



انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی

ماشین های کشاورزی



شماره ۴

جلد ۱۲

سال ۱۴۰۱

(شماره پیاپی: ۲۶)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- ۴۵۳ طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه نیمه خودکار خارج کننده بذر از خیار بذری
ایمان احمدی، مریم گل آبادی، عبدالرضا اقتداری نائینی
- ۴۶۷ طراحی و ساخت یک خشک کن کابینتی برای خشک کردن ضایعات غذایی و ارزیابی سینتیک و مصرف انرژی آن
احمد خالو احمدی، امید رضا روستاپور، علی محمد برقی
- ۴۸۱ ارزیابی یک نوع چرخ فلک ماشین برداشت نخود با صفحه مشبک در دماغه
علی نیازی، هیوا گل پیرا، هادی صمیمی اخججهانی
- ۴۹۷ شبیه سازی جریان انرژی گلخانه نیمه دوطرفه شیشه ای با ساختار ویژه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)
فرخ معضدیان، مرتضی تاکی، روح اله فرهادی، مصطفی رحمتی جنیدآباد
- ۵۱۵ پایش سطح زیر کشت برنج با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک سنجش از دور
آرش مصری، فاطمه رحیمی اجدادی، ایرج باقری
- ۵۲۹ تفکیک مزارع کشت دیم و آبی در استان همدان با استفاده از شاخص های طیفی تصاویر ماهواره ای
حسنا محمدی منور، سمانه زیبازاده
- ۵۴۳ ارائه مدلی داده رانه برای پیش بینی عملکرد شکر استحصالی از نیشکر
فاطمه نادرزاد، دین محمد ایمانی، محمد رضا رسولی
- ۵۵۹ شبیه سازی عددی عملکرد و آلاینده گی موتور دیزل با استفاده از مخلوط سوخت دیزل - بیودیزل
سید رضا موسوی سیدی، سید محمد رضا میری
- ۵۷۵ بررسی تأثیر افزودن نانوسلولز به سوخت دیزل بر عملکرد و آلاینده گی موتور احتراق داخلی
امین ویسمرادی، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی، هوشنگ بهرامی، سید محمد صفی الدین اردبیلی، حسن ذکی دیزجی
- ۵۸۷ بررسی برهم کنش خاک و تبغه پنجه غازی توسط شبیه سازی عددی و اعتبارسنجی نتایج با آزمون های انبار خاک
هوشنگ محبوب ینگجه، عارف مردانی کرانی
- اصلاح شده ۵۶۱ بررسی خواص فیزیکوشیمیایی و مکانیکی محصول بامیه تحت پوشش کیتوزان در فیلم های بسته بندی نانویی و شرایط اتمسفر
آزاده حیدریان، ابراهیم احمدی، فرشاد دشتی، احمد نور محمدی
- ۵۷۵ ... تحلیل اقتصادی و ارزیابی افت دو نمونه کمباین کاه کوب متداول در کشور مطالعه موردی: شهرستان ازنا (استان لرستان)
حسین امیری، عباس عساکره، محسن سلیمانی

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."

زمستان ۱۴۰۱

جلد ۱۲ شماره ۴

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: 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

- 453 طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه نیمه خودکار خارج کننده بذر از خیار بذری
ایمان احمدی، مریم گل آبادی، عبدالرضا اقتداری نائینی
- 467 طراحی و ساخت یک خشک کن کابینتی برای خشک کردن ضایعات غذایی و ارزیابی سینتیک و مصرف انرژی آن
احمد خالواحمدی، امید رضا روستاپور، علی محمد برقی
- 481 ارزیابی یک نوع چرخ فلک ماشین برداشت نخود با صفحه مشبک در دماغه
علی نبازی، هیوا گل پیرا، هادی صمیمی اخججهانی
- 497 شبیه سازی جریان انرژی گلخانه نیمه دوطرفه شیشه ای با ساختار ویژه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)
فرخ معتمدیان، مرتضی تاقی، روح اله فرهادی، مصطفی رحمتی جنیدآباد
- 515 پایش سطح زیر کشت برنج با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک سنجش از دور
آرش مصری، فاطمه رحیمی اجدادی، ایرج باقری
- 529 تکنیک مزارع کشت دیم و آبی در استان همدان با استفاده از شاخص های طیفی تصاویر ماهواره ای
حسنا محمدی منور، سمانه زیبازاده
- 543 ارائه مدلی داده رانه برای پیش بینی عملکرد شکر استحصالی از نیشکر
فاطمه نادرزاد، دین محمد ایمانی، محمدرضا رسولی
- 559 شبیه سازی عددی عملکرد و آلاینده گی موتور دیزل با استفاده از مخلوط سوخت دیزل-بیودیزل
سید رضا موسوی سیدی، سید محمدرضا میری
- 575 بررسی تأثیر افزودن نانوسلولز به سوخت دیزل بر عملکرد و آلاینده گی موتور احتراق داخلی
امین ویسمرادی، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی، هوشنگ بهرامی، سید محمد صفی الدین اردبیلی، حسن ذکی دیزجی
- 587 بررسی برهم کنش خاک و تیغه پنجه غازی توسط شبیه سازی عددی و اعتبارسنجی نتایج با آزمون های انبار خاک
هوشنگ محبوب ینگجه، عارف مردانی کرانی
- 561 بررسی خواص فیزیکوشیمیایی و مکانیکی محصول بامیه تحت پوشش کیتوزان در فیلم های بسته بندی نانویی و شرایط اتمسفر
اصلاح شده
آزاده حیدریان، ابراهیم احمدی، فرشاد دشتی، احمد نور محمدی
- 575 تحلیل اقتصادی و ارزیابی افت دو نمونه کمباین کاه کوب متداول در کشور مطالعه موردی: شهرستان ازنا (استان لرستان)
حسین امیری، عباس عساکره، محسن سلیمانی



