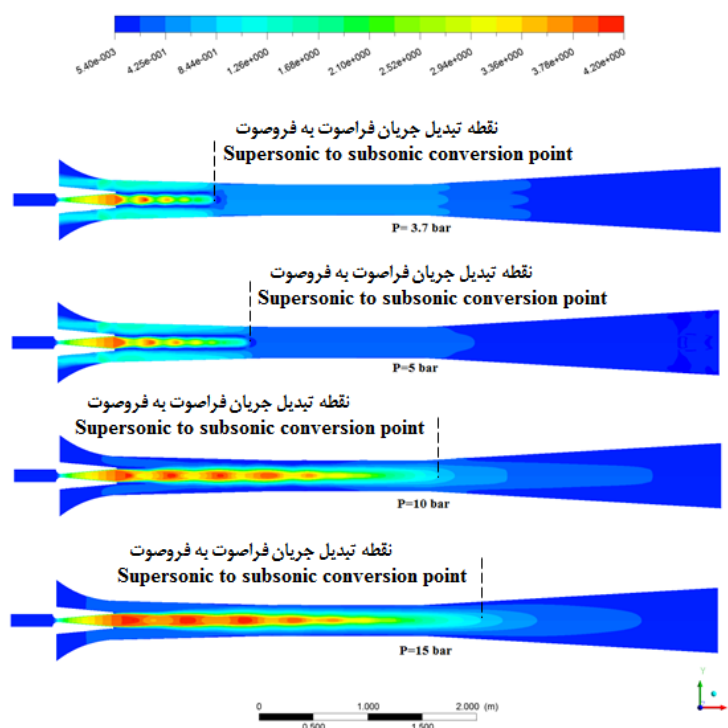


شکل ۱۰- کانتور سرعت برای داخل ترموکمپرسور در فشارهای مختلف بخار محرک

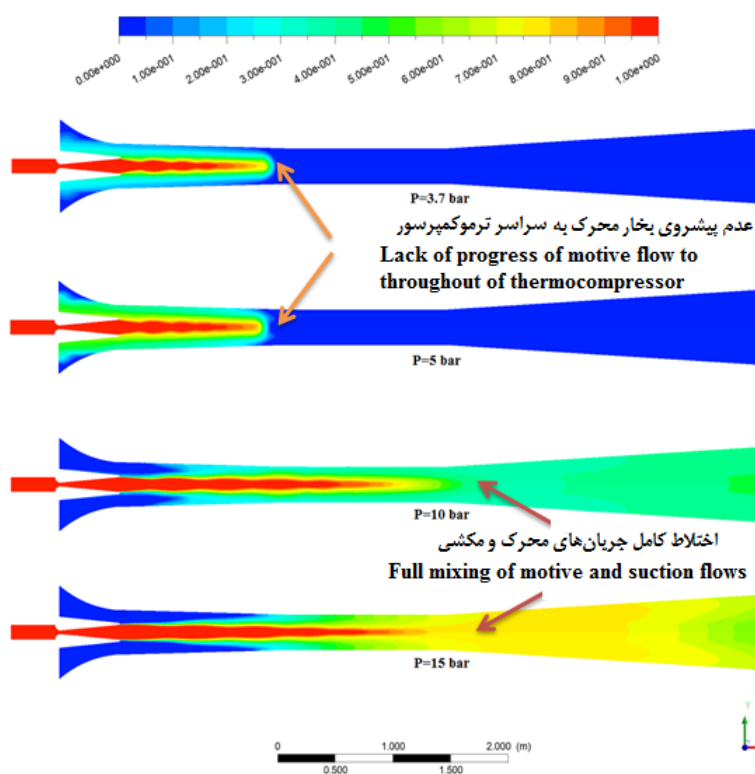
Fig. 10. Velocity contour for within the thermo-compressor in various pressure of motive steam



شکل ۱۱- بردارهای سرعت برای داخل ترموکمپرسور در فشارهای مختلف بخار محرک
Fig. 11. Vector for within the thermo-compressor in various pressure of motive steam

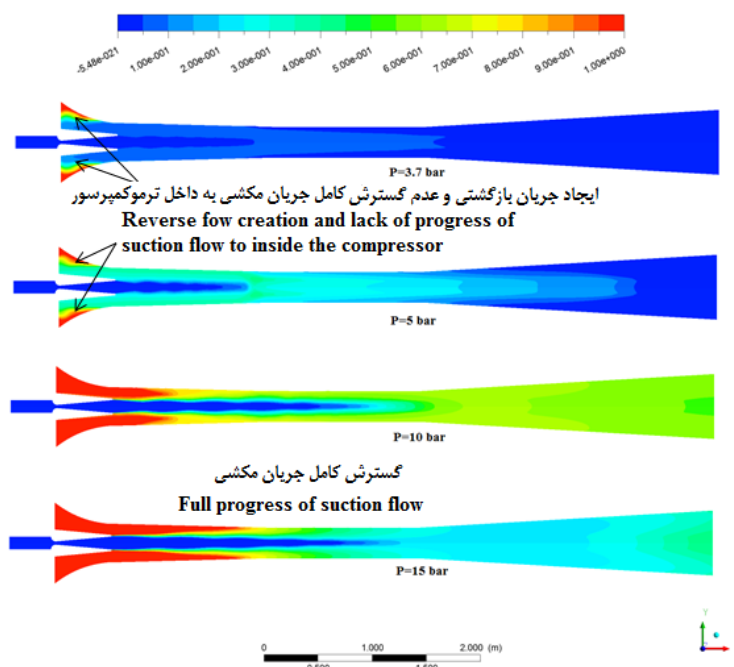


شکل ۱۲- کانتور عدد ماخ برای داخل ترموکمپرسور در فشارهای مختلف بخار محرک
Fig. 12. Mach number contour for within the thermo-compressor in various pressure of motive steam



شکل ۱۳- کانتور نسبت جرمی بخار محرک برای داخل ترموکمپرسور در فشارهای مختلف بخار محرک

Fig. 13. Mass fraction contour of motive steam for within the thermo-compressor in various pressure of motive steam



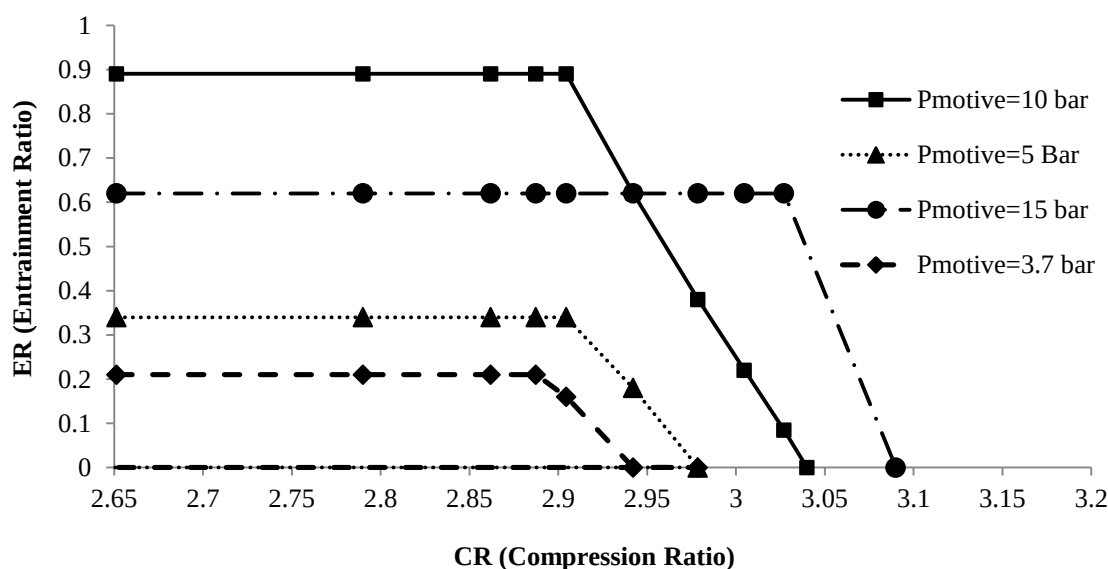
شکل ۱۴- کانتور نسبت جرمی بخار مکشی برای داخل ترموکمپرسور در فشارهای مختلف بخار محرک

Fig. 14. Mass fraction contour of suction vapor for within the thermo-compressor in various pressure of motive steam

پارامترهای عملکردی

نتایج مربوط به ویژگی‌های عملکردی یک ترموکمپرسور از اهمیت بالایی برخوردار است. بخار محرک با فشار ۱۵ بار بیشترین محدوده کار در حالت خفه‌شده دویل (بهترین حالت کاری) را دارا می‌باشد. بعد از نسبت تراکم حدود ۳، نمودار روند کاهشی به خود گرفته و تا نسبت تراکم ۳/۰۹ در حالت خفه‌شده منفرد قرار دارد. در این حالت نسبت ورود ترموکمپرسور بعد از مقدار نسبت تراکم ۳/۰۹

ترموکمپرسور در حالت بازگشتی کامل قرار گرفته و میزان نسبت ورود صفر می‌گردد. روند تغییرات منحنی عملکردی برای سایر بخارهای ورودی با فشارهای مشخص در شکل ۱۵ ارائه شده است. برای بخار محرک با فشار ۱۰ بار در نسبت تراکم کمتری روند نزولی ضریب ورود آغاز می‌گردد و همچنین برای بخارهای محرک با فشار ۵ و ۳/۷ بار نسبت‌های تراکم پایین به همراه نسبت‌های ورود پایین جریان‌های بازگشتی عمده در داخل ترموکمپرسور را توجیه می‌کنند.



شکل ۱۵- منحنی عملکردی برای ۴ حالت از بخار محرک

Fig. 15. Performance curve for 4 modes of motive steam

نتیجه‌گیری

در این مطالعه و در قالب یک بررسی عددی، تاثیر ۴ سطح فشار بخار محرک بر روی مشخصه‌های ترمودینامیکی و همچنین جریان‌های بازگشتی داخل ترموکمپرسور ارزیابی شد. همچنین پارامترهای عملکردی ترموکمپرسور در قالب نمودار عملکردی برای حالت‌های مختلف (خفگی دویل، خفگی منفرد و جریان بازگشتی) ارائه شد. اهم نتایج به‌دست آمده از تحلیل نتایج به شرح زیر است:

از نظر هندسی مطالعه به دو صورت دویبعی متقارن و سه‌بعی مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه سرعت در راستای خط طولی ترموکمپرسور، مشاهده گردید که اختلاف کمی بین شبیه‌سازی دویبعی متقارن محوری و سه‌بعی وجود دارد. از این رو برای این که

از نظر هزینه‌های محاسباتی و زمانی صرفه‌جویی گردد، سایر نتایج برای حالت دویبعی متقارن ارائه گردید.

تأثیر ۴ سطح از فشار بخار محرک بر روی ویژگی‌های ترمودینامیکی داخل دامنه محاسباتی ترموکمپرسور شامل فشار، دما، سرعت، عدد ماخ و نسبت‌های جرمی بخار محرک و بخار مکشی، به‌منظور به‌دست آوردن بهترین سطح از فشار محرک، به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفت و بهترین شرایط برای بخار محرک ورودی با فشار ۱۵ بار به‌دست آمد.

برای مطالعه جریان داخل ترموکمپرسور از نقطه نظر خفگی دویل، خفگی منفرد و جریان بازگشتی مقادیر منحنی عملکردی برای بخار محرک با فشار ۳/۷، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار ارائه گردید.

References

1. Aphornratana, S., and T. Sriveerakul. 2010. Analysis of a combined Rankine–vapour–compression refrigeration

- cycle. *Energy Conversion and Management* 51 (12): 2557-2564. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.04.016>.
2. Ariaifar, K., and A. Toorani. 2012. Effect of Nozzle Geometry on a Model Thermocompressor Performance. 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering 16-19.
3. Bartosiewicz, Y., Z. Aidoun, and Y. Mercadier. 2006. Numerical assessment of ejector operation for refrigeration applications based on CFD. *Applied Thermal Engineering* 26: 604-612. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.07.003>.
4. Besagni, G., and F. Inzoli. 2017. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering* 117: 122-144. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.011>.
5. Besagni, G. 2019. Ejectors on the cutting edge: The past, the present and the perspective. *Energy* 170: 998-1003. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.214>.
6. Bonanos, A. M. 2017. Physical modeling of thermo-compressor for desalination applications. *Desalination* 412: 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.004>.
7. Caliskan, H. 2017. Energy, exergy, environmental, enviroeconomic, exergoenvironmental (EXEN) and exergoenvironoeconomic (EXENEC) analyses of solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69: 488-492. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.203>.
8. Chen, Q., M. K. Ja, Y. Li, and K. J. Chua. 2019. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid spray-assisted low-temperature desalination/thermal vapor compression system. *Energy* 166: 871-885. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.154>.
9. Dutton, J. C., and B. F. Carroll. 1986. Optimal Supersonic Ejector Designs. *Journal of Fluids Engineering* 108: 414-420. <https://doi.org/10.1115/1.3242597>.
10. Huang, B. J., J. M. Chang, C. P. Wang, V. A. and Petrenko. 1999. A 1-D analysis of ejector performance. *International Journal of Refrigeration* 22 (5): 354-364. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00004-3).
11. Inc. ANSYS. 2013. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 182 15317: 373-464.
12. Ji, M., T. Utomo, J. Woo, Y. Lee, H. Jeong, and H. Chung. 2010. CFD investigation on the flow structure inside thermo vapor compressor. *Energy* 35 (6): 2694-2702. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.002>.
13. Keenan, J. H. 1942. A simple air ejector. *Journal of Applied Mechanics* 64: 75-81. <https://doi.org/10.1115/1.4009187>.
14. MyoungKuk, J., T. Utomo, J. Woo, Y. H. Lee, H. M. Jeong, and H. S. Chung. 2010. CFD investigation on the flow structure inside thermo vapor compressor. *Energy* 35 (6): 2694-2702. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.002>.
15. Naimi, S., Gh. Shahgholi, A. Rezvanivand Fanaie, and V. Rotampour. 2019. Numerical Study of Wheat Conveying in Separator Cyclone Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Agricultural Machinery* 11 (2): 231-246. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v11i2.79613>.
16. Noori, S. M., and R. Kouhikamali. 2016. CFD-aided mathematical modeling of thermal vapor compressors in multiple effects distillation units. *Applied Mathematical Modelling* 40: 6850-6868. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.02.032>.
17. Rezvanivandefanayi, A., and A. M. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator. *International Journal of Food Engineering* 11 (1): 71-77. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0125>.
18. Rezvanivandefanayi, A., A. Hassanpour, and A. M. Nikbakht. 2019. Study of the vapor thermos-compressor to reduce energy consumption in the sugar production line using Computational Fluid Dynamics: *Journal of Agricultural Machinery* 10 (2): 241-253. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v10i2.76872>
19. Rezvanivand Fanaei, A., A. M. Nikbakht, and A. Hassanpour. 2021. A Computational-Experimental Investigation of Thermal Vapor Compressor as an Energy Saving Tool for the Crystallization of Sugar in a Sugar Processing Plant. *Journal of Food Process Engineering* 44 (7): <https://doi.org/10.1111/jfpe.13727>.
20. Riffat, S. B., and S. A. Omer. 2001. CFD modelling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid. *International Journal of Energy Research* 25: 115-128. <https://doi.org/10.1002/er.666>.
21. Sabralilou, B., A. Mohebbi, E. Akbarian, A. Rezvanicand fanaei. 2019. Aero-acoustical Study of Axial Fan using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Agricultural Machinery* 10 (2): 255-264. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v10i2.74963>
22. Sharifi, N., M. Boroomand, and R. Kouhikamali. 2012. Wet steam flow energy analysis within thermo-compressors. *Energy* 47 (1): 609-619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.003>.
23. Sharifi, N., and M. Boroomand. 2013. An investigation of thermo-compressor design by analysis and experiment : Part 2. Development of design method by using comprehensive characteristic curves. *Energy Conversion and Management* 69: 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.12.034>.
24. Sriveerakul, T., S. Aphornratana, and K. Chunnanond. 2007. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results. *International Journal of Thermal Sciences* 46

- (8): 812-822. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.014>.
25. Sun, D. W. 1997. Solar powered combined ejector-vapour compression cycle for air conditioning and refrigeration. *Energy Conversion and Management* 38 (5): 479-491. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00063-5).
26. Sun, D. W. 1999. Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle operating with various refrigerants. *Energy Conversion and Management* 40: 873-884. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00151-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00151-4).
27. Zhu, J., F. Botticella, and S. Elbel. 2018. Experimental investigation and theoretical analysis of oil circulation rates in ejector cooling cycles. *Energy* 157: 718-733.
28. Zobeiri, M., V. Rostampour, A. Rezvanivand Fanaei, and A. M. Nikbakht. 2019. Experimental and Numerical investigation of deviation blade effect on sedimentation chamber performance in chickpea harvesting machine. *Iran Biosystems Engineering* 52: 329-339. (In Persian). DOI: [10.22059/ijbse.2020.276317.665166](https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.276317.665166).



Measurement and Analysis of Fruit Vibration on the Truck Bed during Transportation on Highways

A. Ramezani Boukat^{1*}, H. Navid², M. J. Musevi Niya³, S. Ranjbar⁴

1- PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Associate Professor, Department of Communications Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

4- PhD Student, Department of Communications Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: ramezani.boukat@gmail.com)

DOI: [10.22067/jam.2021.68715.1016](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68715.1016)

Received: 07-02-2021

Revised: 25-05-2021

Accepted: 26-05-2021

Available Online: 26-05-2021

How to cite this article:

Ramezani Boukat, A., H. Navid, M. J. Musevi Niya, and S. Ranjbar. 2022. Measurement and Analysis of Fruit Vibration on the Truck Bed during Transportation on Highways. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 399-408. (In Persian).

DOI: [10.22067/jam.2021.68715.1016](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68715.1016)

Introduction

Transportation of fresh fruit and vegetables is complicated because it can be affected by various factors. Truck vibration is one of the most prevalent causes of mechanical damage to fresh fruit during transportation. Poor driving performance, road features, package features, truck features, package location, and fruit features are the main factors that affect truck vibration. After the harvest, the crop's quality can be maintained and cannot be improved. Thus, the globalization of fresh produce trade needs better long-distance transportation systems to deliver high-quality products to the consumer. Fruit packaging is an essential factor in reducing the mechanical damages caused by transportation. A wide-ranging of distribution environments could affect designing packages. Accurate information about the traffic and transportation status of any region helps packaging designers to produce a more precise simulation of the existing conditions. Thus, this research was conducted to analyze the vibration levels for truck transport on highway roads using multi-sensor-based computing on packaged fruit in Iran.

Materials and Methods

Towards this goal, a wireless sensor network (WSN) made of three sensor nodes with tri-axial accelerometers was designed to measure the vibration levels of a truck equipped with leaf-spring suspension on highway roads. This WSN solution enabled the sensors to be easily mounted at different locations and provided real-time data monitoring. A GPS receiver and a laptop were used to determine the location of the truck, and data analysis, receptively. To analyze the vibration data a, power spectral density function (PSD) levels were applied. A PSD function shows the strength of the variations (energy) as a function of frequency. Broadly, it shows at which frequencies variations are strong and weak. The vibration levels measurement was carried out on three trucks with leaf-spring suspension. The three selected routes represent different roads type in Iran. The reason for sampling the data acquired in the long route was to obtain information from different geographical locations on the country's roads.

Results and Discussion

The acquired data can be used in laboratory vibration tests if it is independent of the fruit type. Because the acceleration of the truck bed, unlike the one in top rows, does not depend on the fruit type and the acceleration at the end of the truck is higher than at the front, the current study focused on the vibration at the end of the truck bed. Compared to the ASTM 4728 standard, the PSD levels of the truck on highway roads were higher from 1 to 35 Hz and lower from 35 to 200 Hz. The average RMSG values calculated for lateral, longitudinal and vertical directions of heavy trucks were 0.406, 0.236, and 0.654 G, respectively. For trucks with spring suspension, the highest PSD values occurred at frequencies below 6 Hz, and the frequency range of 3-4 Hz was determined as the dominant frequency. Comparing the average RMSG (0.654 G) found with the ones mentioned in previous studies showed that the vertical vibration levels of the truck in Iran are higher than in most countries. Apart from

driving quality, these results can be explained by the type of suspension system, amount of load, and road quality.

Conclusion

In sum, the results can be used to simulate the truck transport conditions by programmable vibration simulators to reproduce the vibration conditions for package testing on Iran roads. The findings are highly interested in improving packaging design, reducing fruit damage, maintaining shelf life, smart transportation, and related industries. Thus, potential future works are lab simulations, optimizations of packages, and the development of a real-time vibration monitoring system.

Keywords: Highway, Power spectral density, Road transportation, Truck, Vibration measurement

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۹۹-۴۰۸

اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاش وارده به میوه در کف اتاق کامیون حین حمل‌ونقل در بزرگراه‌ها

علی رمضانی بوکت^{۱*}، حسین نوید^۲، میرجواد موسوی‌نیا^۳، سجاد رنجبر^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

چکیده

حمل‌ونقل میوه و سبزی تازه به دلیل اثرگذاری پارامترهای مختلف موضوع پیچیده‌ای است. بسته‌بندی میوه یکی از پارامترهای ضروری در کاهش صدمات مکانیکی ناشی از حمل‌ونقل است. اطلاعات دقیق در مورد وضعیت جاده‌ای و شرایط حمل‌ونقل هر منطقه به طراحان جعبه کمک می‌کند تا شبیه‌سازی دقیقی از شرایط موجود داشته باشند. هدف از این تحقیق اندازه‌گیری شتاب ارتعاش کف کامیون برای حمل‌ونقل جاده‌ای در بزرگراه‌های کشور بود. یک شبکه حسگر بی‌سیم متشکل از سه گر حسگر با شتاب‌سنج سه محوره برای اندازه‌گیری شتاب لحظه‌ای در جلو و عقب کامیون‌های دارای سامانه تعلیق فنری به کار گرفته شد. مقادیر شتاب اندازه‌گیری شده توسط پایگاه داده جمع‌آوری و در لپ‌تاپ ذخیره گردید. در مقایسه با استاندارد ASTM 4728، سطوح چگالی طیف توان کامیون در بزرگراه برای بازه فرکانسی ۱-۳۵ هرتز بیشتر از استاندارد و برای بازه فرکانسی ۲۰-۳۵ هرتز کمتر از استاندارد بود. متوسط ریشه میانگین مربعات شتاب در راستاهای عرضی، طولی و عمودی کامیون‌های سنگین به ترتیب ۰/۲۳۶ و ۰/۶۵۴ G به دست آمد. برای کامیون با سیستم تعلیق فنری، بالاترین مقادیر PSD در فرکانس‌های کمتر از ۶ هرتز اتفاق افتاد و بازه فرکانسی ۳-۴ هرتز به عنوان فرکانس غالب تعیین گردید. یافته‌های تحقیق می‌تواند در شبیه‌سازی شرایط حمل‌ونقل و برای برنامه‌ریزی میزهای ارتعاشی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری ارتعاش، بزرگراه، حمل‌ونقل جاده‌ای، چگالی طیف توان، کامیون

مقدمه

تجارت جهانی محصولات تازه، نیازمند روش‌های جابه‌جایی و سامانه‌های حمل‌ونقل مناسب برای فواصل طولانی است (Vigneault et al., 2009).

ارتعاشات حین حمل‌ونقل جاده‌ای از علل اصلی صدمه مکانیکی به محصولات کشاورزی در مرحله پس از برداشت محسوب می‌شود (Gebresenbet et al., 2011). پس از برداشت، کیفیت محصولات کشاورزی بهبود نمی‌یابد ولی با اندیشیدن تدابیر لازم می‌توان آن را حفظ نمود (Bachmann and Earles, 2000). در مطالعات بسیاری میزان صدمه مکانیکی ناشی از ارتعاش حمل‌ونقل در میوه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است (Ishikawa et al., 2009; Yenge and Nidoni, 2014; Mansouri Alam and Ahmadi, 2018; Springael et al., 2018) که عملکرد ضعیف راننده، خصوصیات جاده، خصوصیات جعبه، خصوصیات کامیون، محل قرارگیری جعبه و خصوصیات میوه از عوامل اصلی ایجاد ارتعاش و در نتیجه بروز صدمه بیان شده‌اند (Zhou et al., 2007; Ranathunga et al., 2010; Zhang et al., 2011).

یکی از روش‌های بررسی اثر ارتعاش روی محصولات کشاورزی و ارزیابی بسته‌بندی‌های مختلف، آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شرایط حمل‌ونقل با استفاده از میزهای ارتعاشی است. این

حمل‌ونقل یکی از مهم‌ترین صنایع حال حاضر دنیا محسوب می‌شود که با چالش‌های محسوس و نامحسوس گوناگونی روبه‌رو است. بررسی مسائل مربوط به این بخش می‌تواند با به‌کارگیری تکنولوژی‌های به‌روز فناوری اطلاعات مانند سامانه موقعیت‌یاب جهانی و شبکه حسگرهای بی‌سیم برای فراهم آوردن پایش دقیق اطلاعات، تسهیل گردد (Ruiz Garcia et al., 2007). در همه حالت‌های حمل‌ونقل، محصول در معرض کاهش کیفیت قرار دارد لذا

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی برق- مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق- مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(*)- نویسنده ایمیل: Email: ramezani.boukat@gmail.com

DOI: 10.22067/jam.2021.68715.1016

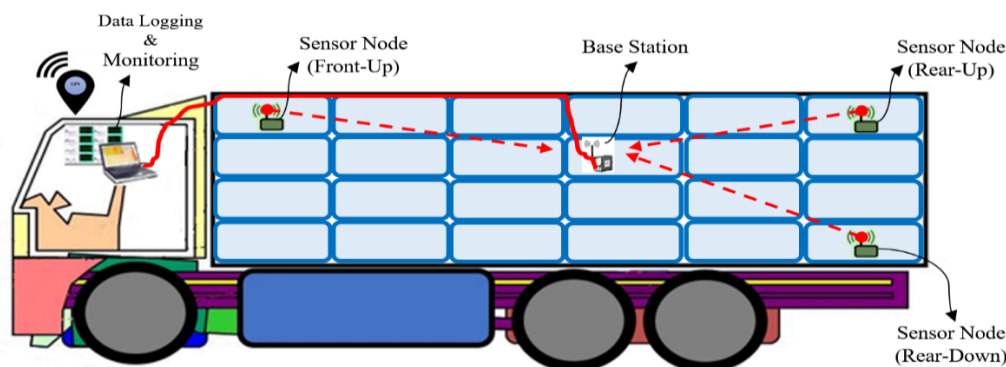
مواد و روش‌ها

این تحقیق شامل اندازه‌گیری شتاب در موقعیت کف کامیون در شرایط واقعی با سرعت حمل‌ونقل معمول در ایران، برای به‌دست آوردن فرکانس غالب بزرگراه‌های کشور می‌باشد که نتایج تحقیق می‌تواند در آزمون‌های ارتعاش آزمایشگاهی و ارزیابی بسته‌بندی‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. مطابق مطالعات قبلی برای همه مسیرهای هدف، سطح ارتعاش در محور عمودی به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از محورهای جانبی و طولی بود (Park et al., 2020). این موضوع علاوه بر کامیون برای سایر وسایل حمل‌کالا مانند موتورسیکلت برقی، خودرو سواری و اتومبیل ون مورد بررسی قرار گرفت که در همه موارد شتاب بیشتری در راستای عمودی مشاهده شد (Zhou and Wang, 2018). از آنجا که شتاب کف کامیون برخلاف ردیف‌های بالایی، به نوع میوه بستگی ندارد و شتاب در انتهای کامیون بیشتر از جلوی آن است (Hinsch et al., 1992) لذا در این تحقیق مقادیر شتاب عمودی در انتهای کف کامیون با سرعت واقعی حمل‌ونقل در ایران (۹۰-۷۰ کیلومتر در ساعت) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری شتاب ارتعاشی کامیون در موقعیت‌های از پیش تعیین شده، یک شبکه حسگر بی‌سیم به‌کار گرفته شد که طرح‌واره آن به همراه اجزای تشکیل‌دهنده در شکل ۱ نشان داده شده است. قبل از بارگیری، گره حسگرها با استفاده از چسب دوطرفه در کف جعبه‌ها نصب و در هنگام بارگیری جعبه‌های حاوی گره حسگر در موقعیت‌های از پیش تعیین شده (عقب-پایین، عقب-بالا و جلو-بالا) قرار داده شد و سپس جعبه به‌آرامی با محصولی که حمل می‌شد، پر گردید. گره سینک نیز در موقعیت وسط گره‌های حسگر درون جعبه قرار داده شد و کابل انتقال داده به آن وصل گردید.

حسگر مورد استفاده ADXL345، یک شتاب‌سنج سه محوره کوچک با توان مصرفی بسیار پایین و قابلیت اندازه‌گیری با تفکیک‌پذیری بالا (۱۳ بیت) تا شتاب $\pm 16G$ بود که با توجه به قابل انتخاب بودن محدوده اندازه‌گیری، بازه اندازه‌گیری $\pm 4G$ تعیین گردید. سنسور در داخل یک محفظه مشبک قرار داده شد تا وزنی روی آن وارد نشود و امکان ارتعاش آزاد برای سنسور وجود داشته باشد. اندازه‌گیری سطح ارتعاش بر روی سه کامیون با سیستم تعلیق فنری انجام شد. با توجه به مطالعات پیشین، طول نمونه مقادیر شتاب ثبت شده در کل محاسبات ۱۰۲۴ انتخاب گردید و نرخ داده‌برداری برای هر حسگر ۴۰۰ داده در ثانیه بود. مسیرهای مورد مطالعه در تحقیق به نحوی انتخاب شد که مناطق مختلفی از سطح کشور را پوشش داده و نتایج حاصل قابل‌تعمیم به کل جاده‌های کشور باشد.

آزمون‌ها علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف بسته‌بندی یا به‌کارگیری ضربه‌گیر در حمل‌ونقل میوه را ممکن می‌سازند (Wasala et al., 2015). در همین راستا برخی از استانداردها مانند ASTM و ISTA سطوح چگالی طیف توان را برای شبیه‌سازی ارتعاشات حمل‌ونقل ارائه داده‌اند (Lu et al., 2010). چگالی طیف توان (PSD) که نوعی پردازش ثانویه روی سیگنال‌های تبدیل سریع فوریه (FFT) است، بیانگر توزیع توان با توجه به فرکانس بوده و به‌صورت انرژی سیگنال نیز می‌توان آن را بیان نمود. در واقع آن نشان می‌دهد کدام فرکانس‌ها قوی و کدام ضعیف هستند. بر اساس داده‌های اخیر به‌دست آمده در کره جنوبی، توابع PSD هنوز هم به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند چون که شرایط آزمون شتاب را به‌راحتی می‌توان از PSD حاصل از یک بخش حمل‌ونقل ایجاد نمود (Park et al., 2020). سطح ارتعاشات اندازه‌گیری شده می‌تواند برای برنامه‌ریزی و پیکربندی تجهیزات ارتعاش آزمایشگاهی در بازتولید شرایط ارتعاش (Rissi et al., 2008) و توسعه روش‌های آزمون برای ارزیابی جعبه‌ها استفاده گردد (Chonhenchob et al., 2009). ارزیابی سطوح ارتعاش کامیون در برخی از کشورها مانند هند (Singh et al., 2007)، ژاپن (Lu et al., 2008)، برزیل (Rissi et al., 2008)، اسپانیا (Garcia et al., 2008)، تایلند (Romeu Martinez et al., 2008)، چین (Zhou and Wang, 2018) و کره جنوبی (Park et al., 2020) برای ایجاد یک پایگاه داده به‌منظور تعریف "محیط‌های توزیع در سراسر جهان" مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

به دلیل مسافت طولانی بین باغ‌ها و مصرف‌کنندگان در ایران، کامیون‌ها در حمل‌ونقل محصولات کشاورزی نقش به‌سزایی دارند. کل طول جاده‌های کشور در سال ۲۰۱۸ حدود ۸۸۰۰۰ کیلومتر بوده است. به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر راه بین‌شهری، ۲۲ کیلومتر آزادراه و بزرگراه وجود دارد. علی‌رغم اهمیت این بخش و گستردگی راه‌های کشور، هیچ مطالعه قابل‌توجهی برای بررسی تجزیه و تحلیل ارتعاش هنگام حمل میوه بسته‌بندی شده با استفاده از حسگرهای نصب شده در کامیون انجام نشده است. هدف این مطالعه برآورد سطح ارتعاش کف اتاق کامیون‌های حمل میوه در بزرگراه‌های کشور و به‌دست آوردن فرکانس غالب ارتعاش، به‌منظور تامین اطلاعات دقیق در مورد وضعیت جاده‌های کشور برای طراحان جعبه و بسته‌بندی است. نتایج حاصل مستقل از نوع میوه بوده و می‌تواند با تعریف شرایط حمل‌ونقل در میزهای ارتعاش، برای بررسی صدمات حمل و نقل کلیه میوه‌ها و طراحی جعبه‌های مناسب مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱- اندازه‌گیری سطوح ارتعاش کامیون در حمل‌ونقل با استفاده از شبکه حسگرهای بی‌سیم

Fig.1. Measurement of truck vibration levels in transportation using wireless sensor network

حمل محصول از انبار سورتینگ در شیراز تا میدان تره‌بار بیرجند است. جدول ۱ جزئیات کامیون‌ها، بسته‌بندی و مسیرهای مورد استفاده در مطالعه را نشان می‌دهد.

شکل ۲ مسیرهای طی شده در اندازه‌گیری سطوح ارتعاش جاده‌ای را نشان می‌دهد. مسیر ۱ مربوط به حمل محصول از میدان تره‌بار تبریز تا شهر کرج، مسیر ۲ مربوط به حمل محصول از روستای کرمجوان شهرستان مراغه تا میدان تره‌بار تهران و مسیر ۳ مربوط به



شکل ۲- مسیرهای مورد بررسی در اندازه‌گیری ارتعاشات کامیون

Fig.2. Routes investigated in measuring truck vibrations

که نمودار آن در باندهای باریک فرکانسی با استفاده از رابطه (۱) حاصل می‌گردد (Rissi et al., 2008).

$$PSD = \frac{1}{BW} \sum_{i=1}^n (RMS_{G_i}^2) / N \quad (1)$$

که در آن: PSD چگالی طیف توان ($G^2 \text{ Hz}^{-1}$); N تعداد نمونه‌ها؛ BW پهنای باند (Hz); RMS_G ریشه میانگین مربعات شتاب (G).

مقادیر RMS_G نیز با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است (Zhou and Wang, 2018).

داده‌های شتاب به‌دست آمده از حسگرها به‌صورت فایل متنی و شامل اطلاعات شماره گره و مقادیر شتاب در سه راستای X ، Y و Z است. در هر داده‌برداری سرعت کامیون، علاوه بر سرعت‌سنج با استفاده از یک گیرنده GPS تعیین شد و برای پردازش و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای اکسل^۱ و متلب^۲ استفاده گردید. ارتعاشات تصادفی در حوزه فرکانس را می‌توان با چگالی طیف توان ارائه نمود

1- Excel 2013

2- MATLAB R2015b

جدول ۱- ویژگی‌های کامیون و جزئیات بسته‌بندی و مسیرهای اندازه‌گیری سطح ارتعاش

Table 1- Truck features and details of the packaging, and routes for vibration levels measurement

شماره کامیون Truck ID	1	2	3
برند Brand	بنز اکسور Benz Axor	فوتون Foton	بنز اکسور Benz Axor
سال ساخت Year of built	2009	2014	2007
سیستم تعلیق Suspension type	فنری Leaf-spring	فنری Leaf-spring	فنری Leaf-spring
تایر Tire	315/80 R22.5	235/7.5 R17.5	315/80 R22.5
ظرفیت بار Load capacity (kg)	10000	4000	10000
وزن بار Load weight (kg)	9500	4000	8300
میوه Fruit	سیب Apple	سیب Apple	گوجه فرنگی Toamto
نوع جعبه Package type	RPC *	RPC	RPC
مسیر Route	تبریز - کرج Tabriz-Karaj	مراغه - تهران Maragheh-Tehran	شیراز - بیرجند Shiraz-Birjand
فاصله Distance (km)	550	600	1000

* جعبه پلاستیکی با قابلیت استفاده مجدد (490*300*190 mm³)*Reusable Plastic Crates (490*300*190 mm³)

یک داده‌برداری از بزرگراه مسیر ۲، در موقعیت حسگر عقب-پایین و سرعت ۹۰ km h⁻¹ در شکل ۳ نشان داده شده است.

از آنجا که در شبیه‌سازی ارتعاش جاده با میزهای ارتعاشی از نمودارهای استاندارد چگالی طیف توان استفاده می‌شود نتایج حاصل برای پنج نمونه داده‌برداری از بزرگراه با استاندارد ASTM D 4728 مقایسه گردید که نتایج در شکل ۴ قابل مشاهده است. برای مقایسه راحت‌تر نمودار PSD با استفاده از نرم‌افزار متلب ساده‌سازی^۲ شد.

چنانچه از نمودار مشخص است مقادیر PSD، در بازه فرکانسی ۱-۳۵ هرتز بیشتر از نمودار استاندارد ASTM D 4728 و برای فرکانس‌های بالای ۳۵ هرتز کمتر از استاندارد می‌باشد. نتایج حاصل در فرکانس‌های ۱-۳۵ هرتز با نتایج تحقیق سلیمانی و احمدی که مقادیر PSD را در بازه فرکانسی ۱۰۰-۱ هرتز بیشتر از مقادیر استاندارد ASTM به‌دست آوردند، مطابقت دارد (Soleimani and Ahmadi, 2014). این موضوع ضمن تایید ضرورت در نظر گرفتن داده‌های محلی حاصل از حمل‌ونقل واقعی در شبیه‌سازی ارتعاشات جاده‌ای، نشانگر مقادیر بالاتر PSD در فرکانس‌های پایین برای

$$RMS_G = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_i^2} \quad (2)$$

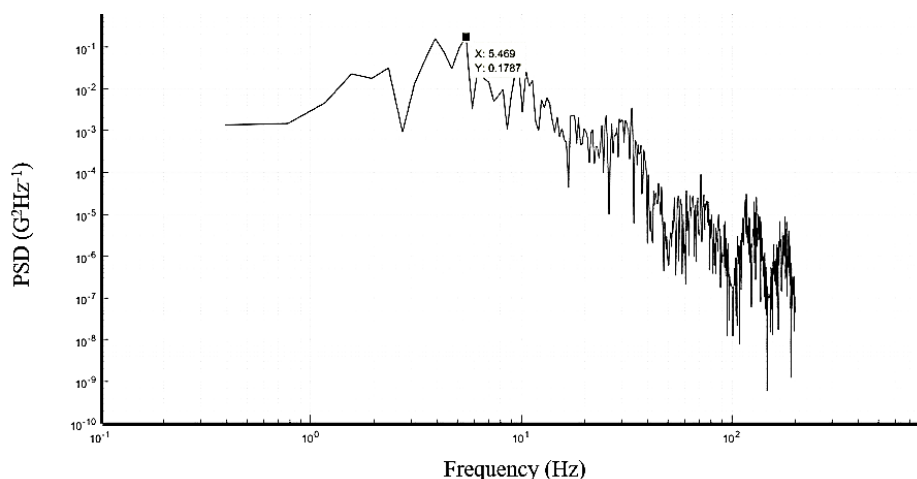
که در آن: G_i شتاب؛ M تعداد داده‌های شتاب. جهش‌های موجود در داده‌ها با استفاده از دستور unwrap در نرم‌افزار متلب که بر اساس زاویه فاز^۱ نمودار را اصلاح می‌کند، تصحیح گردید. نمودار PSD تغییرات انرژی ارتعاش را به‌عنوان تابعی از فرکانس نشان می‌دهد. با توجه به رابطه عکس فرکانس و چگالی طیف توان و در نظر داشتن این‌که نویزها اغلب دارای فرکانس‌های بالا هستند این امر به کاهش و حذف فرکانس‌های نویز کمک کرده و فرکانس‌های اصلی دقیق‌تر مشخص می‌شود.

نتایج و بحث

مقادیر شتاب عمودی ناشی از ارتعاشات جاده‌ای در کف کامیون حمل میوه و در موقعیت‌های مختلف از جاده‌های کشور اندازه‌گیری و نتایج حاصل به‌صورت نمودارهای PSD مورد ارزیابی قرار گرفت. برای نمونه، نمودار PSD ارتعاش کامیون در راستای عمودی برای

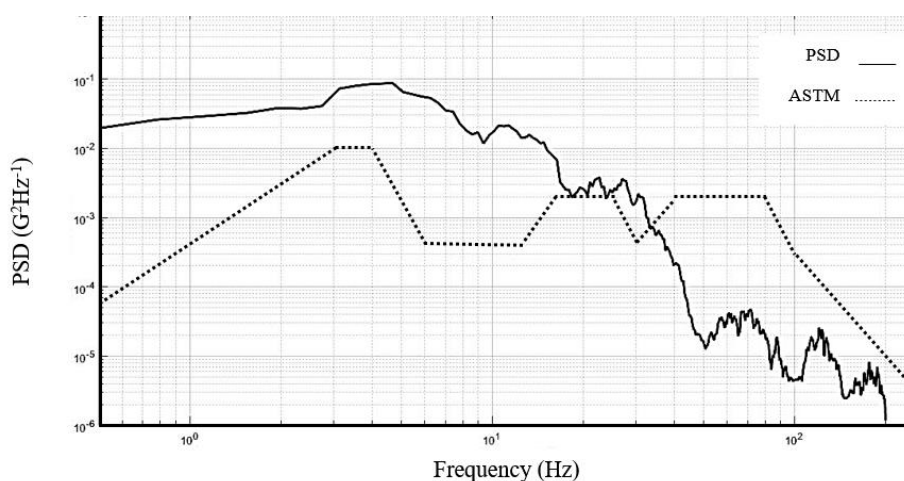
و ۳۰/۱۷ درصد فراوانی، پرتکرارترین سطوح فرکانسی در جاده‌های ایران در حین حمل‌ونقل با کامیون‌های خاور شش چرخ تعیین گردید (Shahbazi et al., 2010) که نتایج نزدیک به محدوده‌های فرکانسی اول و دوم تحقیق حاضر است.

جاده‌های کشور است. به‌طور کلی محدوده‌های فرکانسی ۳-۶، ۸-۱۱ و ۲۰-۳۰ هرتز به‌عنوان اولین، دومین و سومین محدوده ماکسیمم نمودار قابل تشخیص هستند. طی تحقیقی شتاب و فرکانس ارتعاش در نقاط مختلف کف کامیون حین حمل هندوانه اندازه‌گیری شد که فرکانس‌های ۷/۵ و ۱۲/۵ هرتز به‌ترتیب با ۳۳/۲



شکل ۳- نمودار PSD ارتعاش کامیون در راستای عمودی برای یک داده‌برداری از بزرگراه، در سرعت 90 km h^{-1} و موقعیت حسگر عقب-پایین کامیون ۲

Fig.3. The PSD spectrums for the vibration level of truck in a vertical direction on the highway road at 90 km h^{-1} speed on the rear-down location of truck 2



شکل ۴- نمودار ساده‌سازی شده PSD برای ارتعاش عمودی کامیون در بزرگراه و در مقایسه با استاندارد ASTM D 4728

Fig.4. Smoothed PSD spectrums for the vibration level of truck in a vertical direction on highway in comparison to ASTM D 4728 standard

تا ۴۵ هرتز مقادیر چگالی طیف توان در استاندارد GB/T4857.23-2012^۱ در مقایسه با استاندارد ASTM D4169-16، خیلی بیشتر است و نتایج اندازه‌گیری ارتعاش در حین حمل‌ونقل واقعی کمتر از

مطالعات پیشین نشان داد که برای مسیرهای طی شده در کره جنوبی، مقادیر RMS شتاب در شرایط حمل‌ونقل واقعی با استاندارد ASTM مورد استفاده مطابقت داشته و تفاوت آشکاری بین مقادیر ماکسیمم PSD اندازه‌گیری شده و مقادیر استاندارد وجود ندارد (Park et al., 2020). مقایسه نتایج اندازه‌گیری ارتعاشات جاده‌ای در کشور چین با دو استاندارد مورد استفاده، نشان داد در بازه فرکانسی ۴

1- GB/T 4857.23- 2012 truck profiles (packaging, basic tests for transport packages, part 23, random vibration test method)

شدت ارتعاش را در کف کامیون دارد، اندازه‌گیری و ثبت شد. جدول ۲ مقادیر PSD ثبت شده در حمل نقل در سه مسیر با چهار مرحله نمونه‌برداری را ارائه کرده است. باید در نظر داشت که در حمل و نقل واقعی، سرعت در مسیرهای مختلف یکسان نبوده و به تناسب شرایط جاده توسط راننده کنترل می‌گردد. لذا داده‌های جدول ۲ در حمل و نقل واقعی (سرعت ۷۰-۹۰ کیلومتر در ساعت) رخ داده است.

استاندارد ASTM D4169-16 است. لذا استاندارد ASTM D4169-16 برای آزمون‌های ارتعاش در این کشور توصیه و بازه‌های فرکانسی ۳-۴ و ۲۰-۴۰ به عنوان اولین و دومین محدوده ماکسیمم PSD تعیین گردید (Zhou and Wang, 2018).

به منظور به دست آوردن فرکانس غالب ارتعاش کف کامیون در حمل و نقل واقعی که بتوان آن را در آزمون‌های ارتعاش آزمایشگاهی استفاده نمود، مقادیر شتاب در موقعیت عقب-پایین که بیشترین

جدول ۲- سه مقدار ماکسیمم نمودار PSD ($G^2 Hz^{-1}$) برای بزرگراه در سه مسیر مختلف

Table 2- Three peak values of PSD ($G^2 Hz^{-1}$) spectrums on highways in three different routes

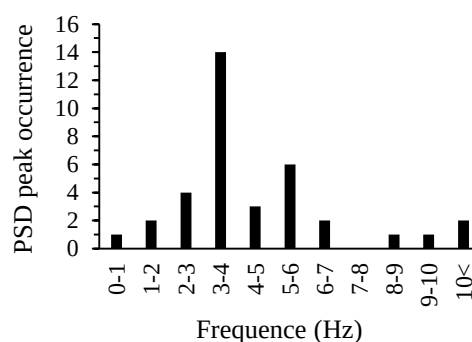
مسیر Route	داده‌برداری Sampling	Freq ₁	PSD _{Max1} *	Freq ₂	PSD _{Max2} *	Freq ₃	PSD _{Max3} *
1	1	3.906	0.423	9.766	0.078	8.594	0.066
	2	3.846	0.214	16.026	0.101	18.590	0.086
	3	3.516	0.237	1.953	0.139	2.734	0.116
	4	3.516	0.335	0.391	0.289	5.469	0.233
2	1	3.774	0.142	1.887	0.136	6.604	0.081
	2	3.906	0.231	2.734	0.15	5.859	0.087
	3	3.906	0.152	5.859	0.148	3.125	0.135
	4	5.469	0.179	3.906	0.159	6.25	0.036
3	1	2.732	0.119	5.463	0.042	3.902	0.041
	2	4.688	0.239	3.125	0.203	3.906	0.124
	3	4.683	0.093	3.122	0.075	5.463	0.053
	4	3.512	0.151	4.683	0.091	2.341	0.039

* مقادیر ماکسیمم نمودار PSD

* Peak values of PSD spectrum

ارتعاشات به طور قابل توجهی پایین است. برای بزرگراه‌های کشور محدوده فرکانسی ۳ تا ۴ هرتز به عنوان فرکانس غالب ارتعاشات می‌باشد.

شکل ۵ نمودار فراوانی سه ماکسیمم PSD نمونه‌های ارائه شده در جدول ۲ را نشان داده است. بیشترین مقادیر PSD در این نمودار نشان می‌دهد مقادیر ماکسیمم PSD اغلب در بازه فرکانسی کمتر از ۶ هرتز رخ داده است و در بازه فرکانسی بیش از ۲۰ هرتز سطح



شکل ۵- فراوانی تعداد ماکسیمم PSD به دست آمده در بازه‌های فرکانسی مربوط

Fig.5. A number of PSD peaks found according to the special frequency ranges

ارتعاش ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ هرتز به دست آمد. همچنین بالاترین سطوح PSD برای تریلرها با سیستم تعلیق فنری فرکانس ۳/۵ هرتز تعیین

در تحقیقی (Vursavuş and Özgüven, 2004) حداکثر مقدار شتاب عمودی در کف کامیون تحت شرایط جاده‌ای در فرکانس‌های

عمودی در شتاب‌های ارتعاشی $0.75G - 0.25G$ به‌دست آمده است (Vursavuş and Özgüven, 2004). در مطالعات پیشین محققان مقدار RMS شتاب در راستای عمودی حین حمل‌ونقل جاده‌ای را $0.161G$ برای هند (Singh et al., 2007)، $0.55G$ برای برزیل (Rissi et al., 2008)، $0.20G$ برای اسپانیا (Garcia Romeu Chonhenchob, 2008)، $0.238G$ برای تایلند (Martinez et al., 2008)، $0.33G$ برای چین (Zhou and Wang, 2018) و $0.31G$ برای کره جنوبی (Park et al., 2020) به‌دست آورده بودند. مقایسه مقدار RMS به‌دست آمده در این تحقیق ($0.654G$) با موارد ذکر شده نشان می‌دهد که سطوح ارتعاش در راستای عمودی در جاده‌های ایران نسبت به اغلب کشورها بیشتر می‌باشد که علاوه بر نحوه رانندگی، می‌تواند از نوع سیستم تعلیق، شرایط جاده و میزان بار ناشی گردد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارتعاشات جاده‌ای در شرایط حمل‌ونقل و در کف کامیون‌های مجهز به سیستم تعلیق فنری در بزرگراه‌های کشور اندازه‌گیری شد که با توجه به قرارگیری حسگر در کف اتاق کامیون، نتایج حاصل مستقل از نوع بار است. با به‌دست آوردن نمودارهای چگالی طیف توان، فرکانس غالب ارتعاشات جاده و مقادیر میانگین مربعات شتاب محاسبه گردید. توجه به زیرساخت‌ها و بهبود کیفیت جاده‌های کشور نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش صدمات حمل‌ونقل دارد و سطح ارتعاش جاده می‌تواند در انتخاب مسیر مناسب مورد توجه قرار گیرد. در مقایسه با استاندارد ASTM 4728، سطوح چگالی طیف توان در بازه فرکانسی ۱-۳۵ هرتز برای بزرگراه‌های کشور، بیشتر از استاندارد و در بازه فرکانسی بالای ۳۵ هرتز، کمتر از استاندارد است. بیشترین مقدار شتاب وارد بر کف کامیون‌های سنگین در جاده‌های کشور $0.654G$ و محدوده فرکانسی ۳ تا ۴ هرتز به‌عنوان فرکانس غالب ارتعاشات به‌دست آمد. نتایج تحقیق می‌تواند به‌عنوان معیاری در برنامه‌ریزی آزمون‌های ارتعاش با استفاده از میزهای ارتعاشی و شبیه‌سازی شرایط حمل‌ونقل جاده‌های کشور مورد استفاده قرار گیرد.

گردید (Hinsch et al., 1992). در یک آزمون تجربی بر روی کامیون مورد استفاده در حمل میوه، ماکسیمم PSD در فرکانس ۹ هرتز به‌دست آمد و از این مقدار برای ارزیابی صدمات ناشی از ارتعاش در یک ستون میوه استفاده گردید (La Scalia et al., 2015).

برای کل داده‌برداری‌های صورت گرفته، مقادیر RMS شتاب در سه جهت عرضی، طولی و عمودی با استفاده از نرم‌افزار متلب محاسبه گردید. مقادیر RMS شتاب در مسیرهای ۱ و ۳ به هم نزدیک است به‌طوری که در راستای طولی به‌ترتیب $0.241G$ و $0.231G$ ، در راستای عرضی $0.393G$ و $0.419G$ ، در راستای عمودی $0.695G$ و $0.614G$ می‌باشد. مقادیر RMS شتاب برای مسیر ۲ در راستای طولی، عرضی و عمودی به‌ترتیب $0.489G$ ، $0.667G$ و $0.850G$ به‌دست آمد که نسبت به مسیرهای ۱ و ۳ مقادیر بیشتری دارند. این اختلاف به دلیل به‌کارگیری کامیون سبک و وزن بار کمتر (۴ تن) نسبت به دو کامیون مورد استفاده در مسیرهای ۱ و ۳ (کامیون سنگین با بار ۱۰ تن) می‌باشد.

با توجه به نتایج فوق، در آزمون‌های ارتعاش برای بیشترین مقدار شتاب وارد بر کف کامیون‌های سنگین در جاده‌های کشور (با محاسبه میانگین مقادیر RMS شتاب عمودی در دو مسیر ۱ و ۳)، شتاب $0.654G$ می‌تواند در نظر گرفته شود. مطالعات آزمایشگاهی بر روی سیب نشان داد که در همه روش‌های بسته‌بندی مورد استفاده، فرکانس $8/2$ هرتز و شتاب ارتعاش $0.63G$ منجر به بیشترین صدمه به محصول گردیده است (Vursavuş and Özgüven, 2004). در تحقیقی کوفتگی ارتعاشی سیب در فرآیند حمل‌ونقل مورد مطالعه قرار گرفت که برای اعمال ارتعاشات کنترل شده، یک دستگاه شبیه‌ساز ارتعاش آزمایشگاهی مورد استفاده بوده است. نتایج نشان داد ترکیب ارتعاشی 13 Hz و $0.7G$ بیشترین آسیب را به سیب‌ها وارد می‌کند (Rostampour and Motlagh, 2018). نزدیک بودن شتاب ارتعاش کف کامیون در جاده‌های کشور به‌شتاب ارتعاشی که منجر به بیشترین صدمه در محصول سیب شده است ضرورت طراحی جعبه و ارتقا بسته‌بندی به‌منظور کاهش ارتعاشات و شتاب وارده بر میوه را نمایان می‌سازد.

طی پژوهشی برای کامیون‌های دارای سیستم تعلیق فنری در چرخ جلو و سیستم تعلیق بادی در عقب، بیشترین توزیع شتاب

References

- Bachmann, J., and R. Earles. 2000. Postharvest handling of fruits and vegetables. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas: 1-19.
- Chonhenchob, V., S. P. Singh, J. J. Singh, S. Sittipod, D. Swasdee, and S. Pratheepthinthong. 2010. Measurement and analysis of truck and rail vibration levels in Thailand. Packaging Technology and Science 23: 91-100.
- Chonhenchob, V., S. Sittipod, D. Swasdee, P. Rachtanapun, S. Singh, and J. A. Singh. 2009. Effect of truck vibration during transport on damage to fresh produce shipments in Thailand. Industrial Technology: 6.
- Garcia Romeu Martinez, M. A., S. P. Singh, and V. A. Cloquell Ballester. 2008. Measurement and analysis of

- vibration levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed. *Packaging Technology and Science* 21: 439-451. <https://doi.org/10.1002/pts.798>.
5. Gebresenbet, G., S. Aradom, F. S. Bulitta, and E. Hjerpe. 2011. Vibration levels and frequencies on vehicle and animals during transport. *Biosystems Engineering* 110: 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.05.007>.
 6. Hinsch, R., W. Craig, D. Slaughter, and J. Thompson. 1992. Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport. *American Society of Agricultural Engineers* 36 (4): 1039-1042. DOI: [10.13031/2013.28431](https://doi.org/10.13031/2013.28431).
 7. Ishikawa, Y., H. Kitazawa, and T. Shiina. 2009. Vibration and shock analysis of fruit and vegetables transport- Cherry transport from Yamagata to Taipei. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ* 43: 129-135.
 8. La Scalia, G., M. Enea, R. Micale, O. Corona, and L. Settanni. 2015. Damage to strawberries caused by simulated transport. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering* 9 (5).
 9. Lu, F., Y. Ishikawa, H. Kitazawa, and T. Satake. 2010. Effect of vehicle speed on shock and vibration levels in truck transport. *Packaging Technology and Science* 23: 101-109. DOI: [10.1002/pts.882](https://doi.org/10.1002/pts.882).
 10. Lu, F., Y. Ishikawa, T. Shiina, and T. Satake. 2008. Analysis of shock and vibration in truck transport in Japan. *Packaging Technology and Science* 21: 479-489.
 11. Mansouri Alam, A., and E. Ahmadi. 2018. Determination of Bruising Damages of Tomato during Road Transportation Process. *Journal of Agricultural Machinery* 8 (1): 185-196. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v8i1.59189>.
 12. Park, J., S. Choi, and H. M. Jung. 2020. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport Environment in Korea. *Applied Sciences* 10: 6754. <https://doi.org/10.3390/app10196754>.
 13. Ranathunga, C., H. Jayaweera, S. Suraweera, S. Wattage, K. Ruwinda, and T. Ariyaratne. 2010. Vibration effects in vehicular road transportation. *Proceedings of the Technical Sessions* 26: 9-16.
 14. Rissi, G. O., S. P. Singh, G. Burgess, and J. Singh. 2008. Measurement and analysis of truck transport environment in Brazil. *Packaging Technology and Science* 21 (4): 231-246. <https://doi.org/10.1002/pts.797>.
 15. Rostampour, V., and A. M., Motlagh. 2018. Evaluation of the bruising susceptibility of apple in transport conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 24 (5): 902-908.
 16. Ruiz Garcia, L., P. Barreiro, J. Rodriguez Bermejo, and J. Robla. 2007. Monitoring the intermodal, refrigerated transport of fruit using sensor networks. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5 (2): 142-156. DOI: [10.5424/sjar/2007052-234](https://doi.org/10.5424/sjar/2007052-234).
 17. Shahbazi, F., A. Rajabipour, S. Mohtasebi, and S. Rafie. 2010. Simulated in-transit vibration damage to watermelons. *Journal of Agricultural Science and Technology* 12: 23-34.
 18. Singh, S. P., A. Sandhu, J. Singh, and E. Joneson. 2007. Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India. *Packaging Technology and Science: An International Journal* 20 (6): 381-392. <https://doi.org/10.1002/pts.764>.
 19. Soleimani, B., and E. Ahmadi. 2014. Evaluation and analysis of vibration during fruit transport as a function of road conditions, suspension system and travel speeds. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 8 (1): 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.08.002>.
 20. Springael, J., A. Paternoster, and J. Braet. 2018. Reducing postharvest losses of apples: Optimal transport routing (while minimizing total costs). *Computers and electronics in agriculture* 146: 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.007>.
 21. Vigneault, C., J. Thompson, S. Wu, K. C. Hui, and D. LeBlanc. 2009. Transportation of fresh horticultural produce. *Postharvest Technologies for Horticultural Crops* 2: 1-24.
 22. Vursavuş, K., and F. Özgüven. 2004. Determining the effects of vibration parameters and packaging method on mechanical damage in golden delicious apples. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 28 (5): 311-320.
 23. Wasala, W., D. Dharmasena, T. Dissanayake, and B. Thilakarathne. 2015. Vibration simulation testing of banana bulk transport packaging systems. *Tropical Agricultural Research* 26 (2): 355. DOI: [10.4038/tar.v26i2.8098](https://doi.org/10.4038/tar.v26i2.8098).
 24. Yenge, G. B., and U. Nidoni. 2014. Transportation losses in fresh fig (*Ficus Carica* L.) fruits. *International Journal of Farm Sciences* 4 (3): 100-109.
 25. Zhang, L. W., C. Yang, Y. Wang, D. Pan, X. Meng, and T. Tong. 2011. Vibration and impact performance tests of cherry tomato transport packages. *Transactions China Society Agriculture Machinery* 42 (3): 125-130.
 26. Zhou, H., and Z. W. Wang. 2018. Measurement and analysis of vibration levels for express logistics transportation in South China. *Packaging Technology and Science* 31: 665-678. <https://doi.org/10.1002/pts.2404>.
 27. Zhou, R., S. Su, L. Yan, and Y. Li. 2007. Effect of transport vibration levels on mechanical damage and physiological responses of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua). *Postharvest Biology and Technology* 46 (1): 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.04.006>.



Optimization of Biogas Production Efficiency from Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste under Thermal Pretreatment at Different Concentrations

S. M. Kamali¹, R. Abdi^{2*}, A. Rohani³, Sh. Abdollahpour⁴, S. Ebrahimi⁵

1- Ph.D. in Agricultural Mechanization Engineering, University of Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran

3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Mashhad, Iran

4- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran

5- Professor, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Iran

(*- Corresponding Author Email: r.abdi@tabrizu.ac.ir)

DOI: [10.22067/jam.2021.68771.1018](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68771.1018)

Received: 22-02-2021

Revised: 18-10-2021

Accepted: 26-10-2021

Available Online: 26-10-2021

How to cite this article:

Kamali, S. M., R. Abdi, A. Rohani, Sh. Abdollahpour, and S. Ebrahimi. 2022. Optimization of Biogas Production Efficiency from Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste under Thermal Pretreatment at Different Concentrations. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 409-421. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.2021.68771.1018](https://doi.org/10.22067/jam.2021.68771.1018)

Introduction

Since anaerobic digestion leads to the recovery of energy and nutrients from waste, it is considered the most sustainable method for treating the organic fraction of municipal solid wastes.

However, due to the long solid retention time in the anaerobic digestion process, the low performance of the process in biogas production as well as the uncertainty related to the safety of digested materials for utilizing in agriculture, applying different pretreatments is recommended.

Thermal pretreatment is one of the most common pretreatment methods and has been used successfully on an industrial scale. Very little research, nevertheless, has been done on the effects of different temperatures and durations of thermal pretreatment on the enhancement of anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes (OFMSW).

The main effect of thermal pretreatment is the rupturing cell membrane and dissolving organic components. Thermal pretreatment at temperatures above 170 °C may result in the formation of chemical bonds that lead to particle agglomeration and can cause the loss of volatile organic components and thus reduce the potential for methane production from highly biodegradable organic waste. Therefore, since thermal pretreatment at temperatures above 100 °C and high pressure requires more energy and more sophisticated equipment, thermal pretreatment of organic materials at low temperatures has recently attracted more attention. According to the researchers, thermal pretreatment at temperatures below 100 °C did not lead to the decomposition of complex molecules but the destruction of large molecule clots.

The main purpose of this study was to find the optimal levels of pretreatment temperature and time and the most appropriate concentration of digestible materials to achieve maximum biogas production using a combination of the Box Behnken Response Surface Method to find the objective function followed by optimizing these variables by Genetic Algorithm.

Materials and Methods

In this study, the synthetic organic fraction of municipal solid waste was prepared similar to the organic waste composition of Karaj compost plant. The digestate from the anaerobic digester available in the Material and Energy Research Institute was used as an inoculum for the digestion process. Some characteristics of the raw materials that are effective in anaerobic digestion including the moisture content, total solids, volatile solids of organic waste, and the inoculum were measured. Experimental digesters were set up according to the model used by MC Leod. After size reduction and homogenization, the synthetic organic wastes were subjected to thermal pretreatment (70, 90, 110 °C) at specific times (30, 90, 150 min).

The Response Surface methodology has been used in the design of experiments and process optimization. In this study, three operational parameters including pretreatment temperature, pretreatment time, and concentration of organic material (8, 12, and 16%) were analyzed. After extracting the model for biogas efficiency based on the relevant variables, the levels of these variables that maximize biogas production were determined using a Genetic Algorithm.

Results and Discussion

The Reduced Quadratic model, was used to predict the amount of biogas production. The value of the correlation coefficient between the two sets of real and predicted data was more than 0.95. The results suggested that pretreatment time followed by the pretreatment temperature had the greatest contribution (50.86% and 44.81%, respectively) to biogas production. Changes in the organic matter concentration, on the other hand, did not have a significant effect ($p < 0.01$) on digestion enhancement (1.63%) but were statistically significant at $p < 0.10$.

The response surface diagram showed that the increase in pretreatment time first led to a rise and then a fall in biogas production. The decline in biogas production seemed set to continue with pretreatment time. Meanwhile, the increase in pretreatment temperature from 70 °C to 110 °C first contributed to higher biogas production and then the decrease in gas production occurred.

The reason for this fall was probably the browning and Maillard reaction.

The regression model was applied as the objective function for variables optimization using the Genetic Algorithm method. Based on the results of this algorithm, the optimal thermal pretreatment for biogas production was determined at 95 °C for 104 minutes and at the concentration of 12%. The expected amount of biogas production by applying the optimal pretreatment conditions was 445 mL-g⁻¹ VS.

Conclusion

In this study, the variables including thermal treatment temperature and time as well as the concentration of organic waste to be anaerobically digested were optimized to achieve the highest biogas production from anaerobic digestion.

Statistical analysis of the results revealed that the application of thermal pretreatment increased biogas production considerably. According to the regression model, the contribution of pretreatment time and temperature to biogas production was significant (50.86% and 44.81% respectively). In stark contrast, varying substrate concentrations in the range of 8 to 16% had a smaller effect (1.63%) on biogas production. The results of this study also showed that the best pretreatment temperature and time were 95 °C and 104 minutes, respectively, at a concentration of 12% by generating 445 mL-g⁻¹ VS biogas which is 31.17% higher than the biogas yield from anaerobic digestion of untreated organic wastes at this concentration.

Keywords: Anaerobic digestion, Genetic algorithm, Optimization, Thermal pretreatment

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۴۲۱-۴۰۹

بهینه‌سازی تولید زیست‌گاز در هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی جامد شهری با غلظت‌های مختلف تحت پیش‌تیمارهای حرارتی

سید مسعود کمالی^۱، رضا عبدی^{۲*}، عباس روحانی^۳، شمس‌الله عبدالله‌پور^۴، سیروس ابراهیمی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

چکیده

در چند دهه اخیر منابع تجدیدپذیر انرژی که باعث آلودگی کمتر محیط‌زیست شوند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان استحصال زیست‌گاز از ضایعات آلی جامد شهری برای تولید انرژی به دلیل کنترل گازهای گلخانه‌ای و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه هضم بی‌هوازی به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های مواجهه با پسماندهای آلی جامد شهری مطرح است، با این حال، این فرآیند دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. از این رو پیش‌فرآوری‌های مختلفی به‌منظور بهبود فرآیند هضم بی‌هوازی و افزایش تولید زیست‌گاز از هضم پسماندهای آلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پیش‌فرآوری حرارتی از موثرترین روش‌ها جهت حذف عوامل بیماری‌زای موجود در مواد زائد آلی است. در همین حال این پیش‌فرآوری می‌تواند تأثیر به‌سزایی در بهبود هضم بی‌هوازی و تسریع هیدرولیز مواد داشته باشد. بنابراین یافتن شرایط بهینه این پیش‌تیمار برای دستیابی به بالاترین مقدار تولید زیست‌گاز حائز اهمیت به‌سزایی است. هدف از این تحقیق دستیابی به بهترین دما و زمان و غلظت در هضم مواد آلی موجود در پسماند شهری است. در این مطالعه، دما و مدت اعمال پیش‌تیمار حرارتی به‌ترتیب در سه سطح ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه و غلظت نیز در سطوح ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور ۱۵ آزمایش به روش سطح پاسخ باکس‌بنکن طراحی شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که اثر متغیرهای دما و زمان در سطح ۱ درصد بر تولید زیست‌گاز معنی‌دار هستند در حالی که تغییرات غلظت در محدوده مورد مطالعه اثر کمتری در تولید این گاز داشته است. همچنین، بهترین سطوح متغیرهای دما و زمان پیش‌تیمار و غلظت مواد هضم‌شونده برای تولید زیست‌گاز به‌ترتیب ۹۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۰۴ دقیقه و غلظت ۱۲ درصد بوده که پیش‌بینی می‌شود اعمال پیش‌تیمار حرارتی در شرایط بهینه متغیرهای مورد ارزیابی موجب تولید ۴۴۵ میلی‌لیتر زیست‌گاز به ازای هر گرم ماده آلی جامد فرار موجود در پسماندهای آلی شود که بدین ترتیب با اعمال پیش‌تیمار حرارتی در شرایط بهینه، افزایش ۳۱/۱۷ درصدی تولید زیست‌گاز نسبت به میزان زیست‌گاز ناشی از هضم مواد بدون اعمال پیش‌تیمار (۳۳۹/۳۳±۶/۱۸) میلی‌لیتر قابل انتظار خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، پیش‌تیمار حرارتی، هضم بی‌هوازی

مقدمه

روش‌های مواجهه با بخش آلی پسماندهای جامد شهری به لحاظ زیست‌محیطی یاد می‌شود. همچنین هضم بی‌هوازی بخش آلی پسماندهای جامد شهری موجب کاهش فضای مورد نیاز جهت دفن پسماندها، کاهش تولید شیرابه و انتشار متان از مراکز دفن پسماند خواهد شد (Maghanaki et al., 2013). کاربرد پیش‌تیمارهای مختلف به دلایل کند بودن فرآیند هضم، عملکرد پایین فرآیند در تولید زیست‌گاز و عدم اطمینان از بی‌خطر بودن مواد هضم‌شده جهت استفاده در کشاورزی توصیه می‌گردد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، برای تبدیل فناوری هضم بی‌هوازی به یک روش اقتصادی و کاربردی با راندمان انرژی بالاتر، می‌توان کاهش حجم مورد نیاز راکتور از طریق افزایش میزان جامدات فرار در واحد حجم راکتور (Pavan et al., 2000) و انجام

هضم بی‌هوازی یک فرآیند زیستی است که در آن متابولیسم طبیعی میکروبی در شرایط عدم حضور اکسیژن، تثبیت پسماندهای آلی را در پی دارد. از آنجا که هضم بی‌هوازی منجر به بازیابی انرژی و مواد مغذی از پسماند می‌گردد از آن به‌عنوان یکی از پایدارترین

۱- دانش‌آموخته دکترای مهندسی مکانیک‌اسیون کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسستم، دانشگاه تبریز، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسستم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی بیوسستم، دانشگاه تبریز، ایران

۵- استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: r.abdi@tabrizu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.2021.68771.1018

مواد پیچیده‌ای که به سختی قابل تجزیه زیستی هستند تولید می‌کند. این واکنش در نتیجه دماهای بالا (بیش از 150°C) و یا حتی در دماهای پایین‌تر ($<100^{\circ}\text{C}$) و زمان‌های طولانی‌تر پیش‌فرآوری اتفاق می‌افتد. علاوه بر این واکنش‌های شیمیایی، پیش‌فرآوری حرارتی در دماهای بالا می‌تواند موجب اتلاف مواد آلی فرار و در نتیجه کاهش پتانسیل تولید زیست‌گاز از مواد با قابلیت بالای تجزیه‌پذیری زیستی گردد. بنابراین اثرات این پیش‌فرآوری بستگی به نوع مواد و محدوده دمایی مورد استفاده خواهد داشت (Elliot and Mahmood, 2012; Penaud et al., 1999).

پیش‌فرآوری حرارتی لجن حتی در دماهای پایین‌تر (70°C) اثر قابل توجهی بر حذف عوامل بیماری‌زا دارد (Skiadas et al., 2005). احتمالاً بر پایه چنین نتایجی، قانون EC 1772/2002 اروپا، پیش‌فرآوری پسماندهای جامد آلی را برای حداقل یک ساعت با دمای 70°C الزامی دانسته است. در این رابطه، پیش‌فرآوری حرارتی در دمای 70°C به‌صورت متعددی مورد مطالعه قرار گرفت. برای مثال، پیش‌فرآوری پسماندهای خانگی و زیست‌توده جلبکی در 70°C به مدت ۱ و ۸ ساعت بررسی شده و مشخص شد که این پیش‌فرآوری تأثیری در افزایش تولید زیست‌گاز نداشت (Chamchoi et al., 2011).

پیش‌فرآوری حرارتی در دمای 70°C بر تولید گاز از هضم ترموفیلیک و مزوفیلیک لجن اولیه و ثانویه اثرات متفاوتی داشته است. در حالی که این پیش‌فرآوری دارای اثر مطلوبی بر هضم مزوفیلیک لجن اولیه بوده، اما برای بهبود هضم ترموفیلیک مفید نبوده است. با این حال اعمال این پیش‌فرآوری، تولید گاز ناشی از هضم لجن ثانویه در شرایط مزوفیلیک و ترموفیلیک را افزایش داد. علت این امر وجود مقادیر بیشتر کربوهیدرات در لجن اولیه و مقدار پروتئین و لیپید بالاتر در لجن ثانویه است (Raposo et al., 2012). از آنجایی که پیش‌فرآوری حرارتی در دمای بیش از 100°C و فشار بالا انرژی بیشتر و تجهیزات پیچیده‌تری می‌طلبد، اخیراً پیش‌فرآوری حرارتی مواد آلی در دمای پایین توجه بیشتری را به خود جلب کرده است (Climent et al., 2007). طبق گزارش محققین، پیش‌فرآوری حرارتی در دماهای کمتر از 100°C منجر به تجزیه مولکول‌های پیچیده نشد اما لخته‌های مولکول‌های درشت را تخریب کرد (Prorot et al., 2011). محققان دیگری نیز با اعمال دمای 90°C به نتیجه مشابهی رسیدند (Barjenbruch et al., 2003). نتایج آن‌ها نشان داد که در این دما الیاف گیاهی از هم گسیخته نمی‌شوند اما تحت تأثیر این پیش‌فرآوری قرار می‌گیرند. در تحقیقی گزارش شد که پیش‌فرآوری حرارتی حلالیت پروتئین‌ها و افزایش حذف ذرات کربوهیدراتی را در پی داشت (Neyens and Baeyens, 2003).

پیش‌فرآوری‌های مختلف جهت بهبود هیدرولیز (Bougrier et al., 2010; Carrere et al., 2008) را به‌عنوان دو راهکار اساسی مورد توجه قرار داد.

ویژگی‌های رئولوژیکی محیط هضم کاملاً وابسته به غلظت مواد یا تمرکز مواد جامد می‌باشد. برخی از محققین سه محدوده هضم تر (محتوای مواد جامد کمتر از ۱۰ درصد)، هضم نیمه‌خشک (محتوای مواد جامد بین ۱۰ تا ۱۵ درصد) و هضم خشک (محتوای مواد جامد بیش از ۱۵ درصد) را در این رابطه معرفی نموده‌اند (Li et al., 2017; Aboudi et al., 2011). شایان ذکر است فرآیند هضم خشک نسبت به هضم تر با فرض اندازه یکسان، قادر به تیمار مقدار بیشتری پسماند است (Fernandez et al., 2008). از سوی دیگر با توجه به این که مربوط ساختن محدوده‌های فوق به نیازمندی‌های فرآیند هضم برای یک ماده مشخص دشوار است بنابراین انجام آزمایش‌ها برای یافتن غلظت بهینه آن ماده جهت هضم الزامی است. به‌عنوان مثال، محققینی گزارش نمودند که هضم بی‌هوازی مواد لیگنوسلولوزی در شرایط محتوای مواد جامد بالا می‌تواند به دلیل تجمع مواد بازدارنده مانند اسیدهای چرب، محدودیت دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد و محتوای کم آب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها اثرات نامطلوبی بر عملکرد فرآیند داشته باشد (Ge et al., 2016). بنابراین در این تحقیق سعی گردید محتوای مواد جامد هضم‌شونده هر سه محدوده هضم تر (۸٪)، نیمه‌خشک (۱۲٪) و خشک (۱۶٪) را شامل گردد.

پیش‌تیمار حرارتی یکی از متداول‌ترین روش‌های پیش‌فرآوری بوده و به‌صورت موفقیت‌آمیزی در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است (Carlsson et al., 2012). پیش‌فرآوری حرارتی همچنین منجر به حذف عوامل بیماری‌زا، بهبود عملکرد آبیگری و کاهش گرانش مواد هضم‌شونده و تسهیل مدیریت این مواد می‌گردد (Edelmann et al., 2005; Liu et al., 2012). اثر اصلی پیش‌فرآوری حرارتی، گسیختگی غشاء سلولی و حل کردن اجزای آلی است (Ferrer et al., 2008; Bien et al., 2004; Marin et al., 2010). محلولیت تقاضای اکسیژن شیمیایی^۱ و دما رابطه‌ای مستقیم دارند. همچنین در دماهای پایین‌تر و زمان‌های بالاتر با اعمال پیش‌فرآوری حرارتی می‌توان به محلولیت بیشتری دست یافت (Mottet et al., 2009). از سوی دیگر پیش‌فرآوری حرارتی در دماهای بالاتر از 170°C ممکن است منجر به ایجاد پیوندهای شیمیایی گردد که توده شدن ذرات را به دنبال داشته باشد (Bougrier et al., 2006). یکی از معروف‌ترین پدیده‌ها، واکنش مایلارد^۲ است که بین کربوهیدرات‌ها و اسیدهای آمینه رخ می‌دهد و

1- Chemical Oxygen Demand (COD)
2- Maillard Reaction

دستیابی به بیشینه تولید زیست‌گاز با استفاده از تلفیق روش سطح پاسخ باکس بنکن برای یافتن تابع هدف و بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک بوده است.

مواد و روش‌ها

مواد آلی و آماده‌سازی جهت هضم

با توجه به تغییرات ترکیب پسماند، ترکیب ثابتی از مواد آلی به‌منظور یکنواختی مواد آزمایشی ساخته شد. جدول ۱ ترکیب مواد مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. اندازه مواد آلی توسط یک خردکن تا کمتر از ۲ میلی‌متر کاهش داده و این مواد کاملاً با هم مخلوط شدند و تا زمان استفاده به‌عنوان مواد هضم‌شونده (حداکثر دو روز) در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Li et al., 2011).

اثرات پیش‌تیمار حرارتی عمدتاً در خصوص بهبود هضم پساب و لجن فاضلاب و بیشتر در دماهای بالا و تعداد محدود تیمارها و با تحلیل‌های ساده آماری و مقایسات میانگین مورد بررسی قرار گرفته است (Bougrier et al., 2006; Ariunbaatar et al., 2014; Li et al., 2016) در حالی که در این پژوهش ضمن مدل‌سازی تولید زیست‌گاز از پسماندهای آلی شهری تحت پیش‌تیمار حرارتی در دماهای متوسط که بر اساس نتایج مطالعات پیشین انتخاب شدند و غلظت‌های مختلف (هضم تر، نیمه‌خشک و خشک)، مطالعات آماری در خصوص میزان تأثیر این متغیرها بر میزان زیست‌گاز تولیدی ناشی از اعمال این پیش‌فرآوری بر هضم پسماندهای آلی نیز انجام گرفته است. از الگوریتم ژنتیک به دلیل سادگی و توانایی حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده غیرخطی (Panda and Padhy, 2008)، برای دستیابی به بهترین سطوح متغیرهای مورد مطالعه بهره گرفته شد. هدف اصلی این تحقیق یافتن سطوح بهینه متغیرهای دما و زمان پیش‌تیمار حرارتی و مناسب‌ترین غلظت مواد هضم‌شونده به‌منظور

جدول ۱- ترکیب پسماند مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table 1- Components of the synthetic organic waste in the essay

ردیف No	نوع پسماند آلی Organic waste material	درصد Percentage
1	ضایعات سیب‌زمینی، پوست موز و پسماندهای سبزیجات و کاهو Potato waste, banana peel, vegetable and lettuce leftover	40
2	ضایعات گوجه، پیاز، خیار، هویج، بادنجان، فلفل دلمه‌ای، کدو تنبل و کلم Tomato, Onion, Cucumber, Carrot, Eggplant, Bell pepper, Zucchini and Cabbage	40
3	روغن Tissue paper, and miscellaneous Bread and bakery, meat product, dairy product, steamed rice, paper and materials including tea, eggshell, walnut, date, and oil	20

مواد تلقیحی

قرار گرفت. در این هاضم عملیات هضم در دمای محیط و بدون گرمایش مواد هضم‌شونده صورت گرفته و مواد ورودی آن عمدتاً کود دامی و همچنین پسماندهای غذایی بوده است.

در این تحقیق، مواد خروجی از هاضم بی‌هوازی موجود در پژوهشگاه مواد و انرژی به‌عنوان مایه تلقیح فرایند هضم مورد استفاده

جدول ۲- مشخصات کلی مواد آلی و ماده تلقیحی مورد استفاده

Table 2- Characteristics of the synthetic OFMSW and the inoculum

ماده Material	محتوای مواد جامد TS (wt %)	محتوای مواد جامد فرار VS (wt %)	اسیدچرب فرار VFA (mg L ⁻¹)	اسیدیته pH
مواد آلی پسماند (OFMSW)	18.85±0.17	91.88±0.85	4219.85±149.73	5.63±0.04
ماده تلقیحی (Inoculum)	16.89±0.42	62.28±0.57	621.43±57.24	8.67±0.06

$$VS = \frac{(A - C) \times 1000}{V} \quad (2)$$

VS میزان جامدات فرار (mg-L^{-1})، A وزن نهایی مواد خشک شده در $103-105$ درجه سانتی‌گراد و ظرف (mg)، C وزن نهایی مواد بعد از سوختن در دمای 550 ± 50 درجه سانتی‌گراد و ظرف (mg) و V حجم نمونه برداشت شده (mL) جهت آنالیز می‌باشند.

پیش‌تیمار حرارتی

با توجه به ماهیت بخش آلی موجود در پسماندهای شهری که عمدتاً شامل موادی مانند باقی‌مانده غذا و سبزیجات و میوه‌جات بوده و برخلاف مواد لیگنوسلولوزی و لجن فعال، به لحاظ بیولوژیکی به راحتی تجزیه‌پذیر می‌باشند، اعمال دماهای بالا در این‌گونه مواد موجب کاهش مواد فرار و همچنین واکنش مایلارد (واکنش بین اسیدهای آمینه و قندها) خواهد گشت که این امر موجب کاهش بازده تولید متان خواهد شد. برای مثال محققین نشان دادند که افزایش تولید متان با دمای پیش‌فرآوری رابطه مستقیم نداشته و متان تجمعی مواد پیش‌تیمار شده در 110 درجه سانتی‌گراد در مدت زمان‌های پیش‌فرآوری 75 و 120 دقیقه کمتر از متان تولیدشده در دمای 90 درجه سانتی‌گراد برای مدت مشابه بوده است. این موضوع احتمالاً مربوط به روی دادن واکنش مایلارد می‌باشد که محصول این واکنش، ملانوئیدین‌ها^۴ بوده که به سختی در شرایط بی‌هوازی تجزیه می‌شوند (Li et al., 2016). لذا با توجه به تحقیقات پیشین، دماها و زمان‌های مختلف مطابق جدول ۳ برای اعمال پیش‌تیمار حرارتی پسماندهای آلی بررسی شدند.

پسماندهای آلی، پس از کاهش اندازه و همگن‌سازی، در زمان‌های مشخص تحت پیش‌تیمار حرارتی قرار گرفتند. برای انجام پیش‌تیمار حرارتی تعدادی بطری شیشه‌ای یک لیتری مخصوص اتوکلاو $GL 45$ حاوی 200 گرم از مواد آلی خرد شده و یک آون مورد استفاده قرار گرفت. درب بطری‌ها به‌منظور جلوگیری از تبخیر و خروج بخار آب محکم بسته شده و پس از اعمال حرارت برای مدت مشخص، بطری‌ها از آون خارج شده و تا دمای محیط خنک شدند. مواد پس از اعمال پیش‌تیمار و اختلاط با مواد تلقیحی درون هاضم‌های آزمایشگاهی برای مدت چهار هفته در دمای مزوفیلیک در انکوباتور نگهداری شده و میزان تولید زیست‌گاز هر یک از آن‌ها اندازه‌گیری گشت.

پس از جداسازی قطعات درشت‌تر از 2 میلی‌متر موجود در این لجن، جهت افزایش غلظت آن به 16 درصد، دستگاه سانتریفوژ به‌کار گرفته شده و این ماده تا زمان استفاده در دمای 35 درجه سانتی‌گراد در شرایط بی‌هوازی نگهداری شد (Angelidaki et al., 2009). این عملیات تا زمانی که تولید روزانه گاز از مواد تلقیحی به میزان ناچیز و کمتر از یک درصد میزان گاز تجمعی شد (حداکثر 7 روز) ادامه یافت. جدول ۲ ویژگی‌های مواد آلی و ماده تلقیحی مورد استفاده در این تحقیق پیش از تنظیم محتوای رطوبت را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی مواد مورد استفاده برای هضم و اندازه‌گیری‌های لازم

برخی ویژگی‌های مواد اولیه که در هضم بی‌هوازی موثر است شامل میزان درصد رطوبت و مواد جامد کل و درصد مواد جامد فرار اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری درصد رطوبت مواد اولیه برای تنظیم غلظت مواد هضم‌شونده اهمیت دارد. پس از تعیین درصد رطوبت مواد، با اضافه نمودن آب، درصد محتوای مواد جامد در سه غلظت 8 ، 12 و 16 درصد تنظیم شد. میزان مواد جامد کل و جامدات فرار به‌ترتیب از طریق توزین مواد پس از کسر رطوبت و سوزاندن در دماهای بالا حاصل گردید (APHA^۱, 2012). یک نمونه از مواد که به‌خوبی مخلوط شده در یک ظرف با وزن خشک مشخص ریخته و در دمای 103 تا 105 درجه سانتی‌گراد تا زمانی که به وزن ثابتی برسد حرارت داده شد. ظرف حاوی مواد در دسیکاتور تا دمای محیط خنک شده و توزین شد. میزان جامدات کل از رابطه (۱) محاسبه شد (APHA, 2012).

$$TS = \frac{(A - B) \times 1000}{V} \quad (1)$$

که در آن TS میزان جامدات کل یا غلظت ماده (mg-L^{-1})، A وزن نهایی مواد خشک شده و ظرف در $103-105$ درجه سانتی‌گراد (mg)، B وزن ظرف (mg) و V حجم نمونه برداشت شده (mL) جهت آنالیز می‌باشند.

برای محاسبه مواد جامد فرار، ظرف حاوی مواد جامد خشک شده در $103-105$ درجه در کوره با دمای 550 ± 50 درجه قرار داده شده تا به وزن ثابتی برسد. میزان کاهش وزن نهایی نسبت به وزن ظرف و مواد خشک، نشانگر میزان مواد جامد فرار می‌باشد و از رابطه (۲) محاسبه گردید (American Public Health Association, 2012).

3- Volatile Solids
4- Melanoidins

1- American Public Health Association
2- Total Solids

جدول ۳- سطوح تیماری مورد ارزیابی در این پژوهش

Table3- Levels of examined treatment in this study

غلظت نمونه‌ها (%) (TS%)	زمان پیش‌تیمار Pretreatment time (min)	دمای پیش‌تیمار Pretreatment temperature (°C)
16, 12, 8	150, 90, 30	70, 90, 110

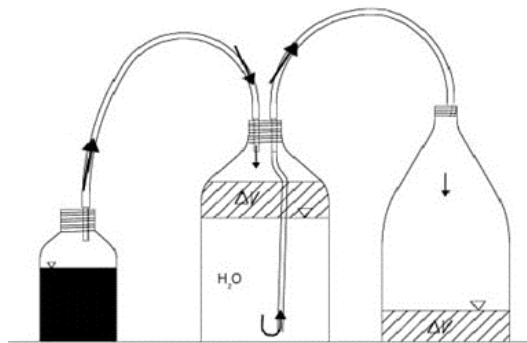
(*al.*, 2009). برخی محققان نسبت مناسب میزان جامدات فرار مواد آلی به مایه تلقیحی جهت تولید زیست‌گاز را ۱ به ۲ توصیه کرده‌اند (Li et al., 2011; Mirmasoumi et al., 2018). در این مطالعه نیز پس از تنظیم محتوای مواد جامد ماده هضم‌شونده و لجن تلقیحی در سه غلظت ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد که به ترتیب بیانگر سه نوع هضم تر، نیمه‌خشک و خشک هستند، مواد هضم‌شونده و لجن با نسبت ۱ به ۲ ($grVS_{Substrate}/grVS_{Inocula}$) بر اساس مواد جامد فرار ترکیب و کاملاً یکنواخت شدند. فضای بالای شیشه‌های هاضم به‌منظور اطمینان از ایجاد شرایط بی‌هوازی، به‌وسیله گاز نیتروژن برای مدت ۲ دقیقه اکسیژن‌زدایی شد.

به این ترتیب هضم بی‌هوازی تیمارهای متعدد از مواد پیش‌فرآوری شده در سه غلظت مختلف در انکوباتور تحت شرایط مزوفیلیک در دمای $37 \pm 1^\circ C$ در مدت چهار هفته انجام گرفت. در این تحقیق ضمن اختلاط مناسب اولیه مواد هضم‌شونده و لجن تلقیح، هاضم‌ها یک مرتبه در هر روز به مدت ۳۰ ثانیه تکان داده می‌شدند.

راه‌اندازی هاضم‌ها و اندازه‌گیری میزان زیست‌گاز

هاضم‌های آزمایشی در این تحقیق مطابق مدل مورد استفاده مک لئود (MC Leod et al., 2015) که همان روش جابه‌جایی آب برای اندازه‌گیری زیست‌گاز تولیدی است، راه‌اندازی شدند. مجموعه هاضم جهت اندازه‌گیری زیست‌گاز تولیدی شامل سه قسمت، بطری مواد هضم‌شونده، بطری آب و بطری خالی برای جمع‌آوری آب بر اساس میزان زیست‌گاز تولیدی بوده است. میزان گاز تولیدی به‌صورت روزانه با توجه به میزان مایع جابه‌جا شده از ظرف آب به ظرف خالی اندازه‌گیری و مجموع این مقادیر روزانه جابه‌جا شده آب که متناسب با حجم گاز تولیدی در طول زمان هضم بوده به‌عنوان میزان تجمعی زیست‌گاز هر هاضم گزارش شد.

در شروع یک فرایند هضم بایستی میزان مشخصی مایه تلقیحی جهت تامین میکروارگانیسم‌های مورد نیاز به مواد هضم‌شونده افزوده گردد. نسبت مواد آلی به مایه تلقیح به صورت مقدار جامدات فرار مواد هضم‌شونده به مواد جامد فرار ماده تلقیحی بیان می‌گردد (Liu et



شکل ۱- نحوه قرارگیری بطری‌ها جهت اندازه‌گیری زیست‌گاز تولیدی

Fig.1. Biogas measurement setup

اساس تحقیقات قبلی، در این پژوهش دماها و زمان‌های به‌کار رفته متناسب با شرایط پسماندهای آلی غذایی تعیین شد. سطوح متغیرهای مستقل و کدهای مربوطه در جدول ۴ برای انجام آزمایش با طرح باکس بنکن برای تخمین مدل رگرسیونی آورده شده است. برای بهینه‌سازی سطوح متغیرها جهت دستیابی به بیشترین مقدار تولید زیست‌گاز از الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

طراحی آزمایش

از روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی و ارزیابی اثرات متقابل فاکتورهای مستقل فرآیندهای هضم بی‌هوازی استفاده شد. در این پژوهش سه پارامتر عملیاتی شامل دمای پیش‌تیمار، زمان پیش‌تیمار و غلظت مواد هضم‌شونده در شرایط هضم مزوفیلیک آزمایش شدند. بر

جدول ۴- سطوح متغیرهای مستقل و کدهای مربوطه

Table 4- Levels of independent variables and related codes

متغیرهای مستقل	نشانه		سطوح کدگذاری شده و مقادیر واقعی آنها		
	Indication		Coded levels and their related values		
	کدگذاری شده Coded	بدون کدگذاری Uncoded	-1	0	1
دما Temperature (°C)	X1	Z1	70	90	110
زمان Time (min)	X2	Z2	30	90	150
غلظت Concentration (%)	X3	Z3	8	12	16

بودند تا زمانی که میزان تولید گاز در سه روز متوالی ناچیز و قابل اغماض (کمتر از ۱ درصد میزان تجمعی تولید گاز) بود، اندازه‌گیری و به‌عنوان زیست‌گاز تجمعی برای تحلیل آزمایش‌ها با طرح باکس-بنکن در نظر گرفته شدند.

انتخاب مدل

مدل‌های مختلف شامل مدل خطی، عامل‌های متقابل، درجه دو و درجه دو کاهش یافته در جدول ۵ آورده شده است.

مدل ریاضی تولید زیست‌گاز به عنوان متغیر وابسته در این طرح به‌صورت رابطه (۳) است:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ji} X_i X_j \quad (3)$$

نتایج و بحث

مدل‌سازی تولید زیست‌گاز

زیست‌گاز تولیدی ناشی از هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی که در غلظت‌های مختلف تحت پیش‌تیمارهای مختلف حرارتی قرار گرفته

جدول ۵- مدل‌های مختلف توجیه تغییرات پاسخ

Table 5- Different models of response variations justification

مدل Model	میزان خطا RMSE	درصد خطا MAPE	ضریب تبیین R ²
Linear	23.1	4.57	0.37
2FI	22.9	4.56	0.37
Red Quad	4.75	0.97	0.97
Quad	4.57	0.97	0.97

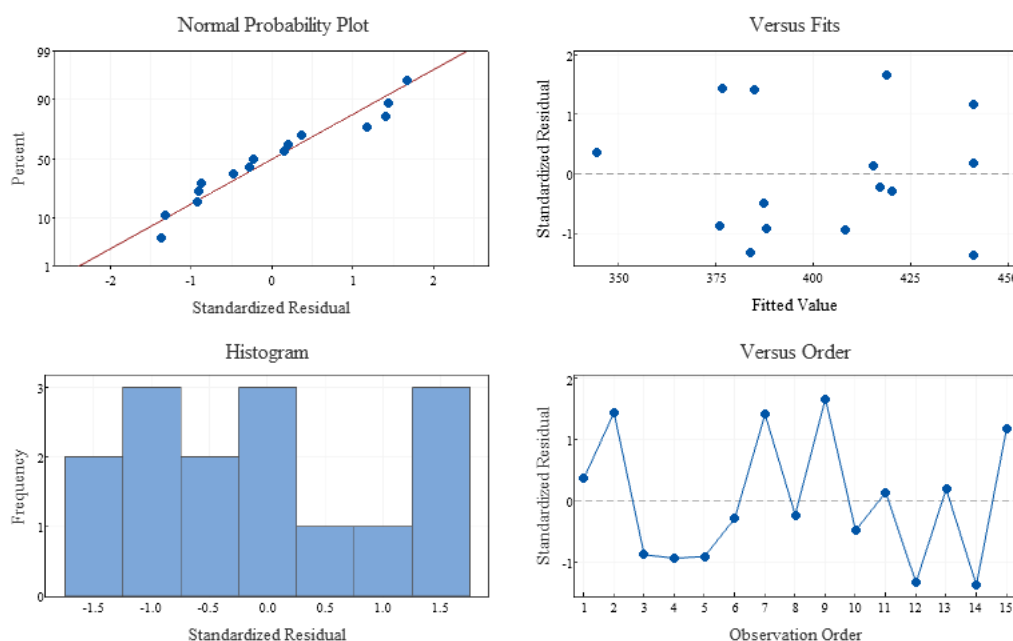
تجزیه واریانس مدل رگرسیون و اعتبارسنجی

نتایج ارزیابی اعتبار مدل درجه دوم کاهش‌یافته در شکل ۲ قابل مشاهده است. سه فرض نرمال بودن توزیع خطاها، یکسان بودن واریانس‌ها و عدم خود همبستگی خطاها، می‌توانند اعتبار مدل را تایید کنند. مطابق شکل (a,c) ۲ واضح است که پراکنش خطاها حول خط نرمال قرار دارد که موید نرمال بودن توزیع خطاها است. همچنین شکل (b) نشان می‌دهد که روند مشخصی بین مقادیر برازش شده با خطاها وجود ندارد و در نتیجه واریانس تیمارها با یکدیگر اختلاف ناچیزی دارند. علاوه بر این، شکل (d) ۲ نیز نشان می‌دهد که توزیع خطاها در مقابل ترکیب آزمایش از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند که این دلالت بر عدم وجود خودهمبستگی بین خطاهای مدل رگرسیونی است لذا نتایج تخمین‌های مدل قابل اعتماد خواهند بود.

بر اساس نتایج حاصل شده، عملکرد مدل درجه دوم و درجه دوم کاهش یافته اختلاف ناچیزی با هم داشته و بنابراین برای سادگی کار از مدل درجه دوم کاهش یافته مطابق رابطه (۴) که دارای جملات کمتری بود برای پیش‌بینی میزان تولید زیست‌گاز استفاده شد. این مدل با حداکثر خطای ۰/۹۷٪ به‌عنوان بهترین مدل به‌منظور توجیه تغییرات میزان تولید زیست‌گاز تحت پیش‌تیمار حرارتی در زمان‌ها، دماها و غلظت‌های مختلف برای پیش‌بینی استفاده شد.

$$Y = -428.30 + 15.09X_1 + 1.91X_2 + 9.72X_3 - 0.08X_1^2 - 0.01X_2^2 - 0.42X_3^2 \quad (4)$$

که در آن X_1 و X_2 به‌ترتیب دمای پیش‌تیمار و زمان پیش‌تیمار حرارتی و X_3 نشانگر محتوای مواد جامد یا غلظت مواد است.



شکل ۲- نتایج ارزیابی اعتبار مدل رگرسیون چندگانه برای تولید زیست‌گاز

Fig.2. The results of multiple regression model evaluation for biogas production

زیست‌گاز هستند. از سوی دیگر گرچه اثر غلظت در سطح ۱٪ معنی‌دار نشد اما در سطح ۱۰٪ اثر معنی‌داری بر تولید زیست‌گاز داشت. علاوه بر این، مدل رگرسیونی توانسته ۹۷٪ تغییرات تولید زیست‌گاز را توسط عامل‌های مدل تبیین نماید.

جدول ۶ نتایج تحلیل واریانس مدل‌های درجه دوم کاهش یافته در تولید زیست‌گاز را نمایش می‌دهد. همانطور که نتایج مقادیر P-Value نشان می‌دهد و زمان پیش‌تیمار به‌عنوان دو پارامتر تاثیرگذار دارای اثرات معنی‌داری در سطح ۱٪ در تغییرات تولید

جدول ۶- نتیجه تجزیه واریانس مدل درجه دوم کاهش یافته MLR تولید زیست‌گاز

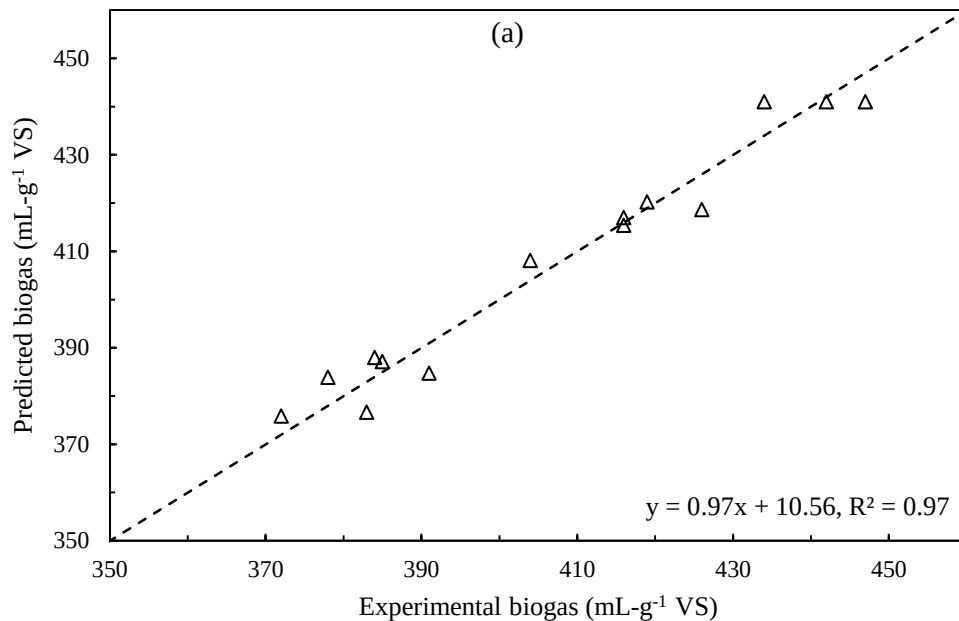
Table 6- Analysis of variance (ANOVA) for reduced quadratic model of biogas production

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی DF	مجموع مربعات SS	میانگین مربعات MS	F-Value	P-Value
رگرسیون Regression	6	11293.00	1882.16	48.14	0.00
دما $T(^{\circ}C)$	1	4130.5	4130.47	105.66	0.00
زمان $t(min)$	1	5138.60	5138.56	131.44	0.00
غلظت $C(\%)$	1	153.00	153.04	3.91	0.08
T^2	1	3722.10	3722.08	95.21	0.00
t^2	1	4020.90	4020.92	102.85	0.00
C^2	1	168.20	168.23	4.30	0.07
باقیمانده Residue	8	312.70	39.09		
عدم برازش Lack of fit	6	226.70	37.79	0.88	0.62
خطای خالص Pure error	2	86.00	43.00		
کل Total	14				

$$R^2 = 97\% \quad R_{adj}^2 = 95\%$$

اساس توافق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل با مقادیر حاصل از آزمایش‌ها تایید می‌شود.

همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، مقدار همبستگی بین دو مجموعه داده واقعی و پیش‌بینی شده بیش از ۰/۹۷ است. بر این



شکل ۳- ارزیابی توافقی مقادیر زیست‌گاز
Fig.3. Accordance assessment of biogas values

سهم تاثیر پارامترهای تولید زیست‌گاز

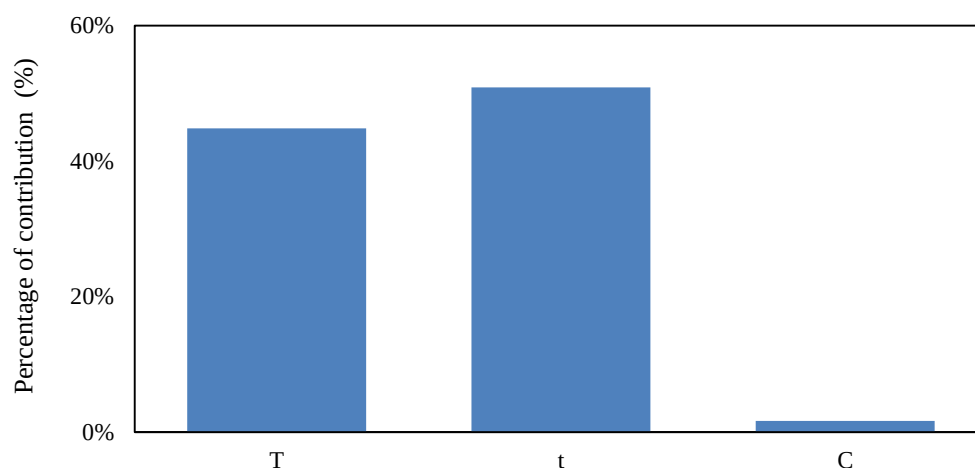
سهم تاثیر هر یک از متغیرهای مستقل شامل دمای پیش‌فرآوری، مدت زمان اعمال پیش‌فرآوری حرارتی و غلظت مواد هضم‌شونده بر فرآیند هضم بی‌هوازی و تولید زیست‌گاز در شکل ۴ آورده شده است. سهم تاثیر متغیرها از تقسیم مجموع مربعات هر عامل بر مجموع مربعات کل محاسبه شد. بیشترین تاثیر در تولید زیست‌گاز به ترتیب مربوط به زمان پیش‌تیمار (۵۰/۸۶ درصد) و دمای پیش‌تیمار (۴۴/۸۱ درصد) است در حالی که تغییرات غلظت تاثیر بسیار کمتری در تولید داشته است (۱/۶۳ درصد). با این حال اثر غلظت در تولید زیست‌گاز معنی‌دار شده که با برخی از نتایج تحقیقات پیشین مطابقت دارد. به عنوان مثال محققینی گزارش کرده‌اند که هنگامی که محتوای جامد مواد هضم‌شونده از ۲۰ به ۳۰ درصد افزایش یافت، تولید متان به میزان ۱۷٪ کم شد (Fernandez et al., 2008). از سوی دیگر اثر کمتر غلظت در این تحقیق احتمالاً به دلایل نزدیک بودن مقادیر غلظت‌های بررسی شده و همچنین مخلوط کردن کامل مواد در ابتدای هضم و بالا بودن نسبت مواد تلقیحی در ترکیب با مواد هضم‌شونده بوده است که باعث جلوگیری از اسیدی شدن ترکیب در اثر تولید اسیدهای چرب و ممانعت از اختلال در فرآیند هضم در غلظت‌های بالاتر شد.

نمودار سطح پاسخ

شکل ۵ نمودار سه‌بعدی سطح پاسخ تولید زیست‌گاز را در غلظت ۱۲ درصد تحت تاثیر دماها و زمان‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.

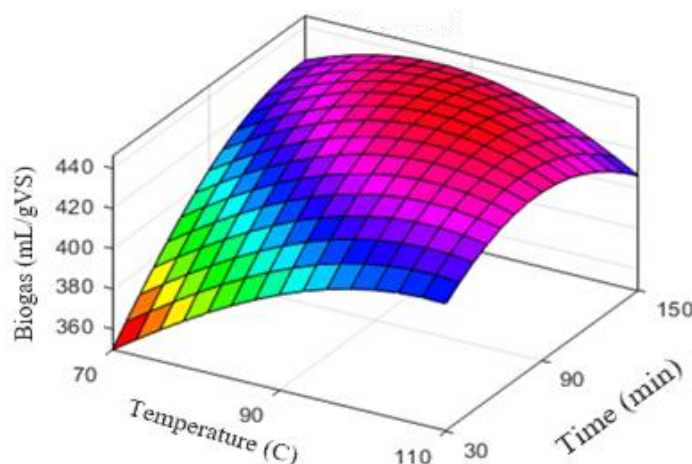
همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش زمان پیش‌تیمار در محدوده زمانی مورد بررسی، تولید زیست‌گاز ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. از سوی دیگر با افزایش دما از ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد ابتدا افزایش تولید زیست‌گاز و سپس کاهش تولید اتفاق افتاده است. دلیل کاهش تولید زیست‌گاز احتمالاً واکنش قهوه‌ای شدن و مایلارد بوده است. این واکنش باعث تولید مواد ترکیبات پیچیده شده که به راحتی قابل تجزیه نیستند (Elliot and Mahmood, 2012).

در یک آزمایش، افزایش اندکی در تولید زیست‌گاز از هضم لجن پیش‌فرآوری شده در دمای ۷۰°C برای یک ساعت گزارش شد در حالی که این افزایش تولید زیست‌گاز با اعمال دمای ۹۰°C به مدت یک ساعت، تا ۲۰ برابر مشاهده شد (Appels et al., 2010). در آزمایش دیگری اعمال دمای ۷۰°C موجب دستیابی به افزایش ۷۸ درصدی تولید زیست‌گاز با محتوای ۶۰٪ متان شد. از سوی دیگر پیش‌فرآوری فضولات دامی در دماهای بالاتر از ۱۱۰°C باعث سخت و قهوه‌ای تیره شدن مواد در این دماها شده که این موضوع به روی دادن واکنش‌های مایلارد نسبت داده شد (Rafique et al., 2010). محققین دیگری نیز کاهش میزان تولید متان از هضم بی‌هوازی مواد آلی که تحت پیش‌تیمار حرارتی در دمای ۱۱۰ درجه قرار گرفتند نسبت به میزان تولید متان ناشی از هضم مواد آلی که با دماهای پایین‌تر تحت پیش‌تیمار قرار گرفتند را به دلیل واکنش مایلارد گزارش کرده‌اند (Li et al., 2016) که منطبق با نتایج این مطالعه است.



شکل ۴- سهم تاثیر دمای پیش تیمار (T)، زمان پیش تیمار (t) و غلظت (C) در تولید زیست‌گاز

Fig.4. Contribution of pretreatment temperature(T), time(t) and digestate concentration(C) to biogas production



شکل ۵- نمودار سطح پاسخ تولید زیست‌گاز بر حسب تغییرات دما و زمان پیش تیمار در غلظت ۱۲٪

Fig.5. Response Surface diagram for biogas production based on pretreatment temperature and time at a concentration of 12%

پیش‌بینی می‌شود اعمال پیش تیمار در شرایط بهینه موجب افزایش ۳۱/۱۷ درصدی تولید گاز گردد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور دستیابی به بیشترین تولید زیست‌گاز از هضم بی‌هوازی، متغیرهای دما و زمان پیش تیمار حرارتی و غلظت پسماندهای آلی بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که اعمال پیش تیمار حرارتی در افزایش تولید زیست‌گاز موثر بود به طوری که با توجه به مدل رگرسیونی، تاثیر زمان و دمای پیش تیمار در تولید زیست‌گاز در محدوده بررسی شده قابل توجه و به ترتیب ۵۰/۸۶ و

بهینه‌سازی فرآیند تولید زیست‌گاز

از مدل رگرسیونی به عنوان تابع هدف جهت بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک استفاده شد. بر اساس نتایج الگوریتم ژنتیک، دما و زمان بهینه پیش تیمار حرارتی و غلظت مناسب برای تولید بیشینه زیست‌گاز به ترتیب ۹۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۴ دقیقه و ۱۲ درصد ارزیابی شد. میزان مورد انتظار تولید زیست‌گاز با اعمال شرایط بهینه دما و زمان پیش تیمار و غلظت بهینه برابر ۴۴۵ میلی‌لیتر زیست‌گاز به ازای هر گرم ماده آلی فرار خواهد بود. با توجه به این که میزان تولید گاز در شرایط واقعی هضم بدون انجام پیش تیمار در غلظت ۱۲ درصد ۳۳۹/۳۳±۶/۱۸ میلی‌لیتر به ازای گرم ماده آلی فرار بوده است،

سانتی‌گراد و زمان ۱۰۴ دقیقه و در غلظت ۱۲ درصد بوده است که با اعمال پیش‌تیمار حرارتی در شرایط بهینه، تولید میزان ۴۴۵ میلی‌لیتر زیست‌گاز به‌ازای هر گرم ماده جامد فرار موجود در مواد هضم‌شونده قابل پیش‌بینی است.

۴۴/۸۱ درصد بوده است. برخلاف این دو متغیر، غلظت مواد هضم‌شونده در محدوده ۸ تا ۱۶ درصد تاثیر کمتری (۱/۶۳ درصد) در تولید زیست‌گاز داشته است به‌طوری که اثر عامل غلظت در سطح ۱٪ معنی‌دار نشد اما در سطح ۱۰٪ معنی‌دار شد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین دما و زمان پیش‌تیمار به‌ترتیب ۹۵ درجه

References

1. Aboudi, K., C. J. Alvarez-Gallego, and L. I. Romero-García. 2017. Influence of total solids concentration on the anaerobic co-digestion of sugar beet by-products and livestock manures. *Science of the Total Environment* 586: 438-445. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.01.178](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.178).
2. American Public Health Association (APHA). 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. Washington DC (USA): American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.
3. Angelidaki, I., M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, and J. B. Van Lier. 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology* 59 (5): 927-934. DOI: [10.2166/wst.2009.040](https://doi.org/10.2166/wst.2009.040).
4. Appels, L., J. Degreve, B. Van der Bruggen, J. Van Impe, and R. Dewil. 2010. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 101 (15): 5743-5748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.068>.
5. Ariunbaatar, J., A. Panico, G. Esposito, F. Pirozzi, and P. N. Lens. 2014. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied Energy* 123: 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.035>.
6. Barjenbruch, M., and O. Kopplow. 2003. Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge. *Advances in Environmental Research* 7 (3): 715-720. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00032-1).
7. Bien, J. B., G. Malina, J. D. Bien, and L. Wolny. 2004. Enhancing anaerobic fermentation of sewage sludge for increasing biogas generation. *Journal of Environmental Science and Health Part A* 39 (4): 939-949. DOI: [10.1081/ese-120028404](https://doi.org/10.1081/ese-120028404).
8. Bougrier, C., C. Albasi, J. P. Delgenès, and H. Carrere. 2006. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 45 (8): 711-718. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.02.005>.
9. Bougrier, C., J. P. Delgenes, and H. Carrere. 2008. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal* 139 (2): 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.07.099>.
10. Carlsson, M., A. Lagerkvist, and F. Morgan-Sagastume. 2012. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. *Waste Management* 32 (9): 1634-1650. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.016>.
11. Carrere, H., C. Dumas, A. Battimelli, D. J. Batstone, J. P. Delgenes, J. P. Steyer, and I. Ferrer. 2010. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. *Journal of Hazardous Materials* 183 (1-3): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129>.
12. Chamchoi, N., H. Garcia, and I. Angelidaki. 2011. Methane potential of household waste; Batch assays determination. *Applied Environmental Research* 33 (1): 13-26.
13. Climent, M., I. Ferrer, M. del Mar Baeza, A. Artola, F. Vazquez, and X. Font. 2007. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chemical Engineering Journal* 133 (1-3): 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.02.020>.
14. Edelmann, W., U. Baier, and H. Engeli. 2005. Environmental aspects of the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes and of solid agricultural wastes. *Water Science and Technology* 52 (1-2): 203-208.
15. Elliot, A., and T. Mahmood. 2012. Comparison of mechanical pretreatment methods for the enhancement of anaerobic digestion of pulp and paper waste. *Water Science Technology* 84: 497-505. DOI: [10.2175/106143012x13347678384602](https://doi.org/10.2175/106143012x13347678384602).
16. Fernandez, J., M. Perez, and L. I. Romero. 2008. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technology* 99 (14): 6075-6080. DOI: [10.1016/j.biortech.2007.12.048](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.048).
17. Ferrer, I., S. Ponsa, F. Vazquez, and X. Font. 2008. Increasing biogas production by thermal (70°C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochemical Engineering Journal* 42 (2): 186-192. DOI:

- 10.1016/j.bej.2008.06.020.
18. Ge, X., F. Xu, and Y. Li. 2016. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives. *Bioresource Technology* 205: 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.050>.
19. Li, C., P. Champagne, and B. C. Anderson. 2011. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions. *Bioresource Technology* 102 (20): 9471-9480. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.103>.
20. Li, Y., S. Y. Park, and J. Zhu. 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (1): 821-826. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>.
21. Li, Y., Y. Jin, J. Li, H. Li, and Z. Yu. 2016. Effects of thermal pretreatment on the biomethane yield and hydrolysis rate of kitchen waste. *Applied Energy* 172: 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.080>.
22. Liu, G., R. Zhang, H. M. El-Mashad, and R. Dong. 2009. Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. *Bioresource Technology* 100 (21): 5103-5108. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.081>.
23. Liu, X., W. Wang, X. Gao, Y. Zhou, and R. Shen. 2012. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste. *Waste Management* 32 (2): 249-255. DOI: [10.1016/j.wasman.2011.09.027](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.027).
24. Maghanaki, M. M., B. Ghobadian, G. Najafi, and R. J. Galogah. 2013. Potential of biogas production in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28: 702-714. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.021>.
25. Marin, J., K. J. Kennedy, and C. Eskicioglu. 2010. Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste. *Waste Management* 30 (10): 1772-1779. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.033>.
26. McLeod, J. D., M. Z. Othman, D. J. Beale, and D. Joshi. 2015. The use of laboratory scale reactors to predict sensitivity to changes in operating conditions for full-scale anaerobic digestion treating municipal sewage sludge. *Bioresource Technology* 189: 384-390. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.049>.
27. Mirmasoumi, S., R. K. Saray, and S. Ebrahimi. 2018. Evaluation of thermal pretreatment and digestion temperature rise in a biogas fueled combined cooling, heat, and power system using exergo-economic analysis. *Energy Conversion and Management* 163: 219-238. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.069>.
28. Mottet, A., J. P. Steyer, S. Deleris, F. Vedrenne, J. Chauzy, and H. Carrere. 2009. Kinetics of thermophilic batch anaerobic digestion of thermal hydrolysed waste activated sludge. *Biochemical Engineering Journal* 46 (2): 169-175. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.05.003>.
29. Neyens, E., and J. Baeyens. 2003. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *Journal of Hazardous Materials* 98 (1-3): 51-67. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00320-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00320-5).
30. Panda, S., and N. P. Padhy. 2008. Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for FACTS based controller design. *Applied Soft Computing* 8 (4): 1418-1427. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.10.009>.
31. Pavan, P., P. Battistoni, J. Mata-Alvarez, and F. Cecchi. 2000. Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. *Water Science and Technology* 41 (3): 75-81.
32. Penaud, V., J. P. Delgenes, and R. Moletta. 1999. Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: Influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability. *Enzyme and Microbial Technology* 25 (3-5): 258-263. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(99\)00037-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(99)00037-X).
33. Prorot, A., L. Julien, D. Christophe, and L. Patrick. 2011. Sludge disintegration during heat treatment at low temperature: A better understanding of involved mechanisms with a multiparametric approach. *Biochemical Engineering Journal* 54 (3): 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.02.016>.
34. Rafique, R., T. G. Poulsen, A. S. Nizami, J. D. Murphy, and G. Kiely. 2010. Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. *Energy* 35 (12): 4556-4561. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.011>.
35. Raposo, F., M. A. De la Rubia, V. Fernandez-Cegri, and R. Borja. 2012. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (1): 861-877. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008>.
36. Skiadas, I. V., H. N. Gavala, J. Lu, and B. K. Ahring. 2005. Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70°C prior to anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 52 (1-2): 161-166.



Analysis and Evaluation of Energy, Economic, and Environmental Impact Indicators of Horticultural and Greenhouse Production Systems in Iran using PRISMA Method

M. Zangeneh^{1*}, N. Banaeian¹

1- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
(*- Corresponding Author Email: zanganeh@guilan.ac.ir)

DOI: [10.22067/jam.2021.67892.1004](https://doi.org/10.22067/jam.2021.67892.1004)

Received: 22-12-2020

Revised: 16-03-2021

Accepted: 20-04-2021

Available Online: 24-04-2021

How to cite this article:

Zangeneh, M., and N. Banaeian. 2022. Analysis and Evaluation of Energy, Economic, and Environmental Impact Indicators of Horticultural and Greenhouse Production Systems in Iran using PRISMA Method. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 423-426. (In Persian). DOI: [10.22067/jam.2021.67892.1004](https://doi.org/10.22067/jam.2021.67892.1004)

Introduction

So far, many studies have been conducted to evaluate the impact of input consumption patterns on energy, economic, and environmental indicators on horticultural and greenhouse crops in Iran. A review of these studies shows that the causes of the current situation in the systems have not been investigated. These studies are mostly reporting the current situation and the interventions and their effect on improving the input consumption pattern in the sustainability of the system have not been considered by researchers. Also, studies showed that the study location and products do not fit well with the volume of production in the horticultural and greenhouse sector of Iran. Therefore, in order to increase the effectiveness and future direction of studies in this field, this review study was conducted. In this article, Iranian horticultural and greenhouse production systems were reviewed and analyzed by reviewing the published articles between 2008 and 2018, using the PRISMA method. The PRISMA method is a well-known method for conducting systematic review studies. The PRISMA method includes the following sections: background; objectives; data sources; study eligibility criteria, participants, and interventions; study appraisal and synthesis methods; results; limitations; conclusions, and implications of key findings. In this article, 16 types of garden products and 6 types of greenhouse products were studied.

Material and Methods

In this study, the methods used to determine the status of energy consumption, economic and environmental patterns for horticultural and greenhouse crops were analyzed. For this purpose, the indicators of total energy consumption (TEI), energy efficiency (EUE), net energy (NE), and energy efficiency (EP) were examined in the section of energy. The issue of sensitivity analysis of energy inputs was also examined and the highest values of t-statistic and MPP were reported for products. In some articles, the data envelopment analysis method was used in systems performance analysis. The indicators used included technical efficiency (TE), pure technical efficiency (PTE), scale efficiency (SE), and energy-saving target ratio (ESTR). The results of them were summarized and reported. In some studies, the method of artificial neural networks and the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System were used. In general, in the present article, the challenges and risks in the methods used in previous studies were considered. The issue of sampling in the analysis of agricultural systems was discussed in detail and a new sampling procedure was proposed. To draw a general picture of energy and environmental indicators of orchard and greenhouse systems in Iran, the results published in the articles were reviewed. Not all researchers use the same equivalents in calculating the indices, and this makes the results of the studies slightly different from each other. The existence of such differences causes some deviations in comparing the results of similar articles in the same products. However, to adjust for these differences, averaging was used in the index report.

Results and Discussion

The study of the share of inputs in the total energy consumption shows that for horticultural products, the share of fertilizer and electricity inputs is very significant. In the case of greenhouse products, fuel input, which is mainly diesel, has the largest share of energy consumption. Walnuts have the lowest energy consumption and strawberries have the highest energy consumption among orchard products. Grapes, apples, and walnuts also have positive net energy, so they have the highest energy efficiency compared to other products. The most important inputs that have the greatest potential for energy savings in most products are diesel fuel and

electricity. Among greenhouse crops in cucumber production, diesel fuel has great potential for energy savings that need to be reduced in future research. In the case of strawberry and rose products, electricity input has the greatest potential for energy savings. Knowing the potential of inputs that can be saved can be effective in changing the behavior of producers.

Conclusion

To increase the effectiveness of research in this area, such studies should be done dynamically and for at least two or more years. In the first year, the input consumption pattern should be extracted and after performing the consumption pattern modifying interventions, the effect of these actions should be evaluated in the following years. Data envelopment analysis methods and multi-objective genetic algorithm can be well used to develop solutions to improve input consumption patterns. The review of articles showed that the study of the effect of social factors on the behavior of various production systems has been neglected. Since the pattern of energy consumption in the agricultural sector is significantly dependent on the behavior of users and the characteristics of systems and methods of production, it seems necessary to pay attention to this factor to prepare and design any process improvement strategy in the system. In this study, a new procedure including three stages of analysis, redesign, and evaluation was proposed to complete the studies related to the analysis of agricultural systems.

Keywords: Crop production systems, Economic indicators, Energy consumption pattern, Environmental emissions, Sustainable agriculture

مقاله مروری

جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۴۵۱-۴۲۳

تحلیل و ارزیابی شاخص‌های انرژی، اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی سامانه‌های تولید محصولات باغی و گلخانه‌ای در ایران با استفاده از روش PRISMA

مرتضی زنگنه^{۱*}، نرگس بنائیان^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

چکیده

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی تأثیر الگوی مصرف نهاده در شاخص‌های انرژی، اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی در محصولات باغی و گلخانه‌ای ایران انجام شده است. این مطالعات بیشتر جنبه گزارش وضعیت موجود را داشته و اقدامات مداخله‌ای و بررسی اثر آن‌ها در بهبود الگوی مصرف نهاده در میزان پایداری سامانه مدنظر محققان قرار نگرفته است. لذا به‌منظور افزایش اثربخشی و جهت‌دهی مناسب به مطالعات در این زمینه، این مطالعه مروری انجام شد. در این مقاله، سامانه‌های تولید محصولات باغی و گلخانه‌ای ایران از طریق مرور مقالات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸، با استفاده از روش پریسما، تعداد ۶۳ مقاله به‌صورت سامانمند انتخاب شد و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به‌طورکلی در مقاله حاضر، چالش‌ها و ریسک‌های موجود در روش‌های استفاده‌شده در مطالعات پیشین موردتوجه قرار گرفت. برای ترسیم یک وضعیت کلی از شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی سامانه‌های باغی و گلخانه‌ای ایران، نتایج منتشرشده در مقالات موردبررسی قرار گرفت. برای افزایش اثربخشی تحقیقات در این بخش، این‌گونه مطالعات بهتر است به‌صورت پویا و حداقل دو یا چندساله انجام شود. بررسی مقالات نشان داد که مطالعه تأثیر عوامل اجتماعی در رفتار انواع سامانه‌های تولید مغفول مانده است. از آنجایی که الگوی مصرف انرژی در بخش کشاورزی تا حد قابل‌توجهی تابع رفتار بهره‌برداران و مشخصات سامانه‌ها و روش‌های تولید محصول است، به‌نظر می‌رسد توجه به این عامل برای آماده‌سازی و طراحی هرگونه راهکار بهبود فرایند در سامانه ضروری است. در این مطالعه همچنین برای تکمیل مطالعات مربوط به تحلیل سامانه‌های کشاورزی یک رویه جدید شامل سه مرحله تحلیل، بازطراحی و ارزیابی مطرح شد.

واژه‌های کلیدی: الگوی مصرف انرژی، انتشارات زیست‌محیطی، سامانه‌های تولید محصول، شاخص‌های اقتصادی، کشاورزی پایدار

مقدمه

مخاطرات زیست‌محیطی می‌شود. محدودیت در منابع انرژی از یک طرف و افزایش تقاضای انرژی برای تولید محصولات بخش کشاورزی در پاسخ به تقاضای روزافزون جمعیت باعث افزایش اهمیت مدیریت مصرف انرژی در برنامه‌ریزی‌های کلان و خرد در کشورها شده است (Mohseni et al., 2019). مصرف بهینه انرژی در اکوسیستم‌های کشاورزی، امنیت انرژی در این بخش را افزایش می‌دهد، اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد و می‌تواند این بخش را به‌سوی توسعه پایدار سوق دهد (Zahedi et al., 2015). یکی از اقدامات اولیه برای مواجهه با چالش امنیت انرژی در حوزه کشاورزی، شناسایی الگوهای مصرف انرژی در سامانه‌های مختلف کشاورزی است. با شناخت الگوهای مصرف انرژی در این بخش می‌توان راهکارهای کمینه‌سازی مصرف انرژی و به‌تبع آن کاهش تبعات زیست‌محیطی تولید محصولات کشاورزی در اکوسیستم کشاورزی را توسعه داد. لزوم انجام تحقیقات کاربردی با در نظر گرفتن الگوهای

جمعیت جهان به‌صورت پیوسته در حال افزایش است و استفاده مداوم از منابع تجدیدناپذیر برای تولیدات کشاورزی امنیت غذایی جهان را تهدید می‌کند (Shabanzadeh et al., 2017). کشاورزی ایران سهم مهمی در اقتصاد کشور دارد و ضامن امنیت غذایی آن است. اما در مقابل، میزان مصرف نهاده‌های مختلف در این بخش به حدی لجام‌گسیخته است که در صورت عدم مدیریت بهینه، امنیت انرژی در این بخش را به خطر می‌اندازد. به دلیل گستردگی تولیدات کشاورزی در سراسر کشور، الگوی غیربهینه در مصرف نهاده‌ها باعث ایجاد

۱- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

(Email: zanganeh@guilan.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

پایداری در بخش کشاورزی بیش‌ازپیش مورد تأکید محققان قرار گرفته است تا امکان کاهش اثرات سوء زیست‌محیطی مانند گازهای گلخانه‌ای فراهم شود. اختصاص یارانه به منابع انرژی در ایران به‌ویژه برای بخش کشاورزی یکی از پایه‌های اصلی افزایش تولید در ایران است. اما قیمت حامل‌های انرژی و تخصیص یارانه به انواع نهاده‌های کشاورزی باعث شده است الگوی مصرف انرژی در بخش کشاورزی ایران به‌صورت پهنه نباشد. از سال ۱۳۸۷ مطالعات مربوط به ممیزی انرژی و استخراج الگوی مصرف انرژی در ایران آغاز شد. پس از آغاز موضوع هدفمندی یارانه‌ها در سال ۱۳۸۹، اهمیت انجام مطالعات در این حوزه بیش‌ازپیش موردتوجه قرار گرفت. آگاهی از الگوی مصرف انرژی در هر یک از محصولات کشاورزی در مناطق مختلف کشور اولین گام در مدیریت مصرف انرژی در این بخش مهم از اقتصاد کشور محسوب می‌شود. مقایسه الگوی مصرف انرژی در مزارع و باغات مختلف امکان شناسایی واحدهای موفق را میسر کرد و باعث ترغیب سایر تولیدکنندگان به بهره‌گیری از الگوهای بهینه شد. می‌توان گفت افزایش قیمت حامل‌های انرژی تأثیر معناداری در افزایش تعداد مطالعات در این حوزه داشته است.

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی به‌منظور تحلیل سامانه‌های کشاورزی از دیدگاه، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی در ایران انجام شده است. تعداد قابل توجه انتشارات در این حوزه تحقیقاتی، ضرورت انجام یک بررسی تحلیلی و همه‌جانبه در مورد ابعاد مختلف این گونه مطالعات را ایجاد کرده است. مطالعه روند این نوع تحقیقات در حوزه محصولات باغی و گلخانه‌ای در سال‌های اخیر در این پژوهش موردنظر قرار گرفته است. به‌طور کلی بخش‌هایی از فرآیند تحلیل سامانه^۱ در مطالعات این بخش مشاهده می‌شود. مطالعات ابتدا با استفاده از تعدادی شاخص، الگوی مصرف انرژی در محصولات مختلف را گزارش کردند (Asakereh et al., 2010). به‌تدریج ابعاد دیگری از تحلیل سامانه مانند مدل‌سازی اقتصادی و مدل‌سازی انتشارات زیست‌محیطی وارد مطالعات شد (Yousefi, 2013; Nikkhah et al., 2016). روش‌های مورد استفاده محققان به‌تدریج تنوع پیدا کرد و روش‌های هوش مصنوعی^۲ و روش‌های تحقیق در عملیات^۳ وارد این گونه مطالعات شد (Pahlavan et al., 2012c; Soltanali et al., 2017). روش انجام مطالعات در این حوزه یک سیر تکاملی را در سال‌های اخیر طی کرده است. اما چالش‌هایی پیش روی محققان در این زمینه وجود دارد که در این مطالعه مروری به آن‌ها پرداخته شده است. اولین سؤال تحقیق حاضر آن است که باوجود گستردگی شاخص‌ها و روش‌های مورد استفاده توسط محققان قبلی،

آیا تمامی جنبه‌های سامانه‌های تولید محصولات باغی و گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته یا هنوز موضوعاتی در فرآیند تحلیل سامانه‌ها وجود دارد که مورد غفلت واقع شده باشد؟ با توجه به تنوع بسیار زیاد انواع سامانه‌های تولید در بخش کشاورزی، آیا استانداردهای لازم در نمونه‌گیری و داده‌برداری توسط محققان رعایت شده است؟ از نظر فرآیند تحلیل سامانه‌ها، مطالعه وضعیت فعلی یک سامانه بدون انجام مداخلات برای بهبود یک سامانه، ناقص محسوب می‌شود. از این رو سؤال بعدی آن است که آیا در مطالعات انجام‌شده مداخلاتی در الگوی مصرف انرژی توسط محققان انجام شده و تأثیر آن مداخلات در بهبود الگوی مصرف انرژی، مدل اقتصادی و کاهش انتشارات زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفته است؟ سؤال مهم دیگر آن است که آیا فرضیه‌سازی درباره علت شکل‌گیری الگوی مصرف انرژی در محصولات مورد مطالعه انجام شده است؟ آیا راهکارهای بهبوددهنده وضعیت کنونی یک سامانه در مطالعات پیشنهاد شده است؟ آیا شاخص‌های اجتماعی در مطالعات این حوزه مورد مطالعه قرار گرفته است؟ آیا انتخاب منطقه و محصول مورد مطالعه بر اساس نیاز و ضرورت منطقه‌ای و ملی بوده است؟ در پاسخ به سؤال‌های فوق و برای ترسیم بهتر مسیر تحقیقات آینده و پیشگیری از انجام مطالعات تکراری که بعضاً در این حوزه مشاهده شده است، ضروری است اطلاعات کافی درباره پیشینه مطالعات در اختیار محققان قرار گیرد. لذا مقاله حاضر با استفاده از یک روش سامانمند یک تصویر جامع از پیشینه تحقیقات و وضعیت مصرف انرژی در محصولات باغی و گلخانه‌ای ایران در اختیار خوانندگان قرار داده است. همچنین بخش‌هایی که در تحقیقات پیشین مورد غفلت واقع شده در این مقاله اشاره شده است که می‌تواند در تحقیقات آتی مبنای عمل محققان قرار گیرد تا بر غنای مطالعات این حوزه بیفزاید. رویه جدیدی نیز برای تکمیل نقایص مطالعات پیشین در این مقاله معرفی شده است.

یک مرور سامانمند^۴ در واقع یک مرور فراگیر مبتنی بر شیوه‌نامه^۵ است که با محوریت یک موضوع مشخص یا یک سؤال کلیدی انجام می‌شود. این گونه مطالعات مروری، با استفاده از یک فرآیند قابل تکرار برای جستجو در پیشینه تحقیق و ارزیابی کیفیت مطالعات انجام‌شده صورت می‌گیرد (Cochrane, 2021). انواع مطالعات مروری سامانمند به‌طور کلی به‌صورت زیر تقسیم می‌شوند (Munn et al., 2018): مرور درجه‌بندی‌شده^۶؛ ارزیابی اولیه از اندازه و دامنه بالقوه ادبیات تحقیق موجود، باهدف شناسایی ماهیت و میزان شواهد تحقیقاتی (معمولاً شامل تحقیقات مداوم) انجام می‌شود؛ مرور سریع^۷؛ ارزیابی

4- Systematic Review

5- Protocol Driven Comprehensive Review

6- Scoping Review

7- Rapid Review

1- System Analysis

2- Artificial Intelligence

3- Operation Research Methods

(به‌عنوان مثال، توت‌فرنگی، سیب و غیره)، تحلیل اقتصادی؛ بهره‌وری انرژی^۷، تجزیه و تحلیل انرژی^۸، انرژی ورودی^۹، محیط‌زیست، کارایی فنی^{۱۰}، تحلیل پوششی داده‌ها^{۱۱}، صرفه‌جویی در انرژی^{۱۲}، ارزیابی چرخه زیست^{۱۳}، عملکرد، الگوی مصرف انرژی^{۱۴}، سامانه‌های تولید محصول، انتشارات زیست‌محیطی^{۱۵}، شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۶}، الگوریتم ژنتیک^{۱۷}، تجزیه و تحلیل حساسیت^{۱۸}.

معیارهای انتخاب مطالعات

فرآیند انتخاب مقالات از چندین مرحله تشکیل شده است. برای انتخاب مقالات از معیارهایی استفاده شده که در شکل ۲ نشان داده شده است. این فرآیند با ارزیابی عنوان مقالات شروع شد. عنوان مقالاتی که در حوزه بررسی و تحلیل جریان انرژی، تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی در محصولات باغی و گلخانه‌ای بود انتخاب شد. معیار بعدی مکان انجام مطالعات بود. تمرکز این مقاله بر روی مطالعاتی است که در داخل ایران انجام شده است. عموماً مطالعات انجام شده در این حوزه به صورت مطالعات موردی هستند لذا یافتن مطالعات مرتبط با ایران از بین منابع متعدد چاپ شده در پایگاه اسکوپوس به خوبی انجام شد. کیفیت مجلات معیار دیگری بود که در انتخاب مقالات مدنظر قرار گرفت. بدین ترتیب تعدادی از مقالاتی که بعضاً در اسکوپوس نمایه شده بود اما در مجلات با اعتبار کمتر به چاپ رسیده بود از فرآیند انتخاب کنار گذاشته شد. دلیل این تصمیم آن است که در برخی از مقالات منتشر شده در مجلات با اعتبار کم مشاهده شد که اشکالات بعضاً غیرقابل قبولی در نتایج گزارش شده وجود دارد که ناشی از عدم رعایت فرآیند صحیح داوری در مسیر پذیرش و چاپ این گونه مجلات است. لذا برای آن که اطلاعات بعضاً نادرست خدشه‌ای در نتایج این مطالعه مروری وارد نکند از مرور بعضی مقالات صرف‌نظر شد. سپس چکیده و واژه‌های کلیدی موردبررسی قرار گرفت و برخی مطالعاتی که تناسبی با موضوع

آنچه قبلاً در مورد یک مسئله، سیاست یا عمل شناخته شده است با استفاده از روش‌های بررسی سامانمند برای جستجو و ارزیابی انتقادی تحقیقات موجود؛ مرور روایی^۱؛ مطالعات اولیه را تلفیق می‌کند و این را از طریق توصیف و نه آمار کشف می‌کند؛ فرا تحلیل^۲؛ از نظر آماری نتایج مطالعات کمی را باهم ترکیب می‌کند تا تأثیر دقیق‌تری بر نتایج داشته باشد؛ روش‌های مختلط/ مطالعات مختلط^۳؛ به هر ترکیبی از روش‌های فوق اشاره دارد که یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های آن بررسی ادبیات است (معمولاً به‌طور منظم). در زمینه بررسی نیز به ترکیبی از رویکردهای بررسی اشاره دارد. به‌عنوان مثال، ترکیب تحقیقات کمی با تحقیقات کیفی یا ترکیب مطالعات کمی با مطالعات فرآیندی.

این مقاله با استفاده از روش پریسما^۴ که درواقع یک الگوی استاندارد برای مطالعات مروری سامانمند است انجام شده است. پریسما شامل مجموعه‌ای از موارد مبتنی بر شواهد برای گزارش‌دهی در بررسی‌های سامانمند است. روش پریسما اولین بار در سال ۲۰۰۹ منتشر شد (Moher et al., 2009).

در پژوهشی با استفاده از روش پریسما مقالات منتشر شده در زمینه ارزیابی شاخص‌های انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی در محصولات زراعی موردبررسی قرار گرفت (Banaeian et al., 2020). مقاله حاضر توسط همان نویسندگان در مورد محصولات باغی و گلخانه‌ای نوشته شده است. روش پریسما شامل یک فهرست موارد و نمودار جریان انجام مطالعات مروری است که الگوی انجام مطالعات مروری سامانمند را برای محققان تسهیل کرده است (Moher et al., 2009). شکل ۱ مراحل کلی انجام یک مطالعه مروری سامانمند با استفاده از روش پریسما را نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

روش مرور مطالعات

در این مطالعه، مقالات منتشر شده در پایگاه اسکوپوس^۵، از نظر روش‌شناسی تحقیق و همچنین تحلیل نتایج گزارش شده موردبررسی و تحلیل قرار گرفته است. برای جستجوی مقالات موردنظر در زمینه الگوی مصرف انرژی در سامانه‌های کشاورزی ایران از یک روش جستجوی سامانمند استفاده شد. در راهبرد جستجوی تدوین شده برای این مطالعه مروری، واژه‌های کلیدی پرتکرار در مقالات منتشر شده در حوزه مطالعات الگوی مصرف انرژی مورد استفاده قرار گرفت که عبارت است از: انرژی^۶، نسبت انرژی^۷، ایران، نام محصول

- 1- Narrative Review
- 2- Meta-analysis
- 3- Mixed methods/mixed studies
- 4- PRISMA
- 5- SCOPUS
- 6- Energy

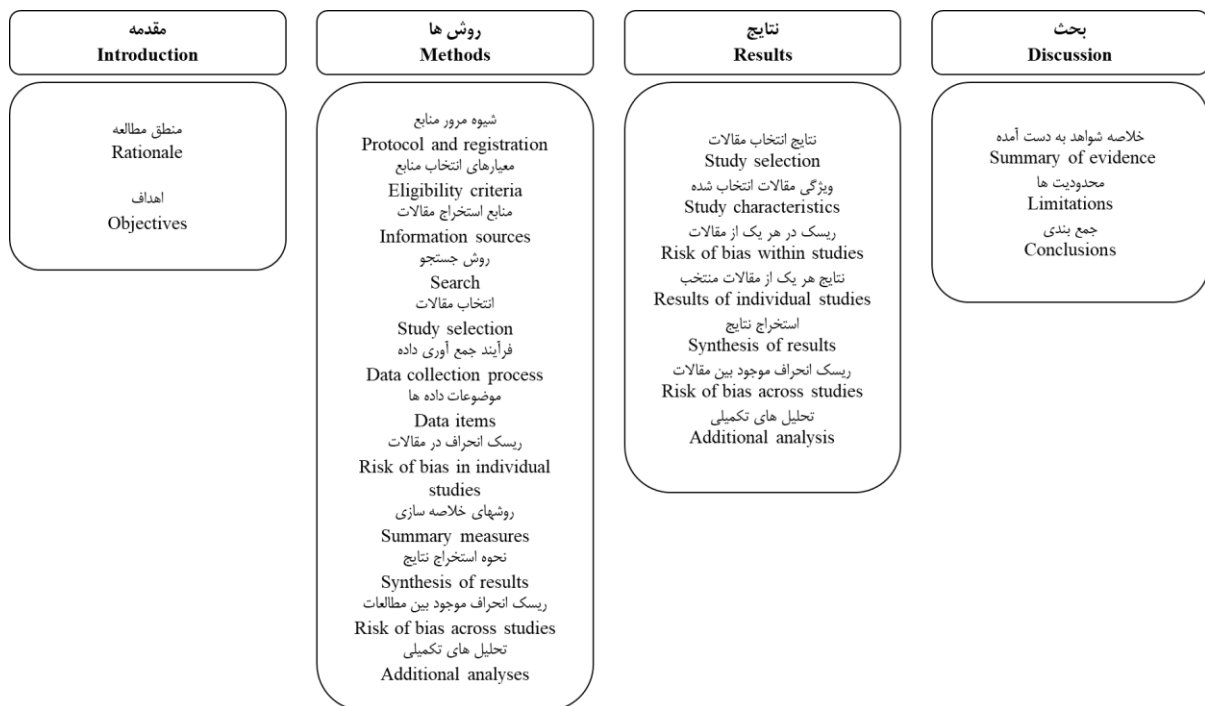
- 7- Energy ratio
- 8- Economic analysis
- 9- Energy efficiency
- 10- Energy analysis
- 11- Input energy
- 12- Technical efficiency
- 13- Data envelopment analysis
- 14- Energy saving
- 15- Life cycle assessment
- 16- Energy use pattern
- 17- Environmental emissions
- 18- Artificial neural networks
- 19- Genetic algorithm
- 20- Sensitivity analysis

است اما هدف این مقاله بررسی مقالات انتشار یافته در مجلات معتبر بین‌المللی حداقل با درجه ISI بوده است. انتشار مقالات مربوط به تحلیل سامانه‌های کشاورزی با تأکید بر تحلیل سامانه‌های انرژی از سال ۲۰۰۸ در حوزه محصولات باغی در مجلات ISI شروع شد. بررسی فراوانی مقالات در سال‌های مورد بررسی (شکل ۲) نشان می‌دهد از سال ۲۰۰۸، سیر صعودی انتشار مقالات در این حوزه تا سال ۲۰۱۱ ادامه داشت اما پس‌از آن با فراز و فرودهایی همراه بود.

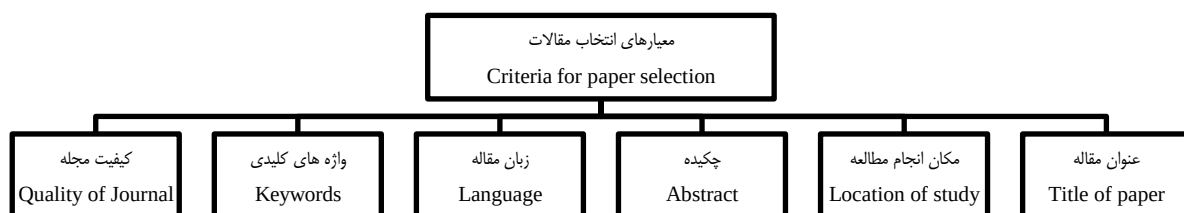
پژوهش حاضر نداشتند حذف شدند. مقالات یافت شده از نظر موضوع، کیفیت روش تحقیق و نتایج گزارش شده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

انتخاب مقالات

در پژوهش حاضر صرفاً مقالاتی که به زبان انگلیسی در مجلات معتبر بین‌المللی به چاپ رسیده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هرچند مقالاتی در این حوزه در مجلات علمی-پژوهشی فارسی منتشر شده



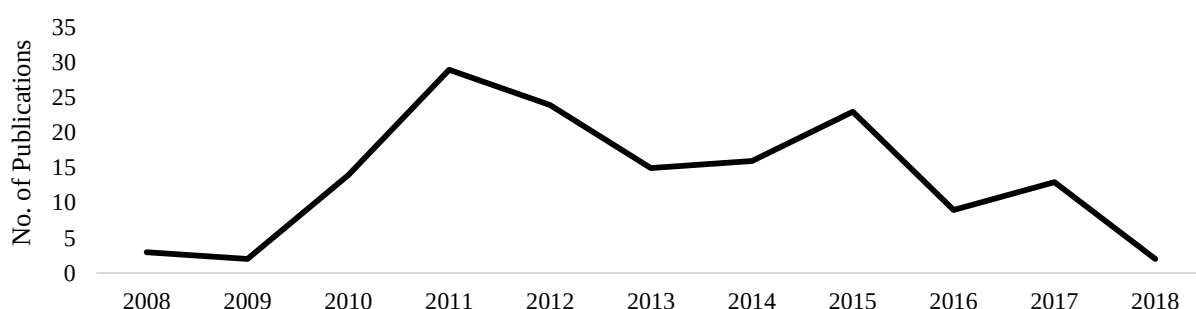
شکل ۱- مراحل انجام مطالعه مروری سامانمند با استفاده از روش^۱ PRISMA (Moher *et al.*, 2009)
Fig.1. Steps of systematic review process using PRISMA method (Moher *et al.*, 2009)



شکل ۲- معیارهای انتخاب مقالات
Fig.2. Criteria for Paper Selection

کرده‌اند. اما به‌نظر می‌رسد این‌گونه مجلات از این حیث به اشباع رسیده‌اند و دیگر تمایلی به انتشار مقالات مشابه ندارند. از این‌رو به نظر می‌رسد ادامه روند انتشار مقالات این حوزه ضرورت به‌کارگیری نوآوری در روش تحقیق را ایجاد کرده است. محققانی که می‌خواهند در این زمینه ورود کنند نیاز است تا جنبه‌های جامع‌تری از تحلیل سامانه‌های کشاورزی را با روش‌های تحلیلی به‌روزتر مورد مطالعه قرار دهند. در سال‌های اخیر تمایل محققان به جنبه‌های زیست‌محیطی سامانه‌های کشاورزی بیشتر شده و مقالات در این موضوع افزایش یافته است.

در سال‌های اخیر به دلیل عدم اقبال مجلات بین‌المللی به انتشار مقالات در این حوزه، تعداد مقالات انتشار یافته با کاهش محسوسی روبه‌رو بوده است. عدم تمایل مجلات بین‌المللی به چاپ مقالات محققان ایرانی در این حوزه مطالعاتی به‌صورت زیر قابل تفسیر است. بررسی مقالات منتشر شده نشان می‌دهد که میزان نوآوری مقالات در روش تحقیق مورد استفاده کم است و جذابیت کافی برای پذیرش مقالات مشابه ایجاد نمی‌کند. بررسی روش تحقیق مقالات مورد بررسی نشان می‌دهد تعداد قابل‌توجهی از محققان این حوزه با استفاده از یک روش تحقیق ثابت و صرفاً با تغییر نوع محصول و منطقه مورد مطالعه اقدام به چاپ مقالات خود در مجلات بسیار معتبر



شکل ۳- توزیع تعداد مقالات در بازه زمانی مورد مطالعه
Fig.3. Distribution of published papers in studied period

ریسک انحراف در مطالعات^۱

در این بخش روش‌های ارزیابی ریسک در مطالعات و این‌که چگونه این اطلاعات در هر تحلیل داده دیگری مورد استفاده قرار گرفته شرح داده شده است. برای پیشگیری از تأثیر ریسک در نتایج برخی مطالعات، میانگین نتایج گزارش شده (مانند کارایی مصرف انرژی و غیره) در مقالات مختلف در مورد یک محصول واحد مورد استناد قرار گرفت. یکی از ریسک‌های مهم موضوع نمونه‌برداری و رعایت استانداردهای آن توسط محققان است که در ادامه این بخش به آن پرداخته شده است.

روش انتخاب نمونه

در هنگام نمونه‌برداری از سامانه‌های کشاورزی حداقل سه پرسش اساسی مطرح است که باید به آن‌ها پاسخ مناسب داد: (۱) آیا زمان نمونه‌برداری صحیح است؟ (۲) آیا روش انتخاب نمونه طوری انتخاب شده که نمونه نماینده جامعه باشد؟ (۳) روش محاسبه تعداد نمونه چیست و آیا تعداد نمونه به‌اندازه کافی است؟ در مورد زمان

فرآیند جمع‌آوری داده

در این مطالعه مروری، برای تحلیل نتایج گزارش شده در مقالات منتخب، از طریق بررسی جداول و ارقام موجود در مقالات، اطلاعات مورد نیاز استخراج شد. در گزارش شاخص‌های مختلف، چنانچه بیش از یک مطالعه در مورد یک محصول خاص وجود داشته باشند، از میانگین ارقام گزارش شده در مقاله حاضر استفاده شده است.

داده‌های مورد استفاده

برای ایجاد یک تصویر جامع از وضع الگوی مصرف انرژی در بخش باغی و گلخانه‌ای، داده‌ها و شاخص‌های زیر مورد بررسی قرار گرفت: سهم نهاده‌ها در کل انرژی نهاده، کارایی مصرف انرژی (EUE)، بهره‌وری انرژی (EP)، انرژی ویژه (SE)، انرژی خالص (NE)، شدت انرژی (EI)، هم‌ارزهای انرژی و انتشارات زیست‌محیطی مورد استفاده، نرخ هدف ذخیره انرژی (ESTR) و شاخص بهره‌وری فیزیکی نهایی (MPP).

نمونه‌برداری به دو روش می‌توان عمل کرد؛ (الف) نمونه‌برداری ایستا؛ که در آن در یک مقطع زمانی از یک فصل کاری، اقدام به جمع‌آوری داده‌های موردنیاز از نمونه‌ها می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد تقریباً اکثر مطالعات بررسی‌شده از روش‌های نمونه‌برداری ایستا استفاده کرده‌اند. (ب) نمونه‌برداری پویا؛ در این روش در مقاطع زمانی متعدد (در بیش از یک فصل کاری) اقدام به جمع‌آوری داده‌های موردنیاز می‌شود. به دلیل تنوع بسیار زیاد سامانه‌های کشاورزی و تأثیرپذیری آن‌ها از عوامل خارج از سامانه، رفتار آن‌ها در زمان‌های مختلف تغییر می‌کند، لذا برای کاهش تأثیر این‌گونه تغییرات در نتایج تحلیل سامانه‌های کشاورزی، به نظر می‌رسد بهتر است محققان از روش نمونه‌برداری پویا برای جمع‌آوری داده‌های موردنیاز خود استفاده نمایند.

روش انتخاب نمونه از جامعه آماری ارتباط مستقیم با ماهیت تنوع‌پذیری جامعه مورد مطالعه دارد. از آنجایی که تنوع در ویژگی‌های سامانه‌های کشاورزی بسیار زیاد است، لذا تعیین روش انتخاب نمونه بسیار حائز اهمیت است. به‌طور کلی دو نوع روش انتخاب نمونه وجود دارد؛ روش نمونه‌برداری احتمالی^۳ و غیراحتمالی^۴. در روش احتمالی، احتمال انتخاب تمام اعضای جامعه به‌عنوان نمونه یکسان است در حالی که در روش‌های غیراحتمالی همه اعضا شانس یکسان ندارند. هنگامی که هر عضو از جامعه مورد مطالعه، یک احتمال مشخص و غیرصفر برای وارد شدن به نمونه دارد، نمونه به‌عنوان یک نمونه احتمال شناخته می‌شود. نمونه‌های احتمال به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که نماینده جامعه باشند. نمونه‌های احتمالی معتبرترین نتایج را ارائه می‌دهند زیرا منعکس‌کننده ویژگی‌های جامعه‌ای است که از آن انتخاب شده‌اند. در سامانه‌های کشاورزی بهتر است از روش نمونه‌گیری احتمالی استفاده شود، زیرا تفاوت ویژگی‌های سامانه‌های کشاورزی به‌گونه‌ای است که برای درک و قضاوت صحیح از رفتار سامانه‌ها، همه اعضای جوامع مورد مطالعه باید شانس یکسانی برای انتخاب به‌عنوان نمونه داشته باشند.

به‌طور کلی چهار نوع روش نمونه‌برداری احتمالی معرفی شده است: نمونه‌گیری تصادفی ساده، نمونه‌گیری طبقه‌بندی‌شده، نمونه‌گیری سامانمند و نمونه‌گیری خوشه‌ای. روشی که در بیشتر مقالات مورد بررسی مشاهده شده است روش نمونه‌گیری تصادفی ساده است (Mousavi-Avval et al., 2012; Nabavi-Pelesaraei et al., 2016). اما در برخی مطالعات با توجه به شرایط سامانه‌های مورد بررسی از روش نمونه‌گیری طبقه‌بندی‌شده استفاده شده است.

سایر انواع روش‌های نمونه‌گیری احتمالی در مطالعات مشاهده نشد. بهتر است محققان از روش‌های نمونه‌گیری طبقه‌بندی‌شده و نمونه‌گیری خوشه‌ای در تحقیقات خود استفاده کنند. مقدار مصرف نهاده‌ها مهم‌ترین داده موردنیاز مطالعات سامانه‌های کشاورزی است. عوامل متعددی در مقدار مصرف نهاده توسط تولیدکنندگان تأثیرگذار است مانند مشخصات فردی بهره‌بردار (سن، جنسیت، سطح دانش، تجربه و غیره)، سطح فناوری‌های مورد استفاده در تولید (مکانیزه، نیمه مکانیزه، دستی، فناوری‌های نرخ متغیر و غیره)، نوع نظام بهره‌برداری از زمین (خصوصی، اجاره، تعاونی و غیره)، سطح مالکیت زمین (هکتار) و بسیاری عوامل دیگر. با استفاده از هر یک از این عوامل می‌توان جامعه مورد مطالعه را طبقه‌بندی نمود و از هر طبقه به تعداد کافی نمونه‌برداری کرد. لذا روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده به‌خوبی می‌تواند تنوع موجود در سامانه‌های مورد مطالعه را در نظر بگیرد و وجود تفاوت معنی‌دار در بین نتایج حاصل از شاخص‌ها را تا حدی توجیه کند. روش نمونه‌گیری دیگری که محققان می‌توانند استفاده کنند روش خوشه‌ای است. عامل خوشه‌بندی می‌تواند از ویژگی‌های سامانه‌ها، مانند نظام بهره‌برداری از زمین و ماشین‌ها، باشد. روش نمونه‌گیری سامانمند نیز به‌شرط وجود بانک اطلاعاتی از بهره‌برداران منطقه مورد مطالعه قابل استفاده است. توصیه اصلی مقاله حاضر، استفاده از روش نمونه‌گیری طبقه‌بندی‌شده است.

در مورد تعداد نمونه می‌توان گفت هرچه نمونه بزرگ‌تر باشد، حاشیه عدم اطمینان (فاصله اطمینان) پیرامون نتایج کوچک‌تر است. باین‌حال، عامل دیگری نیز وجود دارد که بر دقت نیز تأثیر می‌گذارد: تنوع چیزی که اندازه‌گیری می‌شود. هرچه مقدار مورد نظر از فردی به فرد دیگر متفاوت باشد، نمونه برای رسیدن به همان میزان اطمینان در مورد نتایج باید بزرگ‌تر باشد. برای محاسبه حجم یا اندازه نمونه می‌توان گفت عمده‌تاً دو روش در این مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. روش کوکران^۵ (رابطه ۱) و روش نیمان^۶ (رابطه ۲). نمونه‌برداری با هر یک از این روش‌ها، معمولاً به شیوه تصادفی صورت می‌گیرد. اولین مقالات در حوزه محصولات باغی در سال ۲۰۱۰ در مورد محصولات سیب، گردو، کیوی و توت‌فرنگی انجام شد که در آن‌ها اکثراً از روش نمونه‌برداری نیمان استفاده شد (Asakereh et al., 2010; Banaeian et al., 2010; Mohammadi et al., 2010; Salami et al., 2010). با این فرض که روش نمونه‌برداری کوکران مورد استفاده قرار گیرد، برای تعداد مختلف جامعه آماری با خطای ۰/۰۵، حجم نمونه مورد نیاز به شکل جدول ۱ خواهد بود.

$$n = \frac{N(s \times t)^2}{(N - 1)d^2 + (s \times t)^2} \quad (1)$$

5- Cochran
6- Neyman

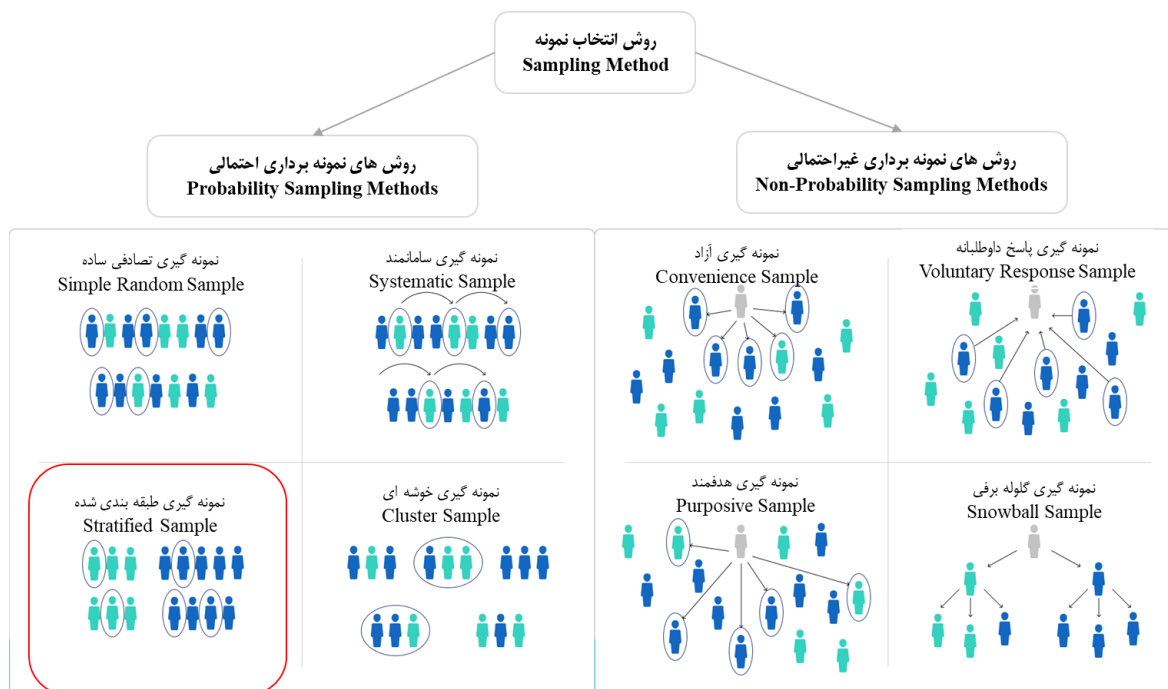
1- Static sampling method
2- Dynamic sampling method
3- Probability random sample
4- Non-probability sampling method

تعداد جامعه در طبقه h ، S_h انحراف معیار در طبقه h ، S_h^2 واریانس در طبقه h ، D دقت $x - X$ و $D^2 = d^2/z^2$ ، z ضریب اطمینان (۹۶٪) برای ۹۵٪ اطمینان.

که در آن n تعداد نمونه مورد نیاز، N تعداد جامعه آماری، t ضریب اطمینان (۹۶٪) برای ۹۵٪ اطمینان، s انحراف معیار داده‌های پیش‌آزمون، d دقت یا خطای موردپذیرش که در سطح اطمینان ۹۵٪ به میزان ۵٪ در نظر گرفته می‌شود.

$$n = \frac{\sum N_h S_h}{N^2 D^2 + \sum N_h S_h^2} \quad (2)$$

که در آن n تعداد نمونه مورد نیاز، N تعداد جامعه آماری، N_h



شکل ۴- روش‌های انتخاب نمونه

Fig.4. Sampling methods

جدول ۱- حجم نمونه مورد نیاز در جوامع آماری با استفاده از روش کوکران

Table 1- The sample size required in statistical population using Cochran's method

تعداد جامعه آماری	حجم نمونه مورد نیاز	تعداد جامعه آماری	حجم نمونه مورد نیاز
No. of Population	No. of Sample	No. of Population	No. of Sample
1000	278	15000	375
2000	322	20000	377
5000	357	30000	379
10000	370	35000	380

سامانه‌های تولیدی به عنوان یک طبقه در نظر گرفته شود و برای هر طبقه، نمونه‌برداری مستقل انجام شود. اکثر مقالات تعداد دقیق نمونه موردبررسی خود را اعلام کرده‌اند، اما تعداد معدودی نیز وجود دارد که اشاره‌ای به این موضوع نکرده‌اند. یکی از ریسک‌هایی که در مورد نمونه‌گیری در مطالعات سامانه‌های انرژی وجود دارد و ممکن است اعتبار این گونه مطالعات را مخدوش کند، موضوع اندازه و حجم نمونه

ریسک‌ها و چالش‌های نمونه‌برداری

به دلیل تنوع زیاد انواع سامانه‌های باغی و گلخانه‌ای و تأثیر آن‌ها در الگوی مصرف انرژی، تعداد نمونه موردبررسی و پراکنش مناسب آن در انواع سامانه‌ها در مطالعات انرژی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به عبارت دیگر برای پوشش همه سامانه‌ها، بهتر است از روش نمونه‌برداری کوکران استفاده شود. در این روش هر یک از انواع

انتخاب شده در تحقیق است. از آنجایی که تعداد بهره‌برداران بخش کشاورزی ایران به دلیل موضوع خرده مالکی بسیار زیاد است، از این رو جامعه آماری مطالعاتی که عمدتاً به صورت منطقه‌ای برای یک شهرستان یا استان انجام می‌شود اغلب بزرگ است. نتایج حاصل از آمارگیری توسط مرکز آمار ایران در بخش باغ‌ها و قلمستان‌ها نشان می‌دهد که حدود ۱۷/۶ درصد مساحت باغ‌ها و قلمستان‌های کشور در بهره‌برداری‌های با مساحت کمتر از ۱ هکتار، ۴۶/۸ درصد مساحت باغ‌ها و قلمستان‌های کشور در بهره‌برداری‌های با مساحت ۱ الی ۵ هکتار و ۳۵/۶ درصد از مساحت باغ‌ها و قلمستان‌های کشور در بهره‌برداری‌های با مساحت ۵ هکتار و یا بیش‌تر واقع شده‌اند. از نظر تعداد بهره‌برداری‌ها ۶۷/۵ درصد بهره‌برداری‌های باغ و قلمستان دارای کمتر از ۱ هکتار باغ، ۲۹/۲ درصد بهره‌برداری‌های باغ و قلمستان دارای ۱ الی ۵ هکتار باغ و ۳/۳ درصد بهره‌برداری‌های باغ و قلمستان دارای ۵ هکتار و یا بیش‌تر باغ و قلمستان بوده‌اند (Anonymous, 2017). در جدول ۲ تعداد نمونه مورد استفاده و تعداد جامعه آماری منطقه مورد مطالعه براساس سرشماری مرکز آمار ایران در برخی از مطالعات انجام شده گزارش شده است. با بررسی تعداد نمونه انتخاب شده در همه مقالات چاپ شده از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ این طور می‌توان نتیجه گرفت که استانداردها در مورد حجم نمونه انتخاب شده با توجه به تعداد بهره‌برداران در منطقه مورد مطالعه به خوبی رعایت نشده است. محققان علم آمار معتقدند که حداقل حجم نمونه برای به دست آوردن هر نوع نتیجه معنی‌دار ۱۰۰ است. اگر

جمعیت مورد مطالعه کمتر از ۱۰۰ عدد باشد، در واقع به جای نمونه‌گیری باید همه آن‌ها به صورت سرشماری بررسی شوند. در جدول ۲ برخی از مطالعاتی که با کمتر از ۱۰۰ و حتی کمتر از ۵۰ نمونه انجام شده است قابل مشاهده است. حداکثر اندازه نمونه مناسب معمولاً در حدود ۱۰٪ از جمعیت است، به شرطی که از ۱۰۰۰ عدد فراتر نرود. حتی در جمعیت ۲۰۰۰۰ نفری، از ۱۰۰۰ نفر نمونه‌برداری به طور معمول نتیجه نسبتاً دقیقی به دست می‌آورد. با نمونه‌گیری از بیش از ۱۰۰۰ نفر، با توجه به وقت و هزینه اضافی که صرف می‌شود، به دقت اضافه نمی‌شود. در عمل بیشتر افراد به طور معمول می‌خواهند نتایج تا حد ممکن دقیق باشند، بنابراین عامل محدودکننده معمولاً وقت و هزینه است. بنابراین پیشنهاد می‌شود محققان سامانه‌های کشاورزی حداقل ۱۰۰ و حداکثر ۱۰۰۰ نمونه در مطالعه خود در نظر بگیرند. اما در این میان می‌توانند با توجه به شرایط زیر بین این دو حد کمینه و بیشینه تخمین بهتری از تعداد نمونه مورد نیاز خود داشته باشند؛ (الف) عددی را نزدیک به حداقل (۱۰۰ نمونه) انتخاب کنند اگر: وقت و هزینه محدودی دارند، فقط به برآورد تقریبی نتایج نیاز دارند، در طول تجزیه و تحلیل قصد ندارند نمونه را به گروه‌های مختلف تقسیم کنند، یا فقط قصد دارند از چند زیرگروه بزرگ استفاده کنند (به عنوان مثال مردان/ زنان)، پیش‌بینی می‌شود اکثر نمونه‌ها پاسخ‌های مشابهی می‌دهند، تصمیماتی که بر اساس نتایج گرفته خواهند شد، پیامدهای قابل توجهی ندارند.

جدول ۲- مشخصات جامعه آماری و حجم نمونه در برخی از مطالعات انجام شده

Table 2- Characteristics of the statistical population and sample size in some studies

منبع Ref.	روش نمونه‌برداری Sampling method	تعداد نمونه انتخاب شده No. of selected samples	تعداد جامعه آماري No. of population	منطقه مورد مطالعه Studied area	محصول Crop
(Asakereh et al., 2010)	نیمان (Neyman)	113	34084	استان اصفهان (Isfahan)	سیب (Apple)
(Banaeian et al., 2010)	نیمان (Neyman)	37	33844	استان همدان (Hamedan)	گردو (Walnut)
(Mohammadi et al., 2010)	نیمان (Neyman)	86	8830	استان مازندران (Mazandaran)	کیوی (Kiwi)
(Rajabi Hamedani et al., 2011)	نیمان (Neyman)	50	37033	شهرستان ملایر (Malayer)	انگور (Grape)
(Mahmoudi et al., 2012)	کوکران (Cochran)	45	26343	استان یزد (Yazd)	پسته (Pistachio)
(Tabatabaie et al., 2013b)	کوکران (Cochran)	100	7700	استان تهران (Tehran)	گل‌ابی (Pear)
(Nabavi-Pelesaraei et al., 2014)	-	60	17435	شهرستان لنگرود (Langarud)	پرتقال (Orange)
(Ghatreh Samani et al., 2016)	کوکران (Cochran)	100	8798	استان چهارمحال و بختیاری (Chaharmahal and Bakhtiari)	هلو (Peach)
(Houshyar et al., 2017)	-	55	945	شهرستان مرودشت استان فارس (Marvdasht)	انار (Pomegranate)

محققانی که در آینده قصد ورود به این حوزه مطالعاتی را دارند هدف مهمی است که از طریق بحث در مورد روش‌ها، چالش‌ها، ریسک‌ها و نتایج مطالعات انجام‌شده در این مطالعه مروری دنبال شده است. مواجهه با تصویر جامعی که در این مقاله از تحقیقات پیشین ایجاد شده است به محققین کمک می‌کند تا در مسیر تکامل مطالعات در این حوزه قدم بردارند.

با استفاده از کلیدواژه‌های متداول تعداد ۲۱۱ مقاله در بازه ۲۰۰۸-۲۰۱۸ در پایگاه اسکوپوس یافت شد (شکل ۵). از منابع دیگر مانند گوگل اسکولار^۲ و ریسرچ گیت^۳ نیز استفاده شد تا جستجوی کامل‌تری انجام شود. پس از حذف مقالات تکراری، تعداد ۲۵۷ مقاله باقی ماند. سپس بررسی عناوین مقالات، چکیده و کلیدواژه‌ها انجام شد و تعداد ۱۵۱ مقاله مربوط به ایران نبود یا نامناسب تشخیص داده شد و حذف شد. از تعداد ۱۰۶ مقاله باقی‌مانده تعداد ۴۳ مقاله به دلایل زیر از فرآیند انتخاب حذف شد: کم بودن اعتبار مجله، همپوشانی محتوای مقاله با سایر مقالاتی که توسط همان گروه مؤلفان در مجلات دیگر به چاپ رسیده بود، عدم وجود محصولات باغی و گلخانه‌ای به‌عنوان محصول مورد مطالعه. در نهایت ۶۳ مقاله انتخاب شد. از همه این مقالات در تحلیل‌های ثانویه استفاده شد. ۱۹ مقاله نیز برای بحث بیشتر پیرامون مقالات مورد استفاده قرار گرفت. در این مقالات ۱۶ نوع محصول باغی و ۶ نوع محصول گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین قابل ذکر است که مقالات کوتاه، مقالات همایش‌هایی که در مجموعه مقالات به چاپ رسیده بودند و فصول کتاب در فرآیند انتخاب در نظر گرفته نشدند.

تحلیل الگوی مصرف انرژی

تناسب هم‌ارزهای مورد استفاده

روشی که در مطالعات انرژی برای استخراج الگوی مصرف انرژی در بخش محصولات باغی و گلخانه‌ای صورت گرفته است به‌طور عام متکی بر استفاده از هم‌ارزهای انرژی نهاده‌های مورد استفاده است. موضوع دیگری که در محاسبات الگوی مصرف انرژی وجود دارد، منشأ مقادیر هم‌ارز انرژی نهاده‌هاست. تقریباً همه مطالعات انرژی از هم‌ارزهای انرژی که توسط محققان خارجی محاسبه شده استفاده می‌کنند. وجود تفاوت‌های قابل توجه در شرایط تولید و مصرف نهاده‌های کشاورزی در ایران و خارج از آن، حاکی از آن است که هم‌ارزهای موجود در منابع را به‌راحتی نمی‌توان برای مزارع و باغات ایران مورد استفاده قرار داد. مهم‌ترین هم‌ارزهای انرژی که در مقالات منتشرشده در حوزه محصولات باغی و گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است در جدول ۳ آورده شده است.

(ب) عددی را نزدیک به حداکثر (۱۰۰۰) انتخاب کنند اگر: وقت و هزینه لازم برای انجام آن را دارند، بسیار مهم است که نتایج دقیق به‌دست آورند، قصد دارند در طی تجزیه و تحلیل، نمونه را به گروه‌های مختلف تقسیم کنند (به‌عنوان مثال گروه‌های مختلف سنی، سطح اقتصادی-اجتماعی و غیره)، پیش‌بینی می‌شود احتمالاً پاسخ‌های بسیار متفاوتی از نمونه‌ها دریافت می‌شود، تصمیماتی که بر اساس نتایج نمونه‌برداری اتخاذ می‌شوند مهم، گران‌قیمت یا پیامدهای جدی هستند. در تعدادی از مقالات مورد بررسی، تعداد نمونه انتخاب شده زیر ۵۰ عدد است (Salehi et al., 2016). نحوه محاسبه حجم نمونه در برخی مطالعه‌ها توضیح داده نشده است (Pahlavan et al., 2011). در برخی نیز به روش نمونه‌برداری مورد استفاده اشاره‌ای نشده است (Banaeian et al., 2011; Nikkhah et al., 2017). با توجه به اهمیت نمونه‌برداری و تأثیر آن در صحت نتایج این‌گونه مطالعات، ضروری است محققان به‌صورت مبسوط در مورد جزئیات نمونه‌برداری اطلاعات کاملی در اختیار خواننده قرار دهند.

ریسک انحراف در بین مطالعات مشابه^۱

در این‌گونه مطالعات، روش محاسبه شاخص‌های موردنظر بدین گونه است که پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از بین جامعه مورد مطالعه، از میانگین ارقام به‌دست‌آمده استفاده می‌شود. این ارقام در ضرایب هم‌ارز موجود در منابع ضرب می‌شود و شاخص‌های مختلف محاسبه می‌شود. اما در این میان، همه محققان از ضرایب هم‌ارز یکسانی استفاده نمی‌کنند و این باعث می‌شود نتایج مطالعات تفاوت اندکی با یکدیگر داشته باشند. به‌عنوان مثال مقدار ضریب هم‌ارز انرژی سوخت دیزل و نهاده ماشین در یک پژوهش به‌ترتیب ۵۶/۳۱ مگاژول بر لیتر و ۶۲/۷ مگاژول بر کیلوگرم استفاده شده است (Namdari et al., 2011a; Namdari et al., 2011b). این در حالی است که همین نهاده‌ها در مطالعه دیگری به‌ترتیب ۴۷/۶ مگاژول بر لیتر و ۱۳۸ مگاژول بر کیلوگرم استفاده شده است (Loghmanpour Zarini et al., 2013). هر دو مقاله نیز به مطالعه شاخص‌های انرژی مرکبات در شمال ایران پرداخته‌اند. وجود این‌گونه تفاوت‌ها باعث ایجاد برخی انحرافات در مقایسه نتایج مقالات مشابه در محصولات یکسان می‌شود. به‌هرحال برای تعدیل این تفاوت‌ها، در گزارش شاخص‌ها از میانگین‌گیری استفاده شده است.

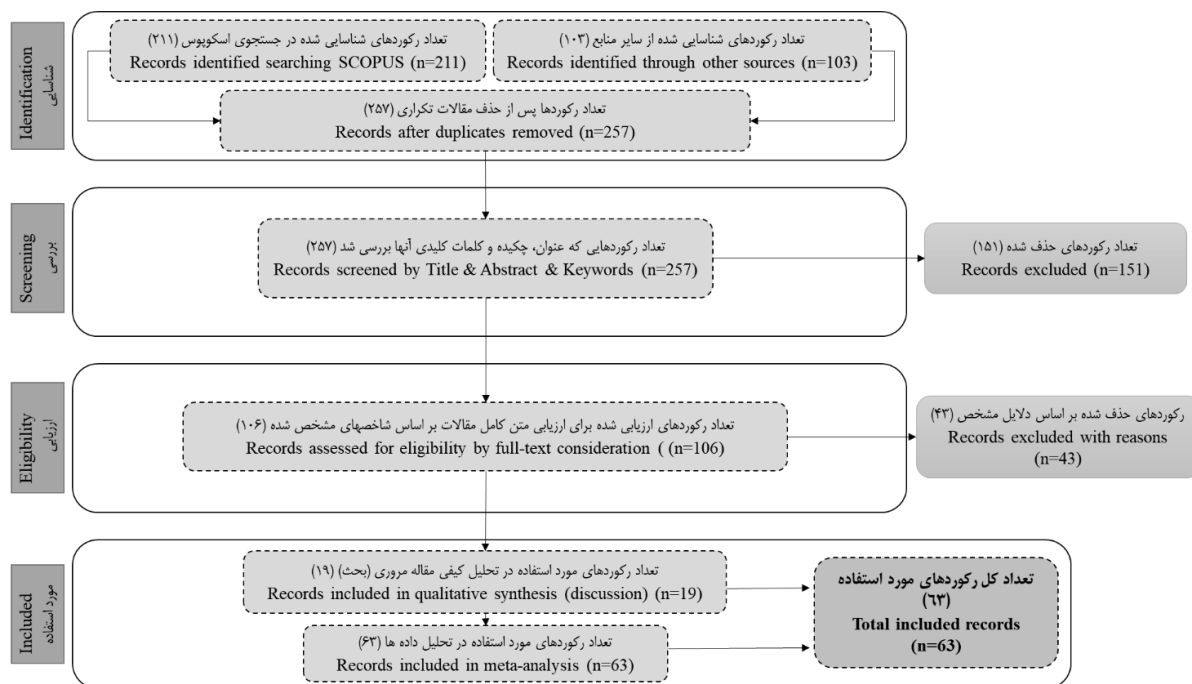
نتایج و بحث

نتایج این مطالعه مروری، جمع‌آوری و بحث در مورد روش‌های مورد استفاده و نتایج گزارش شده در تحقیقات مربوط به سامانه‌های تولید محصولات باغی و گلخانه‌ای است. ایجاد یک افق برای

2- Google Scholar

3- Research Gate

1- Risk of bias across studies



شکل ۵- ساختار طرحواره فرآیند مرور منابع

Fig.5. Schematic structure of review process

جدول ۳- هم‌ارزهای انرژی مورد استفاده

Table 3- Energy equivalents

منبع Ref.	محتوای انرژی Energy equivalent (MJ.Unit ⁻¹)	واحد Unit	نهاده Input
(Asakereh <i>et al.</i> , 2010)	2.2	ساعت (h)	نیروی انسانی (Human labor)
(Banaeian <i>et al.</i> , 2010)	1.96	ساعت (h)	نیروی انسانی (Human labor)
(Mohammadi and Omid, 2010)	13.06	ساعت (h)	ماشین (Machinery)
(Salami <i>et al.</i> , 2010)	138	کیلوگرم (kg)	ماشین (تراکتور) (Machinery (Tractor))
(Salami <i>et al.</i> , 2010)	180	کیلوگرم (kg)	ماشین (شخم) (Machinery (Plow))
(Salami <i>et al.</i> , 2010)	149	کیلوگرم (kg)	ماشین (دیسک) (Machinery (Disk))
(Mohammadi and Omid, 2010)	56.31	لیتر (L)	سوخت (دیزل) (Fuel (Diesel))
(Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2013a)	49.5	مترمکعب (m ³)	سوخت (گاز طبیعی) (Fuel (CNG))
(Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2014a)	85	کیلوگرم (kg)	علف کش (Herbicide)
(Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2014a)	295	کیلوگرم (kg)	قارچ کش (Fungicide)
(Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2014a)	115	کیلوگرم (kg)	آفت کش (Insecticide)
(Salehi <i>et al.</i> , 2014)	5.08	کیلوگرم (kg)	کمپوست (Compost)
(Taghavifar and Mardani, 2015)	0.3	کیلوگرم (kg)	کود دامی (Manure)
(Mardani and Taghavifar, 2016)	625.84	کیلووات ساعت (kWh)	الکتریسیته (Electricity)
(Pahlavan <i>et al.</i> , 2012d)	66.14	کیلوگرم (kg)	نیتروژن (Nitrogen)
(Houshyar <i>et al.</i> , 2017)	12.44	کیلوگرم (kg)	فسفات-فسفر (Phosphate)
(Banaeian and Zangeneh, 2011b)	11.15	کیلوگرم (kg)	پتاسیم (Potassium)
(Nabavi-Pelesaraei <i>et al.</i> , 2016)	1.12	کیلوگرم (kg)	سولفور (Sulfur)
(Banaeian and Zangeneh, 2011b)	8.40	کیلوگرم (kg)	روی (Zinc)
(Houshyar <i>et al.</i> , 2017)	20.9	کیلوگرم (kg)	سولفات روی (Zinc sulfate)
(Farashah <i>et al.</i> , 2013)	1.02	مترمکعب (m ³)	آب (Water)

(al., 2013)

$$\text{Energy Use Efficiency} = \frac{\text{Energy Output (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Energy Input (MJ ha}^{-1}\text{)}} \quad (۳)$$

$$\text{Energy Productivity} = \frac{\text{Output (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Energy Input (MJha}^{-1}\text{)}} \quad (۴)$$

$$\text{Specific Energy} = \frac{\text{Energy Input (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Output (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (۵)$$

$$\text{Net Energy} = \text{Energy Output (MJ ha}^{-1}\text{)} - \text{Energy Input (MJ ha}^{-1}\text{)} \quad (۶)$$

$$\text{Energy Intensiveness} = \frac{\text{Energy Input (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Cost of Cultivation (\$ha}^{-1}\text{)}} \quad (۷)$$

بررسی شاخص‌های انرژی در محصولات باغی و گلخانه‌ای

وضعیت شاخص‌های انرژی در محصولات باغی و گلخانه‌ای شامل مجموع مصرف انرژی (TEI)، کارایی مصرف انرژی (EUE)، انرژی خالص (NE)، بهره‌وری انرژی (EP) در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. گردو کمترین و توت‌فرنگی بیشترین میزان مصرف انرژی را در بین محصولات باغی به خود اختصاص داده‌اند. فقط محصولات انگور، سیب و گردو دارای انرژی خالص مثبت هستند، از این‌رو بیشترین مقدار کارایی مصرف انرژی را نیز در مقایسه با سایر محصولات دارند. نتایج بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد هیچ‌یک از محصولات گلخانه‌ای انرژی خالص مثبت ندارند. دلیل اصلی این موضوع تولید محصولات گلخانه‌ای به صورت خارج از فصل است که نیاز به مصرف انرژی برای سرمایش و گرمایش را به شدت افزایش می‌دهد. محصول گل مریم^۲ در مقایسه با سایر محصولات گلخانه‌ای از وضعیت مناسب‌تری برخوردار است. در مقابل محصولات فلفل دلمه‌ای و قارچ دکمه‌ای وضعیت نامناسبی از نظر الگوی مصرف انرژی دارند و با توجه به حجم قابل توجه تولید آن‌ها، نیاز به انجام مطالعات بیشتر جهت یافتن علل بروز این وضعیت ضروری به نظر می‌رسد.

مدل‌سازی با استفاده از تابع کاب داگلاس

نتایج بررسی روش تحقیق مطالعات این حوزه نشان می‌دهد که تعداد زیادی از محققان پس از محاسبه شاخص‌های انرژی (روابط ۳ تا ۷)، ارتباط بین مقدار محصول به دست آمده و انرژی نهاده را با استفاده از تابع تولید کاب داگلاس بررسی کرده‌اند (رابطه ۷)

هم‌ارزهای انرژی مورد استفاده محققان گاهی اوقات تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند که عمدتاً ناشی از مراجع مورد استفاده آن‌هاست. به عنوان مثال در مورد نهاده ماشین، برخی مقالات از واحد ساعت و برخی دیگر از واحد کیلوگرم استفاده کرده‌اند. در بین مواردی که از واحد ساعت استفاده کرده‌اند نیز تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود. به عنوان مثال محققان در پژوهشی مقدار ۱۳/۰۶ مگا ژول بر ساعت را استفاده کردند (Mohammadi and Omid, 2010). در حالی که در مطالعه دیگری مقدار ۶۴/۸ مگا ژول بر ساعت را مبنای محاسبات خود قرار گرفت (Banaeian et al., 2011). این تفاوت در حالی است که هر دو تحقیق در مورد محصولات گلخانه‌ای خیار و توت‌فرنگی است. وجود تفاوت در هم‌ارزهای انرژی در تعداد دیگری از نهاده‌ها هم قابل مشاهده است. از این دست می‌توان به هم‌ارز انرژی در مورد نهاده‌های سموم شیمیایی از قبیل علف‌کش، قارچ‌کش و آفت‌کش اشاره کرد (Karimi and Moghaddam, 2018; Khoshnevisan et al., 2014a).

بررسی سهم نهاده‌ها در کل انرژی نهاده

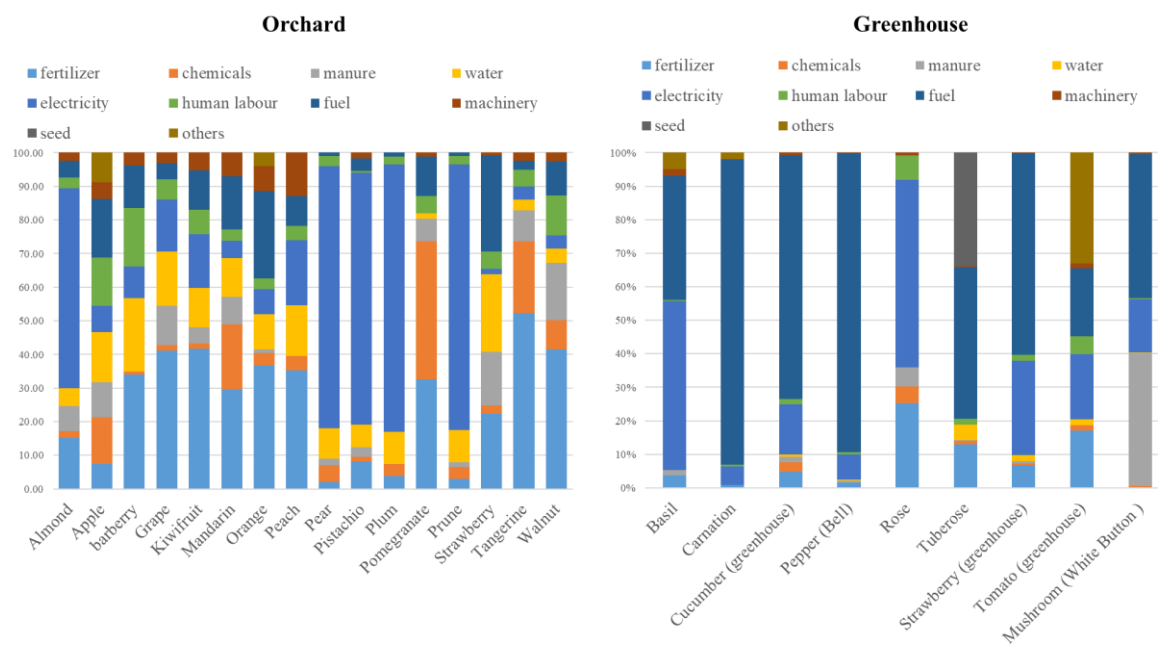
از آنجا که محل اجرای پژوهش‌ها دارای پراکنش جغرافیایی مناسبی است، بررسی سهم هر یک از نهاده‌ها در میزان کل انرژی مصرفی^۱ (TEI) اولین گام در جهت بهبود الگوی مصرف انرژی در بخش محصولات باغی و گلخانه‌ای ایران است. شکل ۶ سهم هر یک از نهاده‌ها را به ترتیب در محصولات باغی و گلخانه‌ای نشان می‌دهد. این اعداد از نتایج گزارش شده در مقالاتی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته به دست آمده است. در مواردی که برای یک محصول، بیش از یک مقاله وجود دارد، میانگین مقادیر مقالات موجود ملاک عمل برای ترسیم این نمودارها بوده است. این دو نمودار تصویر جامعی از وضعیت مصرف انرژی در بخش باغ و گلخانه در اختیار خواننده قرار می‌دهد. در محصولات باغی، سهم نهاده‌های کود و الکتریسیته بسیار قابل توجه است. در مورد محصولات گلخانه‌ای، نهاده سوخت که عمدتاً از نوع گازوئیل است بیشترین سهم مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است.

شاخص‌های رایج انرژی

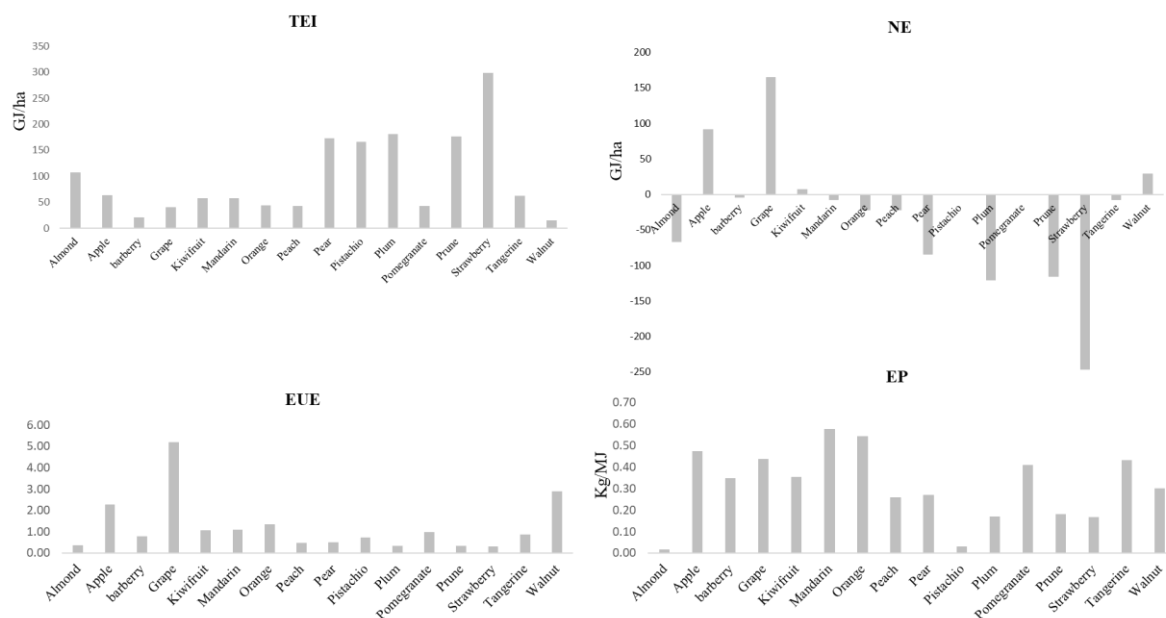
شاخص‌های اصلی تحلیل الگوی مصرف انرژی که تقریباً در همه مقالات مورد استفاده محققان قرار گرفته است عبارت است از کارایی مصرف انرژی (EUE)، بهره‌وری انرژی (EP)، انرژی ویژه (SE)، انرژی خالص (NE) و شدت انرژی (EI) که در روابط (۳) تا (۷) معرفی شده است: (Houshyar et al., 2017; Pishgar-Komleh et

میزان انرژی نهاده‌ها، میزان انرژی‌های مستقیم و غیرمستقیم، میزان انرژی‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر و غیره به‌عنوان ورودی‌های مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Mohammadshirazi *et al.*, 2012).

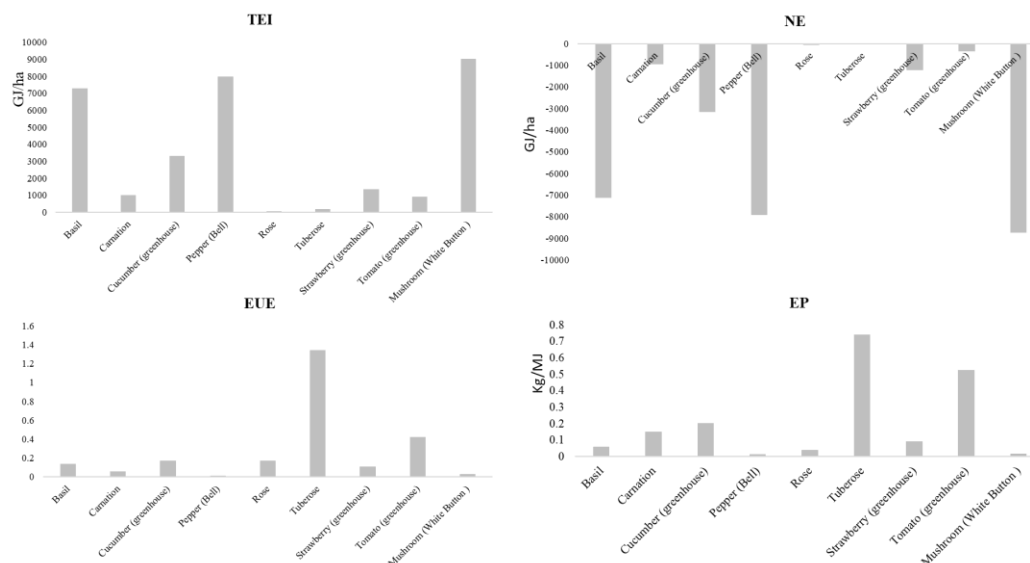
(Pishgar-Komleh *et al.*, 2013). روش کاب داگلاس برای بررسی مدل اقتصادی تولید نیز در بسیاری از مقالات مورد استفاده قرار گرفته است (Royan *et al.*, 2012). در این گروه از مطالعات، شاخص‌های اقتصادی مختلفی مانند میزان تولید، میزان درآمد، بهره‌بردار و غیره به‌عنوان خروجی مدل و میزان نهاده‌های مصرفی،



شکل ۶- سهم نهاده‌ها در کل انرژی نهاده در محصولات باغی و گلخانه‌ای
Fig.6. Share of inputs in Total Energy Input (TEI) in orchard and greenhouse crops



شکل ۷- وضعیت شاخص‌های انرژی در محصولات باغی
Fig.7. Status of energy indicators in horticultural crops



شکل ۸- وضعیت شاخص‌های انرژی در محصولات گلخانه‌ای
 Fig.8. Status of energy indicators in greenhouse crops

تحلیل حساسیت نهاده‌های انرژی

در بسیاری از مطالعات، تحلیل حساسیت نهاده‌های انرژی با استفاده از روش بهره‌وری فیزیکی نهایی^۳ (MPP) (Pahlavan et al., 2012a). این شاخص با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Ghatrehsamani et al., 2016). این شاخص نشان می‌دهد که به ازای هر واحد افزایش مصرف انرژی نهاده‌ها چه میزان تغییر در میزان محصول نهایی تولیدشده محقق می‌شود. بیشترین مقدار آماره t و مقدار MPP در مورد محصولات بررسی شده در جدول ۴ گزارش شده است.

$$MPP_{xj} = \frac{GM(Y)}{GM(X_j)} \times \alpha_j \quad (9)$$

که در آن MPP_{xj} بهره‌وری فیزیکی نهایی z آمین نهاده، α_j ضریب رگرسیون z آمین نهاده، $GM(Y)$ میانگین هندسی محصول ستانده و $GM(X_j)$ میانگین هندسی z آمین نهاده انرژی بر اساس هر هکتار (Tabatabaie et al., 2013a).

بهینه‌سازی و پیش‌بینی انرژی

مقالات منتشرشده از حیث نحوه تحلیل سامانه‌های تولید محصولات شامل الگوی مصرف انرژی، مدل اقتصادی و انتشارات زیست‌محیطی به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند. گروه اول صرفاً به محاسبه شاخص‌های اصلی پرداخته‌اند. گروه دوم با استفاده از روش‌های تکمیلی، تحلیل بیشتر و عمیق‌تری درباره سامانه تولیدی مورد ارائه کرده‌اند (جدول ۵).

در این مطالعات از آماره دوربین-واتسون^۱ به منظور بررسی همبستگی بین مقادیر باقی‌مانده از تحلیل رگرسیون استفاده می‌شود. پس از مدل‌سازی با استفاده از تابع کاب داگلاس، مقدار آماره t^2 برای همه نهاده‌های مورد استفاده در مدل و معنی‌داری آن‌ها گزارش می‌شود. به عنوان مثال صالحی و همکاران (Salehi et al., 2016) در محصول قارچ، نهاده نیروی انسانی و کمپوست را به ترتیب در سطوح پنج و یک درصد معنی‌دار گزارش کرده‌اند. این بدان معنی است که این دو نهاده به ترتیب با احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد تأثیر معنی‌دار در افزایش مقدار محصول قارچ دارند. علاوه بر مقدار، جهت تأثیرگذاری نهاده‌ها بر روی خروجی تعیین شده در مدل کاب داگلاس، که اغلب میزان محصول نهایی است، با استفاده از علامت آماره t مشخص می‌شود. مقدار تأثیر هر نهاده نیز از طریق ضرایب گزارش شده در مدل کاب داگلاس مشخص می‌شود.

$$\ln Y_i = a + \sum_{j=1}^n \alpha_j \ln(X_{ij}) + e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

که در آن Y_i مقدار محصول باغ نام است، X_{ij} بردار z آمین نهاده مورد استفاده در z آمین باغ در فرآیند تولید محصول است، a عدد ثابت، α_j ضرایب نهاده‌هایی است که از مدل تخمین زده شده است و e_i میزان خطا در z آمین باغ است.

1- Durbin-Watson

2- t-ratio

3- Marginal Physical Productivity

جدول ۴- بالاترین مقدار آماره t و MPP در محصولات باغی و گلخانه‌ای

Table 4- Highest t-ratio and MPP of orchard and greenhouse crops

محصول Product	بیشترین بهره‌وری فیزیکی نهایی Highest MPP	بیشترین t-ratio Highest t-ratio	منبع Ref.
بادام (Almond)	آب (Water)	کود دامی (Manure)	(Salehi <i>et al.</i> , 2016)
سیب (Apple)	آب (Water)	الکتریسیته (Electricity)	(Rafiee <i>et al.</i> , 2010)
ریحان (Basil)	نیروی انسانی (Human labor)	نیروی انسانی (Human labor)	(Pahlavan <i>et al.</i> , 2012a)
خیار (Cucumber)	نیروی انسانی (Human labor)	گازوئیل (Diesel)	(Pishgar-Komleh <i>et al.</i> , 2013)
خیار (Cucumber)	-	نیروی انسانی (Human labor)	(Pahlavan <i>et al.</i> , 2012b)
انگور (Grape)	سموم شیمیایی (Chemicals)	سموم شیمیایی (Chemicals)	(Rajabi Hamedani <i>et al.</i> , 2011)
کیوی (Kiwi)	کود پتاس (Potassium)	کود پتاس (Potassium)	(Nikkhah <i>et al.</i> , 2016)
کیوی (Kiwi)	-	ماشین‌های کشاورزی (Machinery)	(Soltanali <i>et al.</i> , 2017)
نارنگی (Mandarin)	نیروی انسانی (Human labor)	آب (Water)	(Namdari <i>et al.</i> , 2011a)
قارچ (Mushrooms)	نیروی انسانی (Human labor)	کمپوست (Compost)	(Salehi <i>et al.</i> , 2014)
هلو (Peach)	نیروی انسانی (Human labor)	نیروی انسانی (Human labor)	(Royan <i>et al.</i> , 2012)
هلو (Peach)	ماشین‌های کشاورزی (Machinery)	کود (Fertilizers)	(Ghatreh Samani <i>et al.</i> , 2016)
گلابی (Pear)	گازوئیل (Diesel)	گازوئیل (Diesel)	(Tabatabaie <i>et al.</i> , 2013b)
آلو (Plum)	نیروی انسانی (Human labor)	نیروی انسانی (Human labor)	(Tabatabaie <i>et al.</i> , 2012)
انار (Pomegranate)	گازوئیل (Diesel)	الکتریسیته (Electricity)	(Tabatabaie <i>et al.</i> , 2013a)
نارنگی (Mandarin)	آب (Water)	کود (Fertilizers)	(Mohammadshirazi <i>et al.</i> , 2012)
گوچه (Tomato)	نیروی انسانی (Human labor)	نیروی انسانی (Human labor)	(Taki <i>et al.</i> , 2013)
گردو (Walnut)	نیروی انسانی (Human labor)	نیروی انسانی (Human labor)	(Banaeian and Zangeneh, 2011a)

جدول ۵- روش‌های تکمیلی مورد استفاده در تحلیل سامانه‌های تولید محصولات باغی و گلخانه‌ای

Table 5- Complementary methods used in the analysis of orchard and greenhouse production systems

روش Method	هدف Objectives	منبع Ref.
تحلیل پوششی داده‌ها ^۱ (DEA) Data Envelopment Analysis (DEA)	بررسی بازده فنی و بازده به مقیاس تولیدکنندگان Investigation of technical efficiency and returns to the scale of farmers	(Mousavi-Avval <i>et al.</i> , 2012)
شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) Artificial Neural Networks (ANN)	مدل‌سازی و پیش‌بینی میزان تولید محصول با استفاده از نهاده‌های مصرفی Modeling and forecasting the amount of product production using inputs	(Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2013b)
سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System	مدل‌سازی میزان تولید محصول با استفاده از نهاده‌های مصرفی Modeling the amount of product production using inputs	(Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2013a)

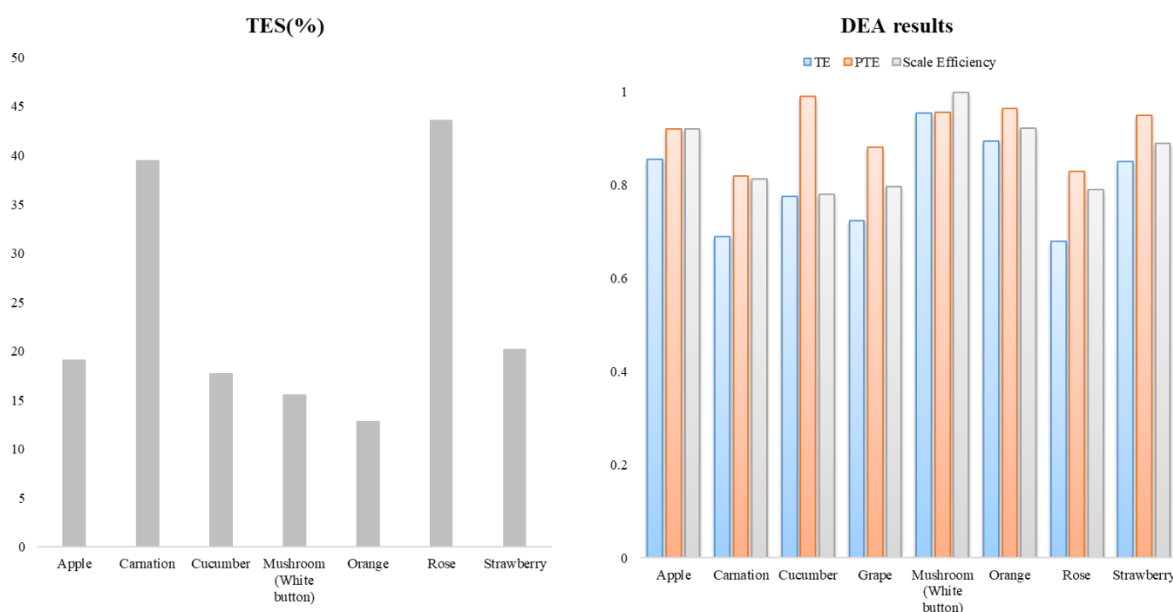
محصولات باغی و گلخانه‌ای در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج مطالعات حاکی از آن است که محصولات گل رز و هویج امکان صرفه‌جویی بیشتری در مصرف انرژی دارند و محصول قارچ دارای بهترین شاخص‌های کارایی فنی، کارایی فنی خالص و بازده به مقیاس است. بررسی دلایل موفقیت یا عدم موفقیت یک محصول از نظر امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی موضوعی است که در اغلب مطالعات بدان پرداخته نمی‌شود. شایسته است محققین فرضیه‌هایی برای بررسی علل رفتار مطلوب یا نامطلوب سامانه تولیدی مورد مطالعه طراحی کرده و با استفاده از روش‌های مناسب به تایید یا رد آن‌ها بپردازند. بدین ترتیب امکان اثربخشی مطالعات در سامانه‌های کشاورزی افزایش می‌یابد.

پتانسیل هر یک از نهاده‌ها در کاهش انرژی مصرفی با حفظ سطح تولید با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و شاخص ESTR در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مهم‌ترین نهاده‌هایی که دارای بیشترین پتانسیل در اغلب محصولات هستند عبارتند از سوخت گازوئیل و الکتریسیته. در محصول خیار سوخت گازوئیل پتانسیل بسیار زیادی دارد که نیاز است روش‌های کاهش آن در تحقیقات آتی مدنظر قرار گیرد. در مورد محصولات توت‌فرنگی و گل رز نیز نهاده الکتریسیته بیشترین پتانسیل صرفه‌جویی انرژی را دارد. اطلاع از پتانسیل نهاده‌هایی که صرفه‌جویی در آن‌ها امکان‌پذیر است می‌تواند اثربخشی مناسبی در تغییر رفتار تولیدکنندگان داشته باشد. مطمئناً فعالیت‌های ترویجی وسیعی برای نهادینه کردن نتایج به‌دست‌آمده از بخش تحقیقات مورد نیاز است. از آن‌جایی که تغییر رفتار مصرفی تولیدکنندگان به سهولت باعث تغییر میزان مصرف انرژی و بهبود الگوی مصرف انرژی خواهد شد، لذا ضروری است نهاده‌های متولی فعالیت‌های ترویجی بخش کشاورزی نتایج این‌گونه تحقیقات را در محتواهای آموزشی خود درج کنند.

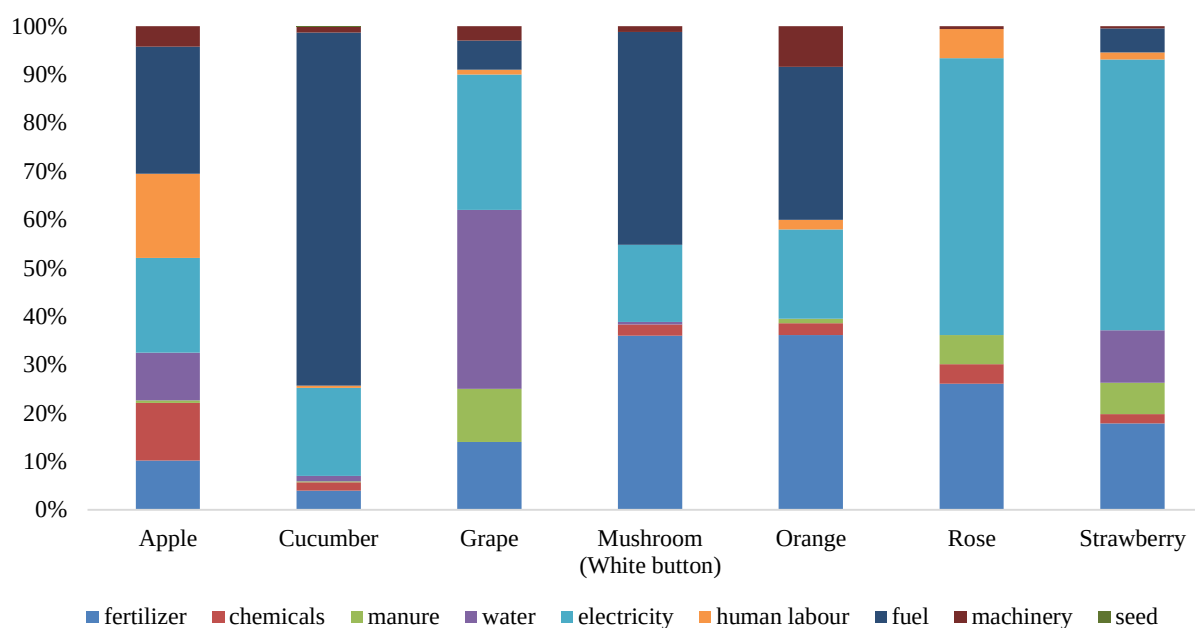
تعدادی از مطالعات تحلیل الگوی مصرف انرژی را بر مبنای نحوه کاشت و تولید محصول انجام داده‌اند. به‌عنوان مثال مقالاتی وجود دارد که کشت روش باز در مزرعه و کشت در محیط بسته گلخانه‌ای را مورد تحلیل قرار داده‌اند (Khoshnevisan et al., 2014e). محققان در پژوهشی تولید محصول خیار در مزرعه و گلخانه را مقایسه کردند (Yousefi et al., 2012). این‌گونه مطالعات نیز به شرطی که در یک منطقه واحد هر دو نوع کشت را مورد مقایسه قرار داده باشد می‌تواند نتایج ارزشمندی در اختیار خواننده قرار دهد. نتایج پژوهش فوق نشان داد میزان تولید محصول خیار در گلخانه ۲۵۰ و در مزرعه ۳۲ تن در هکتار بود، اما بهره‌وری انرژی در مزرعه حدود ۲۰ برابر بیشتر از گلخانه گزارش شد.

در روش تحلیل پوششی داده‌ها چند شاخص در اکثر مقالات گزارش شده است: کارایی فنی (TE)^۱، کارایی فنی خالص (PTE)^۲، کارایی به مقیاس (SE)^۳ و نرخ هدف ذخیره انرژی (ESTR)^۴ (Shabani et al., 2012). تحلیل داده‌ها در روش DEA عمدتاً با استفاده از نرم‌افزار DEA-Solver انجام شده است. تحلیل پوششی داده‌ها نتایج ارزشمندی در اختیار محققین درباره الگوی مصرف انرژی قرار داده است، به‌طوری که واحدهای تولیدکننده کارا و ناکارا از جنبه کارایی مصرف انرژی را مشخص می‌کند. اما در روش تحلیل پوششی داده‌ها صرفاً رفتار و نتیجه نهایی یک سامانه مورد بررسی محققین است. به نظر می‌رسد شناسایی علل ایجاد یک سامانه کارا یا ناکارا از چشم محققین به دور مانده است و این‌گونه مطالعات تحلیل مناسبی در این زمینه نداشته‌اند. بنابراین یکی از اشکالاتی که به مقالات منتشرشده وارد می‌شود عدم ارائه تحلیل کافی درباره علل ایجاد یک الگوی مصرف انرژی در یک محصول خاص در یک منطقه است. الگوی مصرف انرژی در یک سامانه تولیدی کشاورزی یا باغی، محصول سلسله‌ای از ویژگی‌ها و رفتارها در یک سامانه است. چنانچه محقق خواسته باشد الگوی مناسب مصرف انرژی را به سایر تولیدکنندگان نیز تسری بدهد، نیاز است تا عوامل ایجاد یک الگوی بهینه مصرف انرژی را نیز شناسایی کند. از این‌رو پیشنهاد می‌شود علاوه بر مطالعه عوامل و نهاده‌های تولید، سایر مشخصات سامانه‌های تولید نیز هنگام جمع‌آوری داده مدنظر محققین باشد تا با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌سازی مناسب، اقدام به شناسایی عوامل مؤثر در بروز یک الگوی مصرف انرژی نمایند. عموماً مقالاتی که در این حوزه به چاپ می‌رسند صرفاً گزارش‌دهنده‌ی وضعیت فعلی الگوی مصرف انرژی هستند. اما تعداد بسیار محدودی از مقالات وجود دارد که عوامل مؤثر در کارایی مصرف انرژی را مورد بررسی قرار داده‌اند. به‌عنوان مثال در پژوهشی محققان با استفاده از مدل توبیت^۵ ارتباط بین کارایی مصرف انرژی و مشخصات و ویژگی‌های باغداران انگور را مورد بررسی قرار دادند (Khoshroo et al., 2013). مقایسه کلی نتایج گزارش‌شده توسط محققان مختلف می‌تواند تصویر جامعی از وضعیت صرفه‌جویی انرژی در سامانه‌های تولیدی مورد مطالعه در اختیار خواننده قرار دهد. مجموع صرفه‌جویی انرژی^۶ (TES) حاصل از به‌کارگیری روش DEA و شاخص‌های این روش شامل کارایی فنی، کارایی فنی خالص و بازده به مقیاس در مورد

- 1- Technical efficiency
- 2- Pure technical efficiency
- 3- Scale efficiency
- 4- Energy saving target ratio
- 5- Tobit Model
- 6- Total Energy Saving



شکل ۹- شاخص‌های خروجی روش DEA در محصولات باغی و گلخانه‌ای
Fig.9. Output indicators of DEA method for greenhouse and orchard crops



شکل ۱۰- سهم هر یک از نهاده‌ها در نرخ ذخیره انرژی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها
Fig.10. Share of each input in ESTR via DEA method

و کشت گلخانه‌ای ۴۶/۸۴ مگاژول بر کیلوگرم است. بنابراین ضروری است اقدامات اصلاحی مؤثری برای کاهش انرژی ویژه در سامانه تولید گلخانه‌ای محصول خیار طراحی و اجرا شود. معمولاً محققین در

به دلیل تفاوت بسیار زیاد مقدار تولید محصول در این دو سامانه تولیدی، مقایسه شاخص انرژی ویژه که به صورت مگا ژول بر کیلوگرم است نتایج دقیق‌تری به دنبال دارد. مقدار انرژی ویژه کشت باز ۲/۳۸

مقایسه قرار دادند (Pishgar-Komleh et al., 2013). آن‌ها اندازه‌های مختلف گلخانه‌های تولید خیار را مورد مقایسه قرار دادند تا تفاوت‌های معنی‌دار را شناسایی کنند. مقالات دیگری نیز وجود دارند که میزان انتشارات زیست‌محیطی را در سامانه‌های تولیدی در محیط باز (باغ) و محیط بسته (گلخانه) مورد مقایسه قرار داده‌اند.

محققان در پژوهشی تحلیل بسیار جامعی برای مقایسه سامانه‌های کشت باز و بسته توت‌فرنگی ارائه کردند (Khoshnevisan et al., 2014b). آن‌ها برای اولین بار روش ارزیابی چرخه حیات (LCA)^۲ را برای بررسی سامانه‌های تولید توت‌فرنگی از نظر انتشارات زیست‌محیطی در مورد محصولات گلخانه‌ای مورد استفاده قرار دادند. جدول ۶ سهم نهاده‌ها در انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان انتشارات در محصولات باغی و گلخانه‌ای را نشان می‌دهد. سهم نهاده‌ها در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین میزان انتشارات در محصولات باغی و گلخانه‌ای در جدول ۶ ارائه شده است.

بررسی نحوه انتخاب مکان و محصول مورد مطالعه

به دلیل ماهیت مکان‌مبنا بودن مطالعات این حوزه، بررسی پراکنش جغرافیایی تحقیقات انجام شده می‌تواند تصویر مناسبی از روند آن در سطح کشور ایجاد کند. با توجه به ساختار تقاضای پژوهش در کشور و ماهیت تحقیقات حوزه تحلیل سامانه‌های کشاورزی، تعداد قابل‌توجهی از این تحقیقات تقاضامحور نیست و در قالب پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد انجام شده است. از آن‌جاکه هدف همه محققین بهبود سامانه‌های کشاورزی است، بهتر است انجام مطالعات در درجه اول دارای توزیع جغرافیایی مناسب در سطح کشور باشند، همچنین تناسبی هم با میزان اهمیت محصول و منطقه مورد مطالعه داشته باشد. اثربخشی مطالعات در این حوزه مستلزم رعایت این دو شرط است. بیشترین تعداد مطالعات به‌ترتیب در استان‌های اصفهان، گیلان، تهران و مازندران انجام شده است. این مطالعات تقریباً ۵۰ درصد کل مقالات را به خود اختصاص داده است. این در حالی است که استان‌های مازندران، کرمان، آذربایجان غربی، فارس و آذربایجان شرقی به‌ترتیب مهم‌ترین استان‌ها از نظر میزان تولید محصولات باغی هستند. به دلیل تقاضامحور نبودن پژوهش‌ها و عدم وجود شناخت کافی محققین از وضعیت تولید در بخش کشاورزی، عدم تناسب بین اهمیت استان‌ها و تعداد مطالعات انجام شده در آن‌ها دور از تصور نیست.

همین نقطه کار خود را متوقف می‌کنند و در اکثر موارد صرفاً به بیان پیشنهادها بسیار کلی اکتفا می‌کنند. این در حالی است که در فرآیند تحلیل سامانه‌ها نیاز است پس از شناسایی مشکلات یک سامانه، پیشنهادها اصلاحی مناسب تدوین شده و به‌منظور اجرا پیگیری شوند. پس از پیاده‌سازی پیشنهادها اصلاحی، سامانه مورد مطالعه مجدداً مورد بررسی قرار گیرد و تأثیرات احتمالی اقدامات اصلاحی سنجیده شوند.

تحلیل الگوی اقتصادی سامانه‌های تولیدی

علاوه بر تحلیل الگوی مصرف انرژی، تحلیل‌های دیگری نیز در مقالات منتشر شده به انجام رسیده است. تحلیل مدل اقتصادی تولید محصولات در برخی مقالات با استفاده از تابع تولید کاب داگلاس انجام شده است (Royan et al., 2012). به‌منظور مطالعه بخش اقتصادی سامانه‌های تولید محصولات باغی و گلخانه‌ای، تعدادی از مقالات به محاسبه شاخص‌های اقتصادی تولید با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱۴) پرداخته‌اند (Tabatabaie et al., 2013b; Taki et al., 2013).

$$\text{Total Production Value} = \text{Crop Yield (kg ha}^{-1}\text{)} * \text{Crop Price (\$ kg}^{-1}\text{)} \quad (10)$$

$$\text{Gross Return} = \text{Total Production Value (\$ ha}^{-1}\text{)} - \text{Variable Cost (\$ ha}^{-1}\text{)} \quad (11)$$

$$\text{Net Return} = \text{Total Production Value (\$ ha}^{-1}\text{)} - \text{Total Production Cost (\$ ha}^{-1}\text{)} \quad (12)$$

$$\text{Benefit to Cost Ratio} = \frac{\text{Total Production Value (\$ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Total Production Cost (\$ ha}^{-1}\text{)}} \quad (13)$$

$$\text{Productivity} = \frac{\text{Crop Yield (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Total Production Cost (\$ ha}^{-1}\text{)}} \quad (14)$$

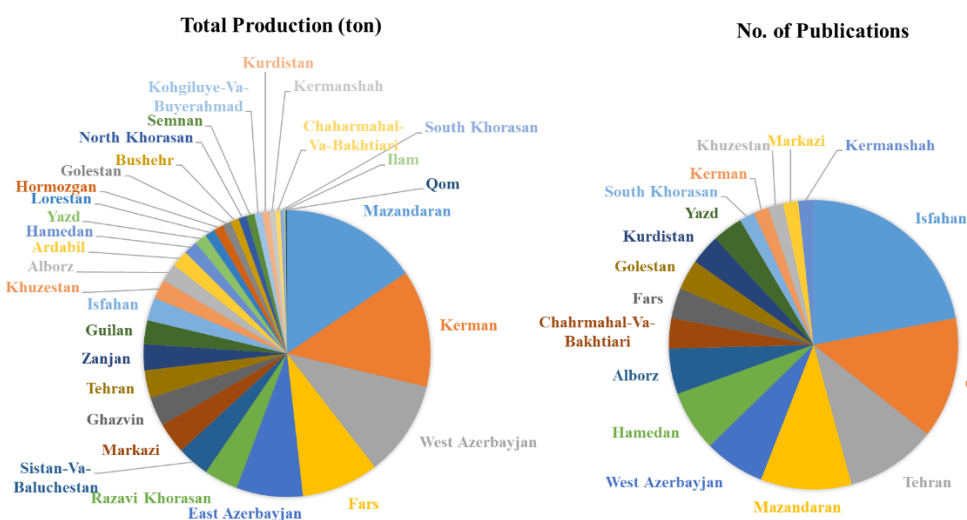
تحلیل انتشارات زیست‌محیطی سامانه‌های تولیدی

موضوع کاهش انتشارات زیست‌محیطی به‌تدریج از سال ۲۰۱۳ وارد مقالات این حوزه شد. برخی محققان تأثیر بهینه‌سازی مصرف انرژی بر میزان کاهش انتشار دی‌اکسید کربن را در تولید خیار به روش گلخانه‌ای مورد مطالعه قرار دادند (Khoshnevisan et al., 2013a). در این گروه از مطالعات، میزان پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)^۱ تولید محصول مورد مطالعه برای همه نهاده‌های تولیدی گزارش شده است. واحد مورد استفاده در GWP برای نهاده‌های مورد بررسی، معادل کیلوگرم دی‌اکسید کربن در هکتار است. برخی مقالات، نظام‌های بهره‌برداری مختلف را از نظر میزان GWP مورد

جدول ۶- سهم نهاده‌ها در انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان انتشارات در محصولات باغی و گلخانه‌ای

Table 6- The share of inputs in greenhouse gas emissions and the amount of emissions in horticultural and greenhouse products

محصول Crop	گازهای گلخانه‌ای GHG		نرخ نهاده‌ها در کل گازهای گلخانه‌ای % Inputs ratio in total GHG %								منبع Ref.
	بر اساس زمین kgCO ₂ /ha (land base)	بر اساس جرم kgCO ₂ /t (mass base)	نیروی انسانی Human	کود دامی Manure	ماشین Machinery	سوخت Fuel	الکتریسیته Electricity	آب Water	سموم شیمیایی Chemicals	کود Fertilizer	
بادام Almond	4047.43	-	-	-	6.4	79.99	4.41	-	1.71	7.49	(Salehi <i>et al.</i> , 2016)
سیب Apple	1195.79	-	-	-	17	38	4	-	31	10	(Taghavifar and Mardani, 2015)
خیار Cucumber	46835.45	244.93	-	14	2.22	56.91	28.93	-	2.79	3.46	(Bolandnazar <i>et al.</i> , 2014; Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2013a; Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2014; Pishgar-Komleh <i>et al.</i> , 2013)
انگور Grape	858.62	-	-	-	0	13	42	-	2	43	(Mardani and Taghavifar, 2016)
کیوی Kiwifruit	2914.49	152.18	-	0.31	9.20	12.32	8.66	-	0.57	19.49	(Nabavi-Pelesaraei <i>et al.</i> , 2016; Nikkha <i>et al.</i> , 2015; Nikkha <i>et al.</i> , 2016)
پرتقال Orange	801	-	-	-	0.20	0.32	0.04	-	0.02	0.38	(Nabavi-Pelesaraei <i>et al.</i> , 2014)
فلفل دلمه‌ای Bell Pepper	14390850	-	-	-	0.2	84.7	14.4	-	-	0.7	(Yousefi, 2013)
انار Pomegranate	6513.98	-	12.24	5.59	0.57	6.76	-	2.76	66.24	7.13	(Houshyar <i>et al.</i> , 2017)
توت‌فرنگی Strawberry	17943.45	640	-	-	5.1	25.3	31.85	-	12.55	25.2	(Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2014b; c; Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2014d)
گوجه‌فرنگی Tomato	24958.79	-	-	-	2.81	31.83	8.78	-	0.58	6.32	(Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2014e; Khoshnevisan <i>et al.</i> , 2015; Taki <i>et al.</i> , 2013)



شکل ۱۱- مقایسه وضعیت تولید محصولات باغی و تعداد مقالات منتشرشده برحسب استان

Fig.11. Comparison of horticultural production status and number of publications by province

بررسی روش تحلیل سامانه

چنانچه کشاورزی را یک سامانه^۱ فرض کنیم، برای بهبود این سامانه اقدامات و مراحل متعددی باید انجام شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است برای بهبود یک سامانه نیاز به یک چرخه اصلاحی وجود دارد. جمع‌آوری داده‌های مربوط به چگونگی و میزان مصرف نهاده‌ها در تولید یک محصول، مرحله اول چرخه تحلیل سامانه محسوب می‌شود که در آن رفتار سامانه مورد شناسایی قرار می‌گیرد. در هر چرخه تحلیل سامانه، یک مشکل بر اساس اولویت اهمیت مشکلات موجود انتخاب می‌شود و اقدامات بهبوددهنده برای آن مشکل تا حصول نتیجه دنبال می‌شود. پس از شناسایی الگوی مصرف نهاده‌ها و محاسبه شاخص‌های انرژی برخی از مقالات با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها، واحدهای تولیدی را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. این اقدام منجر به شناسایی مشکلات احتمالی در الگوی مصرف نهاده‌ها می‌شود. اما معمولاً مطالعات در این نقطه به پایان می‌رسد و صرفاً برخی توصیه‌های کلی که اکثراً حاصل از انجام مطالعات مشخص نیست به کشاورزان توصیه می‌شود. این‌گونه توصیه‌ها معمولاً توسط کشاورزان قابل اجرا نیست، زیرا معمولاً حالت کلی داشته و بدون در نظر گرفتن شرایط خاص کشاورزان مطرح می‌شود. نیازی که در این حوزه مطالعاتی بسیار محسوس است پرداختن به رفع مشکلات مربوط به الگوی مصرف نهاده توسط واحدهای تولیدی است. بهتر است پس از شناسایی گلوگاه‌ها، علل بروز مشکلات شناسایی شده و برای رفع آن‌ها راه‌حل‌هایی پیشنهاد شود. پس از بررسی راه‌حل‌های ممکن برای رفع یک مشکل در الگوی مصرف انرژی، نتایج هر یک از راه‌حل‌ها بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد و بهترین راه‌حل انتخاب شود. راه‌حل‌هایی که برای اصلاح الگوی مصرف نهاده در فرآیند تولید محصولات کشاورزی مطرح می‌شود معمولاً مربوط به روش یا فناوری مورد استفاده در به‌کارگیری نهاده‌هاست. بنابراین روش جدید باید توسط محققین در تعدادی از باغ‌ها یا گلخانه‌ها به‌کار گرفته شود و نتایج آن با روش قبلی مورد استفاده کشاورزان مقایسه شود. روش جدید پس از استفاده مورد ارزیابی مجدد قرار می‌گیرد و در صورت نیاز تغییرات لازم در آن اعمال می‌شود. پس از استقرار موفق روش جدید، سامانه مورد مطالعه دوباره باید ارزیابی شود و مشکلات آن شناسایی شود. سپس همانند چرخه قبلی، مشکلی که در رده دوم اهمیت قرار دارد مورد توجه قرار گرفته و اقدامات اصلاحی آن دنبال می‌شود. بنابراین می‌توان این‌گونه جمع‌بندی کرد که تحقیقات مربوط به الگوی مصرف انرژی نباید به‌صورت ایستا باشد. در وضعیت کنونی در یک مقطع زمانی،

انتخاب نوع محصول و محل انجام مطالعات در این حوزه بهتر است بر اساس اهمیت محصول و استان باشد تا بتواند اثربخشی مناسبی در بخش کشاورزی داشته باشد. به‌عنوان مثال استان کرمان اهمیت بسیار زیادی در تولید محصولات باغی دارد اما تعداد مطالعات انجام‌شده در آن بسیار کم است. شکل ۱۱ میزان تولید محصول و تعداد مقالات منتشرشده در هر استان در بازه سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۸ را نشان می‌دهد.

در اکثر مقالات بررسی‌شده، یک محصول در هر مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. اما در این میان تعداد اندکی از مقالات نیز وجود دارد

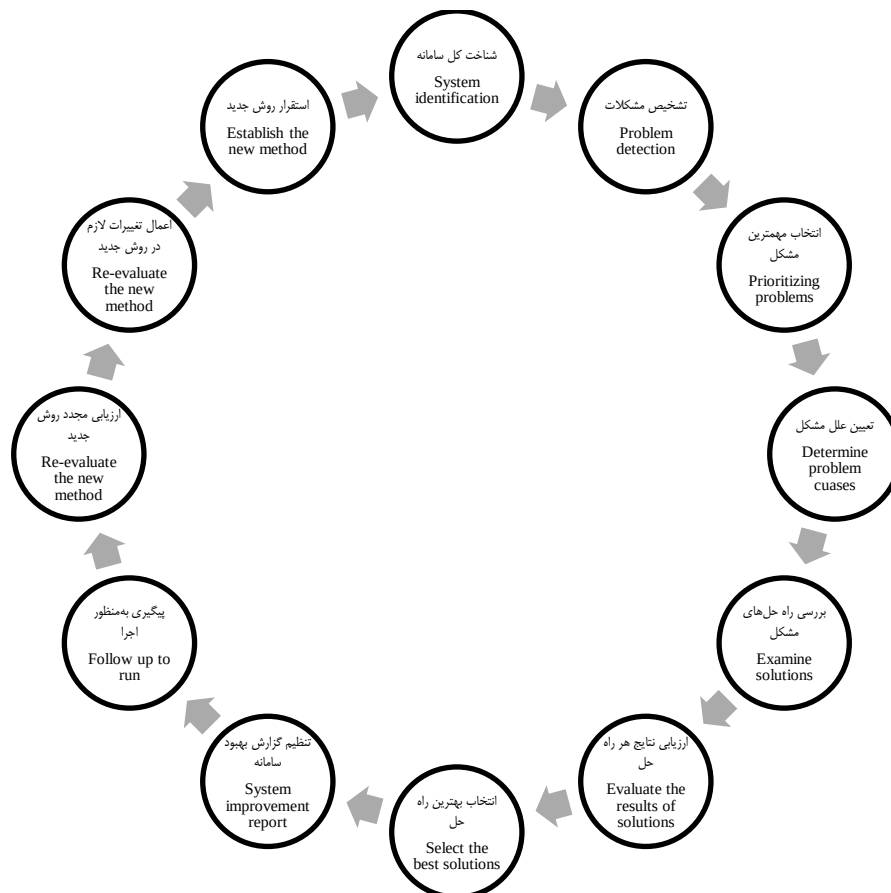
که در مطالعه خود بیش از یک محصول را مورد بررسی قرار داده‌اند (Namdari et al., 2011b).

بررسی روش‌های جمع‌آوری داده

در اغلب مطالعات انجام‌شده، مشخصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و روش جمع‌آوری داده‌ها، که در اکثر قریب به اتفاق مطالعات روش پرسشنامه است، معرفی شده است. اما مشخصات بهره‌برداران و سامانه‌های تولیدی حاکم بر مناطق مورد مطالعه کمتر مورد توجه محققان بوده است. از آنجایی که الگوی مصرف انرژی در بخش کشاورزی تا حد قابل‌توجهی تابع رفتار بهره‌برداران و مشخصات سامانه‌ها و روش‌های تولید محصول است، به‌نظر می‌رسد توجه به این عوامل برای آماده‌سازی و طراحی هرگونه بهبود فرآیند در یک سامانه تولیدی ضروری است. این موضوع با توجه به وجود تنوع بسیار زیاد بین مشخصات سامانه‌های بهره‌برداری در یک محصول واحد، از حساسیت بیشتری برخوردار است. بنابراین به نظر می‌رسد نیاز است محققان در مطالعات آتی توجه کافی به این موضوع داشته باشند تا امکان اثربخشی مطالعات این حوزه افزایش یابد. در این‌گونه مطالعات، معمولاً با استفاده از پرسشنامه، انواع نهاده‌های مورد استفاده در فرآیند تولید محصول مورد مطالعه ذکر شده و از طریق مراجعه و استفاده از روش مصاحبه رودررو مقدار نهاده مصرف‌شده توسط بهره‌بردار مورد پرسش قرار می‌گیرد. بهره‌برداران نیز اکثراً با توجه به سوابق ذهنی خود مقدار نهاده مصرفی را اعلام می‌کنند. اکثراً به دلیل عدم وجود داده‌های ثبت‌شده، میزان صحت داده‌های جمع‌آوری‌شده خالی از ابهام نیست. شایسته است محققان حداقل در مواردی که امکان اندازه‌گیری میدانی وجود دارد، برای بخشی از نمونه‌های مورد بررسی میزان مصرف نهاده را شخصاً اندازه‌گیری نمایند تا از صحت داده‌های جمع‌آوری‌شده از طریق پرسشنامه اطمینان کافی به عمل آید.

الگوی مصرف، تأثیر این مداخلات در سال‌های بعد مورد ارزیابی قرار گیرد. روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک چندهدفه می‌تواند برای تدوین راهکارهای بهبود الگوی مصرف نهاده به‌خوبی مورد استفاده قرار گیرد.

الگوی مصرف نهاده‌ها توسط محقق جمع‌آوری می‌شود و همین‌الگو با استفاده از ضرایب هم‌ارز انرژی و هزینه و زیست‌محیطی گزارش می‌شود. درحالی‌که برای اثربخش بودن، این‌گونه مطالعات بهتر است به‌صورت پویا و حداقل دو یا چندساله انجام شود. در سال اول الگوی مصرف نهاده استخراج شود و پس از انجام مداخلات اصلاح‌کننده



شکل ۱۲- چرخه تحلیل سامانه
Fig.12. System analysis cycle

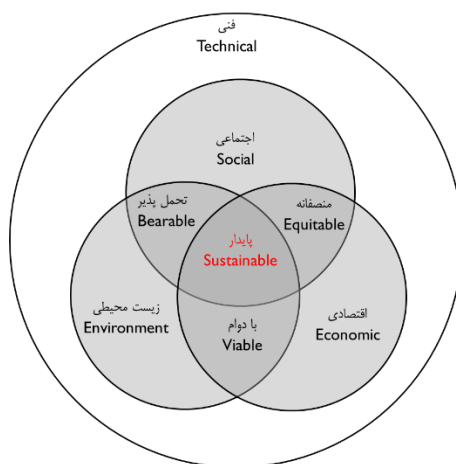
فرضیه‌سازی درباره علل بروز مشکلات در سامانه‌های باغی و گلخانه‌ای موضوعی است که در تحقیقات به‌طور جدی مدنظر محققان قرار نگرفته است. تعریف فرضیات ممکن درباره علل وجود مشکلات احتمالی در سامانه‌ها می‌تواند به محققان کمک کند تا با آزمون این فرضیات و اثبات علل بروز مشکلات، به رفع آن‌ها بپردازند. علاوه بر عوامل فنی حاکم بر سامانه‌ها، عوامل اجتماعی و بعضاً اقتصادی در تصمیمات کشاورزان در تمام طول زنجیره تأمین محصولات اثرگذار است که بهتر است مورد مطالعه قرار گیرد (شکل ۱۳). علاوه بر این مرز سامانه‌های مورد بررسی در اکثر تحقیقات انجام‌شده، به‌غیر از تعدادی از مطالعات زیست‌محیطی، بسیار محدود است. بهبود الگوی مصرف نهاده ممکن است تا حدی بر وضعیت

بررسی ابعاد تحلیل سامانه

با بررسی مقالات منتشرشده مشخص شد که محققان الگوی مصرف نهاده در باغ‌ها و گلخانه‌های محصولات مختلف را از نظر انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد تحلیل قرار داده‌اند. بدون شک دستیابی به کشاورزی پایدار مهم‌ترین هدف تحقیق در این حوزه است. اما موضوع مهمی که مغفول مانده است بعد اجتماعی سامانه‌های باغی و گلخانه‌ای است. همچنین ابعاد فنی نیز همانند بعد اجتماعی در بسیاری از تحقیقات مغفول مانده است. بسیاری از اشکالات موجود در الگوی مصرف نهاده که توسط محققان گزارش شده است معلول مسائل فنی، فناوری و اجتماعی است.

محصول توسط مصرف‌کننده (چند مقیاسه) می‌تواند اثرات سازنده‌ای در بهبود وضعیت تولید محصولات و حرکت به سمت توسعه پایدار داشته باشد.

کشاورزی اثرگذار باشد اما چنانچه هدف نیل به کشاورزی پایدار مدنظر باشد باید مرز تحلیل سامانه به کل زنجیره تأمین محصولات گسترده شود. افزایش مرز تحلیل سامانه‌ها از تأمین نهاده تا مصرف



شکل ۱۳- ابعاد تحلیل سامانه‌ها
Fig.13. Systems analysis aspects

سپس برای بهبود وضعیت شاخص‌ها، فرضیه‌سازی می‌شود تا علل احتمالی بروز مشکلات در سامانه مشخص شود. سپس برای رفع این عارضه‌ها، طراحی‌های جدید در سامانه انجام می‌شود. این طراحی‌های جدید می‌تواند منشأ تحولاتی در زمینه کار و درآمد کشاورزان، تقاضا برای تولیدات کشاورزی و غذا، مکان تولید، منابع انرژی، کمیت و تنوع و کیفیت نهاده‌های کشاورزی و به‌طور کلی فناوری‌های مورد استفاده در تولید باشد. در اجرای این تغییرات، ممکن است تنش‌هایی بین اقتصاد و محیط‌زیست، بهره‌برداران کشاورزی و دولت، و همچنین بین زنجیره‌های تولید رخ دهد. محققان باید راهکارهای مناسبی برای کاهش این تنش‌ها طراحی کنند تا تأثیر اقدامات اصلاحی در سامانه تحت‌الشعاع این تنش‌ها قرار نگیرند. پس از اجرای تغییرات پیشنهادشده، عملکرد سامانه مجدداً از نظر شاخص‌های فنی، انرژی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورت نیاز به اصلاح مجدد برخی اقدامات انجام‌شده، تغییرات جدیدی اعمال می‌شود تا اثربخشی اقدامات افزایش یابد. این چرخه به‌صورت مستمر انجام می‌شود تا اثربخشی اقدامات در عمل در سامانه تثبیت شود.

هرگونه تحلیل و مدل‌سازی سامانه‌های کشاورزی باید از حالت تک معیاره به چندمعیاره تغییر یابد. مطالعات و نمونه‌برداری‌ها نیز از حالت ایستا و مقطعی به حالت پویا و مداوم باید تغییر کنند. مرز مطالعات نیز از حالتی که فقط در مقیاس مزرعه انجام می‌شود به حالت چند مقیاسه تغییر یابد. به این ترتیب که مطالعه در سطح منطقه و ملی در مورد یک محصول انجام شود.

الزامات رویه جدید در مطالعات سامانه‌های کشاورزی

بررسی چالش‌های موجود در مطالعات پیشین، ضرورت ایجاد و به‌کارگیری رویه‌های جدید در تحلیل و مدل‌سازی سامانه‌های کشاورزی را بیش از پیش نشان داد. لذا در این بخش الزامات یک رویه جدید در تحقیقات این حوزه معرفی شده است (شکل ۱۴). تحلیل سامانه‌های کشاورزی باید به‌صورت یک چرخه شامل سه مرحله تحلیل، بازطراحی و ارزیابی باشد که به‌صورت مستمر در سامانه تکرار شود. برای تحلیل سامانه ابتدا شکاف عملکرد سامانه در وضعیت فعلی با وضعیت پایدار تحلیل می‌شود. سپس شاخص‌های پایداری تحلیل و مدل‌سازی می‌شود. برای تحلیل از شاخص‌های جامع که تمام ابعاد سامانه را در نظر بگیرند استفاده می‌شود. این شاخص‌ها می‌تواند حداقل شامل گروه‌های زیر باشد: نحوه مدیریت محصول، مشخصات مزرعه و کشاورز، مشخصات محیط‌زیست فیزیکی، شرایط کلان اقتصادی و اجتماعی، شاخص‌های انرژی، شاخص‌های زیست‌محیطی، شاخص‌های اقتصادی، شاخص‌های اجتماعی، شاخص‌های فنی و غیره. ترکیب همه شاخص‌های فوق درجه پایداری یک سامانه کشاورزی را مشخص می‌کند. پس از شناسایی وضعیت فعلی سامانه از نظر میزان پایداری، طراحی جدیدی برای سامانه انجام می‌شود. رویکردهای طراحی سامانه جدید باید از حالت طراحی‌های ضابطه‌مند به طراحی‌های نوآورانه تغییر یابد تا بتواند زمینه حرکت به سمت سامانه پایدار را امکان‌پذیر کند (Beza et al., 2017). در این مرحله طراحی گام‌به‌گام روش مناسبی محسوب می‌شود. در این روش سامانه موجود با توجه به شاخص‌های مورد بررسی عارضه‌یابی می‌شود.

مهم‌ترین هدف سامانه‌های کشاورزی امنیت غذایی است. دستیابی به امنیت غذایی صرفاً در مقیاس مزرعه محقق نمی‌شود و اهداف سایر ذینفعان سامانه‌های کشاورزی در سایر مقیاس‌ها مانند تأمین‌کنندگان، سازمان‌ها، شرکت‌ها، حاکمیت و شرکت‌های بین‌المللی نیز باید در هنگام طراحی تغییرات در سامانه‌ها مدنظر محققان قرار بگیرد.

محدودیت‌های تحلیل سامانه‌ها

داده‌برداری

نمونه‌برداری معمولاً سخت‌ترین و پرهزینه‌ترین بخش از انجام مطالعات سامانه‌های کشاورزی است. در این مرحله، محدودیت‌هایی وجود دارد که نیاز به اهتمام بیشتر محققان این حوزه دارد. موضوع اول انجام پیش‌آزمون و محاسبه واریانس جامعه از طریق نمونه‌برداری اولیه است که بسیار مهم است و بعضاً در برخی از موارد رعایت نمی‌شود. به دلیل بزرگی جوامع آماری بهره‌برداران بخش کشاورزی و تنوع مشخصات سامانه‌های تولیدی، تعداد نمونه موردنیاز بسیار زیاد است. با بررسی مطالعات این حوزه مشخص شد که در برخی موارد تعداد نمونه موردنیاز توسط برخی محققان جمع‌آوری نمی‌شود. از آنجایی که معمولاً از روش مصاحبه و تکمیل پرسشنامه برای جمع‌آوری میزان مصرف نهاده توسط بهره‌برداران استفاده می‌شود، صحت داده‌های به‌دست‌آمده معمولاً از دقت کافی برخوردار نیست. از این رو به نظر می‌رسد بهتر است در تعدادی از موارد، محققان اقدام به اندازه‌گیری میزان مصرف نهاده‌ها نمایند تا انحراف در نتایج به حداقل برسد.

چرخه تحلیل سامانه

اطلاع از وضعیت شاخص‌های انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌تنهایی برای اصلاح وضعیت سامانه‌های تولید محصولات کشاورزی کافی نیست. انجام اقدامات اصلاحی در سامانه‌های مورد بررسی و مطالعه اثرات این مداخلات گام بسیار مهمی است که در مطالعات این حوزه دیده نمی‌شود. از این رو یکی از محدودیت‌های بسیار محسوس در مطالعه سامانه‌های کشاورزی استفاده از چرخه تحلیل سامانه است که می‌تواند مطالعات را از حالت یک گزارش محدود، به تحقیقات اثربخش و مؤثر تبدیل کند. بهتر است داده‌برداری از حالت ایستا به حالت پویا تغییر پیدا کند و اثر مداخلات در بازه‌های چندساله مورد مطالعه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

مطالعه سامانه‌های کشاورزی چند سالی است موضوع پژوهش

تعدادی از محققین رشته مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی در ایران است. در طول بیش از یک دهه، فعالیت‌های دامنه‌داری در این حوزه صورت گرفته است. در پژوهش حاضر روند شکل‌گیری و تکامل این مطالعات در حوزه محصولات باغی و گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. به نظر می‌رسد تحلیل سامانه‌های تولیدی بخش کشاورزی هنوز به بلوغ نرسیده است. تجزیه و تحلیل یک سامانه برای آن که بتواند اثربخشی محسوسی در آن سامانه داشته باشد از چندین مرحله تشکیل می‌شود. پس از بررسی مطالعات انجام‌شده، مشخص شد که این‌گونه مطالعات هنوز در ابتدای مسیر است و نیاز به انجام اقدامات تکمیلی دارد. تجزیه و تحلیل یک سامانه به‌صورت یک چرخه طراحی و اجرا می‌شود تا اشکالات موجود در سامانه را پس از شناسایی و اولویت‌بندی با طراحی و اتخاذ اقدامات اصلاحی، به‌تدریج رفع کند. سپس در این چرخه، اثرات اقدامات اصلاحی موردسنجش قرار می‌گیرد تا گام‌های بعدی را میسر کند. بنابراین بهبود سامانه‌های تولیدی بخش کشاورزی درواقع باید به‌صورت مستمر و در قالب یک چرخه بهبوددهنده اجرایی شود. اکثر مطالعات انجام‌شده صرفاً به گزارش وضعیت فعلی سامانه‌های تولیدی پرداخته‌اند. الگوی مصرف انرژی، وضعیت شاخص‌های اقتصادی و میزان انتشارات زیست‌محیطی در این‌گونه مطالعات موردتوجه محققان بوده است. موضوع بسیار مهمی که معمولاً از چشم محققان این حوزه به دور مانده است، فرضیه‌سازی و بررسی علل بروز رفتار سامانه تولیدی به‌صورت یک الگوی مصرف انرژی یا جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی آن است. به نظر می‌رسد ورود روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور مطالعه عوامل مؤثر در وضعیت سامانه‌های تولیدی می‌تواند به اثربخشی این‌گونه مطالعات کمک کند. انجام مطالعات به‌صورت پویا نیز پیشنهاد دیگری است که می‌تواند رفتار سامانه‌های تولیدی را بهتر نشان دهد. مطالعات انجام‌شده معمولاً به‌صورت ایستا و در یک مقطع زمانی خاص انجام‌شده است که قاعده‌تاً نمی‌تواند معرف خوبی از ویژگی‌های یک سامانه تولیدی باشد. همچنین تأثیر مداخلات پیشنهادشده بهتر است به‌صورت عملی در سال‌های متوالی مورد مطالعه قرار گیرد. علاوه بر این، موضوع حجم و روش نمونه‌برداری و جمع‌آوری داده‌های عملکردی سامانه‌های تولیدی محل اشکال است، زیرا در اکثر پژوهش‌های بررسی‌شده، استانداردهای نمونه‌برداری رعایت نشده است. برای بهبود سامانه‌های مورد مطالعه از نظر الگوی انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی، نیاز به اقدامات اصلاحی وجود دارد که در اغلب پژوهش‌ها مغفول مانده است. در مطالعاتی که با روش تحلیل پوششی داده‌ها انجام‌شده است، اطلاعات ارزشمندی تولیدشده است که میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی نهاده‌ها را متذکر می‌شود. اما روش

اجتماعی در سامانه‌های تولیدی است. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که این بخش در تحلیل سامانه‌های کشاورزی نادیده گرفته شده است. به دلیل وجود تعداد زیاد بهره‌برداران و تأثیری که ویژگی‌های اجتماعی آنان در الگوی مصرف انرژی دارد، نیاز است این عوامل نیز در تحلیل سامانه‌های کشاورزی مدنظر محققان قرار گیرد.

صرفه‌جویی از نظر اجرایی در این مطالعات مورد اشاره قرار نگرفته است که بهتر است در پژوهش‌های آتی به صورت کاربست اجرایی به کشاورزان پیشنهاد شود. مطمئناً هدف نهایی همه تولیدکنندگان، سیاست‌گذاران، فعالان و محققان این حوزه، دستیابی به توسعه پایدار در بخش کشاورزی است. بخش مهمی از پایداری، توجه به عوامل

References

1. Anonymous. 2017. The results of the survey of the country's horticulture. Tehran: Statistics Center of Iran. Report no.
2. Asakereh, A., M. J. Shiekhdavoodi, M. Almassi, and M. Sami. 2010. Effects of mechanization on energy requirements for apple production in Esfahan province, Iran. *African Journal of Agricultural Research* 5: 1424-1429.
3. Banaeian, N., and M. Zangeneh. 2011a. Estimating production function of walnut production in Iran using cobb-douglas method. *Agricultura Tropica Et Subtropica* 44: 177-189.
4. Banaeian, N., and M. Zangeneh. 2011b. Modeling energy flow and economic analysis for walnut production in Iran. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 3: 194-201.
5. Banaeian, N., M. Zangeneh, and M. Omid. 2010. Energy use efficiency for walnut producers using Data Envelopment Analysis (DEA). *Australian Journal of Crop Science* 4: 359-362.
6. Banaeian, N., M. Omid, and H. Ahmadi. 2011. Energy and economic analysis of greenhouse strawberry production in Tehran province of Iran. *Energy Conversion and Management* 52: 1020-1025. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.030>
7. Banaeian, N., M. Zangeneh, and S. Clark. 2020. Trends and Future Directions in Crop Energy Analyses: A Focus on Iran. *Sustainability* 12: 10002. <https://doi.org/10.3390/su122310002>
8. Beza, E., J. V. Silva, L. Kooistra, and P. Reidsma. 2017. Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *European Journal of Agronomy* 82: 206-222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.016>
9. Bolandnazar, E., A. Keyhani, and M. Omid. 2014. Determination of efficient and inefficient greenhouse cucumber producers using Data Envelopment Analysis approach, a case study: Jiroft city in Iran. *Journal of Cleaner Production* 79: 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.027>
10. Cochrane. 2021. Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 6.2 (updated February 2021).
11. Farashah, H. R., S. A. Tabatabaeifar, A. Rajabipour, and P. Sefeedpari. 2013. Energy Efficiency Analysis of White Button Mushroom Producers in Alburz Province of Iran: A Data Envelopment Analysis Approach. *Open Journal of Energy Efficiency* 2: 65-74. DOI: [10.4236/ojee.2013.22010](https://doi.org/10.4236/ojee.2013.22010)
12. Ghatrehsamani, S., R. Ebrahimi, S. N. Kazi, A. Badarudin Badry, and E. Sadeghinezhad. 2016. Optimization model of peach production relevant to input energies- Yield function in Chaharmahal va Bakhtiari province, Iran. *Energy* 99: 315-321. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.078>
13. Houshyar, E., M. Mahmoodi-Eshkaftaki, and H. Azadi. 2017. Impacts of technological change on energy use efficiency and GHG mitigation of pomegranate: Application of dynamic data envelopment analysis models. *Journal of Cleaner Production* 162: 1180-1191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.152>
14. Karimi, M., and H. Moghaddam. 2018. On-farm energy flow in grape orchards. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 17 (2): 191-194. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.04.002>
15. Khoshnevisan, B., S. Rafiee, M. Omid, and H. Mousazadeh. 2013a. Reduction of CO₂ emission by improving energy use efficiency of greenhouse cucumber production using DEA approach. *Energy* 55: 676-682. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.021>
16. Khoshnevisan, B., S. Rafiee, M. Omid, M. Yousefi, and M. Movahedi. 2013b. Modeling of energy consumption and GHG (greenhouse gas) emissions in wheat production in Esfahan province of Iran using artificial neural networks. *Energy* 52: 333-338. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.028>
17. Khoshnevisan, B., S. Rafiee, and H. Mousazadeh. 2014a. Application of multi-layer adaptive neuro-fuzzy inference system for estimation of greenhouse strawberry yield. *Measurement* 47: 903-910. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.10.018>
18. Khoshnevisan, B., S. Rafiee, and H. Mousazadeh. 2014b. Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production. *European Journal of Agronomy* 50: 29-37.

- <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.003>
19. Khoshnevisan, B., S. Rafiee, and H. Mousazadeh. 2014c. Application of multi-layer adaptive neuro-fuzzy inference system for estimation of greenhouse strawberry yield. *Measurement* 47: 903-910. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.10.018>
 20. Khoshnevisan, B., H. M. Shariati, S. Rafiee, and H. Mousazadeh. 2014d. Comparison of energy consumption and GHG emissions of open field and greenhouse strawberry production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29: 316-324. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.098>
 21. Khoshnevisan, B., S. Rafiee, M. Omid, H. Mousazadeh, and S. Clark. 2014e. Environmental impact assessment of tomato and cucumber cultivation in greenhouses using life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Cleaner Production* 73: 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.057>
 22. Khoshnevisan, B., S. Rafiee, J. Iqbal, S. Shamshirband, M. Omid, N. B. Anuar, and A. W. Abdul Wahab. 2015. A comparative study between artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems for modeling energy consumption in greenhouse tomato production: A case study in isfahan province. *Journal of Agricultural Science and Technology* 17 (1): 49-62.
 23. Khoshroo, A., R. Mulwa, A. Emrouznejad, and B. Arabi. 2013. A non-parametric Data Envelopment Analysis approach for improving energy efficiency of grape production. *Energy* 63: 189-194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.021>
 24. Loghmanpour Zarini, R., H. Yaghoubi, and A. Akram. 2013. Energy use in citrus production of mazandaran province in iran. *African Crop Science Journal* 21: 61-65.
 25. M. Yousefi, M. O., Sh. Rafiee, and B. Khoshnevisan. 2013. Modeling GHG emission and energy consumption in selected greenhouses in Iran. *Energy and environment* 4: 511-518.
 26. Mahmoudi, N., M. Almassi, A. M. Borghei, M. Ghahderijani, and M. R. Asadi Asad Abad. 2012. Estimation of energy consumption indicators in pistachio production of Khatam cityYazd state. *Advances in Environmental Biology* 6: 1740-1744.
 27. Mardani, A., and H. Taghavifar. 2016. An overview on energy inputs and environmental emissions of grape production in West Azerbaijan of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 918-924. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.073>
 28. Mohammadi, A., and M. Omid. 2010. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied Energy* 87: 191-196. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.021>
 29. Mohammadi, A., S. Rafiee, S. S. Mohtasebi, and H. Rafiee. 2010. Energy inputs – yield relationship and cost analysis of kiwifruit production in Iran. *Renewable Energy* 35: 1071-1075. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.004>
 30. Mohammadshirazi, A., A. Akram, S. Rafiee, S. H. Mousavi Avval and E. Bagheri Kalhor. 2012. An analysis of energy use and relation between energy inputs and yield in tangerine production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 4515-4521. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.047>
 31. Moher, D., A. Liberati, J. Tetzlaff, and D. G. Altman. 2009. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Annals of Internal Medicine* 151: 264-269. [doi: https://doi.org/10.1136/bmj.b2535](https://doi.org/10.1136/bmj.b2535)
 32. Mohseni, P., A. M. Borgheei, and M. Khanali. 2019. Energy Consumption Analysis and Environmental Impact Assessment of Grape Production in Hazavah Region of Arak City. *Journal of Agricultural Machinery* 9: 177-193. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v9i1.67645>
 33. Mousavi-Avval, S. H., A. Mohammadi, S. Rafiee, and A. Tabatabaefar. 2012. Assessing the technical efficiency of energy use in different barberry production systems. *Journal of Cleaner Production* 27: 126-132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.014>
 34. Munn, Z., M. D. J. Peters, C. Stern, C. Tufanaru, A. McArthur, and E. Aromataris. 2018. Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC Medical Research Methodology* 18: 143.
 35. Nabavi-Pelesaraei, A., R. Abdi, S. Rafiee, and H. G. Mobtaker. 2014. Optimization of energy required and greenhouse gas emissions analysis for orange producers using data envelopment analysis approach. *Journal of Cleaner Production* 65: 311-317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.019>
 36. Nabavi-Pelesaraei, A., S. Rafiee, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, and S. Shamshirband. 2016. Modeling energy consumption and greenhouse gas emissions for kiwifruit production using artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production* 133: 924-931. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.188>
 37. Namdari, M., A. Asadi Kangarshahi, and N. Akhlaghi Amiri. 2011a. Econometric Model Estimation and Sensitivity Analysis of Input for mandarin Production in Mazandaran Province of Iran. *Research Journal of*

- Applied Sciences, Engineering and Technology 3: 464-470.
38. Namdari, M., A. Asadi Kangarshahi, and N. Akhlaghi Amiri. 2011b. Input-output energy analysis of citrus production in Mazandaran province of Iran. *African Journal of Agricultural Research* 6: 2558-2564.
39. Nikkhah, A., B. Emadi, and S. Firouzi. 2015. Greenhouse gas emissions footprint of agricultural production in Guilan province of Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 12: 10-14.
40. Nikkhah, A., M. Royan, M. Khojastehpour, and J. Bacenetti. 2017. Environmental impacts modeling of Iranian peach production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75: 677-682. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.041>
41. Nikkhah, A., B. Emadi, H. Soltanali, S. Firouzi, K. A. Rosentrater, and M. S. Allahyari. 2016. Integration of life cycle assessment and Cobb-Douglas modeling for the environmental assessment of kiwifruit in Iran. *Journal of Cleaner Production* 137: 843-849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.151>
42. Pahlavan, R., M. Omid, and A. Akram. 2011. Energy use efficiency in greenhouse tomato production in Iran. *Energy* 36: 6714-6719. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.038>
43. Pahlavan, R., M. Omid, and A. Akram. 2012a. The Relationship between Energy Inputs and Crop Yield in Greenhouse Basil Production. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14: 1243-1253.
44. Pahlavan, R., M. Omid, and A. Akram. 2012b. Application of Data Envelopment Analysis for Performance Assessment and Energy Efficiency Improvement Opportunities in Greenhouses Cucumber Production. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14: 1465-1475.
45. Pahlavan, R., M. Omid, and A. Akram. 2012c. Energy input-output analysis and application of artificial neural networks for predicting greenhouse basil production. *Energy* 37: 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.055>
46. Pahlavan, R., M. Omid, S. Rafiee, and S. H. Mousavi-Avval. 2012d. Optimization of energy consumption for rose production in Iran. *Energy for Sustainable Development* 16: 236-241. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.12.001>
47. Pishgar-Komleh, S. H., M. Omid, and M. D. Heidari. 2013. On the study of energy use and GHG (greenhouse gas) emissions in greenhouse cucumber production in Yazd province. *Energy* 59: 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.037>
48. Rafiee, S., S. H. Mousavi Avval, and A. Mohammadi. 2010. Modeling and sensitivity analysis of energy inputs for apple production in Iran. *Energy* 35: 3301-3306. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.015>
49. Rajabi Hamedani, S., A. Keyhani, and R. Alimardani. 2011. Energy use patterns and econometric models of grape production in Hamadan province of Iran. *Energy* 36: 6345-6351. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.041>
50. Royan, M., M. Khojastehpour, B. Emadi, and H. G. Mobtaker. 2012. Investigation of energy inputs for peach production using sensitivity analysis in Iran. *Energy Conversion and Management* 64: 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.002>
51. Salami, P., H. Ahmadi, and A. Keyhani. 2010. Energy use and economic analysis of strawberry production in Sanandaj zone of Iran. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment* 14: 653-658.
52. Salehi, M., R. Ebrahimi, A. Maleki, and H. Ghasemi Mobtaker. 2014. An assessment of energy modeling and input costs for greenhouse button mushroom production in Iran. *Journal of Cleaner Production* 64: 377-383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.005>
53. Salehi, M., A. Maleki, H. G. Mobtaker, S. Rostami, and H. Shakeri. 2016. Investigation of energy inputs and CO₂ emission for almond production using sensitivity analysis in Iran. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 18: 158-166.
54. Shabani, Z., S. Rafiee, H. Mobli, and E. Khanalipur. 2012. Optimization in energy consumption of carnation production using data envelopment analysis (DEA). *Energy Systems* 3: 325-339.
55. Shabanzadeh, M., R. Esfanjari Kenari, and A. Rezaei. 2017. Investigating the energy pattern of tomato production in khorasan razavi province. *Journal of Agricultural Machinery* 6: 524-536. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jam.v6i2.37724>
56. Soltanali, H., A. Nikkhah, and A. Rohani. 2017. Energy audit of Iranian kiwifruit production using intelligent systems. *Energy* 139: 646-654. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.010>
57. Tabatabaie, S. M. H., S. Rafiee, and A. Keyhani. 2012. Energy consumption flow and econometric models of two plum cultivars productions in Tehran province of Iran. *Energy* 44: 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.036>
58. Tabatabaie, S. M. H., S. Rafiee, A. Keyhani, and A. Ebrahimi. 2013a. Energy and economic assessment of prune production in Tehran province of Iran. *Journal of Cleaner Production* 39: 280-284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.052>
59. Tabatabaie, S. M. H., S. Rafiee, A. Keyhani, and M. D. Heidari. 2013b. Energy use pattern and sensitivity analysis of energy inputs and input costs for pear production in Iran. *Renewable Energy* 51: 7-12.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.077>

60. Taghavifar, H., and A. Mardani. 2015. Prognostication of energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions analysis of apple production in West Azarbayjan of Iran using Artificial Neural Network. *Journal of Cleaner Production* 87: 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.054>
61. Taki, M., R. Abdi, M. Akbarpour, and H. G. Mobtaker. 2013. Energy inputs - Yield relationship and sensitivity analysis for tomato greenhouse production in Iran. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15: 59-67.
62. Yousefi, M., F. Darijani, and A. Alipour Jahangiri. 2012. Comparing energy flow of greenhouse and open-field cucumber production systems in Iran. *African Journal of Agricultural Research* 7: 624-628.

Contents

Research Articles

Fabrication and Evaluation of Cellulose Containers from Rice Straw with Natural Coatings	253
M. Khoshdel, S. J. Hashemi, S. M. Zabih Zadeh, R. Esmailzadeh Kenari	
Evaluation of Different Methods of Sugarcane Hilling Up in Two Soil Textures and Three Forward Speeds	265
N. Monjezi, M. Soleymani	
Experimental Evaluation of Heat Transfer of MF 285 Tractor Radiator, using Nano-fluid Al_2O_3 + Water	281
B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, B. Mohammadi Alasti	
Experimental and Numerical Study of the Moisture Loss Rate in Conditioned Alfalfa Stem using Computational Fluid Dynamics	301
M. Dana, P. Ahmadi Moghaddam	
Analysis of Energy of Diesel Engine using Diesel and Biodiesel Fuel Mixtures Containing Graphene Oxide Nanoparticles	319
M. Eshaghi Pireh, M. Gholami Par-Shokohi, D. Mohammad Zamani	
Investigating the Effect of Output Flow Regulator Plate on the Performance of Flour Cyclone: Experimental Studies and Numerical Simulations	331
E. Aghaei Badelbou, V. Rostampour, A. Rezvanivand fanaei, A. M. Nikbakht	
Effect of Gaseous Fuels and Coolant Temperature on Performance and Combustion Characteristics of a Low-Speed Single Cylinder Diesel Engine	351
B. Sabahi, H. Bahrami, M. J. Sheikhdavoodi, S. M. Safieddin Ardebili, E. Houshyar	
Economic Evaluation of using Different Tillage Methods and Crop Rotation in Rain-Fed Wheat Cultivation	367
S. M. Seyedan, A. Heidari	
Investigation of the Motive Steam Pressure Effect on Performance and Reverse Flows in Sugar Factory Thermo-compressor: Validation and Numerical Study	379
A. Rezvanivand fanaei, A. Hassanpour, A. M. Nikbakht	
Measurement and Analysis of Fruit Vibration on the Truck Bed during Transportation on Highways	399
A. Ramezani Boukat, H. Navid, M. J. Musevi Niya, S. Ranjbar	
Optimization of Biogas Production Efficiency from Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste under Thermal Pretreatment at Different Concentrations	409
S. M. Kamali, R. Abdi, A. Rohani, Sh. Abdollahpour, S. Ebrahimi	
Review Article	
Analysis and Evaluation of Energy, Economic, and Environmental Impact Indicators of Horticultural and Greenhouse Production Systems in Iran using PRISMA Method	423
M. Zangeneh, N. Banaeian	

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 12

No. 3

2022

Published by: Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran

Editor in charge: Prof. M. R. Modarres Razavi, Dept. of Mechanical Eng. Ferdowsi University of Mashhad

General Chief Editor: Prof. M. H. Abbaspour-Fard, Dept. of Biosystems Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Abbaspour-Fard, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Aboonajmi, M.	Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
Aghkhani, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Alimardani, R.	Professor, Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Emadi, B	Adjunct Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
Ghazanfari Moghaddam, A.	Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran
Kadkhodayan, M.	Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Khoshtaghaza, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran
Loghavi, M.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran
Modarres Razavi, M.	Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Nasirahmadi, A.	Department of Agricultural Engineering University of Kassel, Nordbahnhofstrasse, Witzenhausen, Germany
Pourreza, A	Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, United States of America
Raji, A	Professor, Department of Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Nigeria
Saiedirad, M. H.	Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Mashhad, Iran
Sayasoonthorn, S	Assistant Professor, Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. BOX: 91775-1163

Fax: +98-05138787430

E-Mail: jame@um.ac.ir

Web Site: <http://jame.um.ac.ir>

Contents

Research Articles

Fabrication and Evaluation of Cellulose Containers from Rice Straw with Natural Coatings 253
M. Khoshdel, S. J. Hashemi, S. M. Zabih Zadeh, R. Esmaeilzadeh Kenari

Evaluation of Different Methods of Sugarcane Hilling Up in Two Soil Textures and Three Forward Speeds 265

N. Monjezi, M. Soleymani

Experimental Evaluation of Heat Transfer of MF 285 Tractor Radiator, using Nano-fluid Al_2O_3 + Water..... 281

B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, B. Mohammadi Alasti

Experimental and Numerical Study of the Moisture Loss Rate in Conditioned Alfalfa Stem using Computational Fluid Dynamics 301

M. Dana, P. Ahmadi Moghaddam

Analysis of Energy of Diesel Engine using Diesel and Biodiesel Fuel Mixtures Containing Graphene Oxide Nanoparticles 319

M. Eshaghi Pirch, M. Gholami Par-Shokohi, D. Mohammad Zamani

Investigating the Effect of Output Flow Regulator Plate on the Performance of Flour Cyclone: Experimental Studies and Numerical Simulations 331

E. Aghaei Badelbou, V. Rostampour, A. Rezvanivand fanaei, A. M. Nikbakht

Effect of Gaseous Fuels and Coolant Temperature on Performance and Combustion Characteristics of a Low-Speed Single Cylinder Diesel Engine 351

B. Sabahi, H. Bahrami, M. J. Sheikhdavoodi, S. M. Safieddin Ardebili, E. Houshyar

Economic Evaluation of using Different Tillage Methods and Crop Rotation in Rain-Fed Wheat Cultivation 367

S. M. Seyedan, A. Heidari

Investigation of the Motive Steam Pressure Effect on Performance and Reverse Flows in Sugar Factory Thermo-compressor: Validation and Numerical Study 379

A. Rezvanivand fanaei, A. Hassanpour, A. M. Nikbakht

Measurement and Analysis of Fruit Vibration on the Truck Bed during Transportation on Highways 399

A. Ramezani Boukat, H. Navid, M. J. Musevi Niya, S. Ranjbar

Optimization of Biogas Production Efficiency from Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste under Thermal Pretreatment at Different Concentrations 409

S. M. Kamali, R. Abdi, A. Rohani, Sh. Abdollahpour, S. Ebrahimi

Review Article

Analysis and Evaluation of Energy, Economic, and Environmental Impact Indicators of Horticultural and Greenhouse Production Systems in Iran using PRISMA Method 423

M. Zangeneh, N. Banaeian