Development and Evaluation of a Semi-automatic Cucumber Seed Extractor

I. Ahmadi^{1*}, M. Golabadi^{2&4}, A. Eghtedari Naeini^{3&4}

1- Associate Professor of Biosystems Engineering, Department of Genetics and Plant Production Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2- Associate Professor of Plant Breeding, Department of Genetics and Plant Production Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

3- Assistant Professor of Agronomy, Department of Genetics and Plant Production Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

4- Plant Improvement and Seed Production Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

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

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69597.1032>

Received: 31-03-2021

Revised: 27-07-2021

Accepted: 28-07-2021

Available Online: 28-07-2021

How to cite this article:

Ahmadi, I., Golabadi, M., & Eghtedari Naeini, A. (2022). Development and Evaluation of a Semi-automatic Cucumber Seed Extractor. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4): 453-466. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69597.1032>

Introduction

According to FAO, gherkin and cucumber have been cultivated in about 2.23 million hectares of farmlands around the globe, and about 78000 hectares of Iran agricultural fields have been devoted to gherkin and cucumber cultivation. However, large amounts of the cucumber seeds required in Iran have been imported from abroad. Fortunately, some Iranian agricultural companies have been focused on seed production recently. Therefore, there is an opportunity to develop seed production equipment such as seed extracting machines.

There are two types of cucumber seed extractors: bulk seed extractor and single fruit extractor. The bulk seed extractor is suitable for extraction of large amounts of seed on the farm, while the single fruit extractor is suitable where seed production is limited to greenhouse seed-producing facilities which are mostly used for controlled pollination of the crop.

Due to the high price of imported seed extractors, especially after increasing the price of foreign currencies, production of these machines within the country is economically rational; therefore, the aim of this research is to develop and evaluate a single fruit cucumber seed extractor for small and medium-size seed-producing greenhouses.

Materials and Methods

The cucumber seed extractor was designed semi-automatically. The criteria for designing the machine were as follows: 1- usage of the single fruit seed extraction method, 2- the possibility of simultaneous usage of two operators, 3- automatic discharge of the extracted seeds, 4- the possibility of the height variation of the machine, 5- the possibility of the emergency shutdown of the machine, 6- the possibility of the angular velocity variation of the machine helix.

The working element of the machine was the rotating helix that can extract the fruit seeds and leave the fruit's outer skin mostly intact for easy disposal of fruit remains from the greenhouse. A 1 hp, 3 phase electric motor was used to drive the machine via the belt and pulley transmission system. For the smooth start and stop of the machine, and the possibility of angular velocity variation of the machine helixes, an electronic driver was used for the motor.

To design the machine helix, the dimensions of the examined cucumber were measured first (i.e., cucumber length and diameter); then, according to the physical and mechanical properties of the fruit, the prime mover and transmission system of the machine was designed. Finally, the fabricated machine was evaluated using some mechanization criteria.

Results and Discussion

Some of the results are as follows:

- The total torque required to drive the machine was 3.394Nm.
- The electric motor power should be higher than 0.284hp; furthermore, in order to have a wider angular velocity span for the rotating shaft, a 1hp electric motor was installed on the machine.

- The diameter of the rotating shaft was calculated to be 15mm.
- The seed extracting machine could be used instead of 15 workers of the manual seed extraction method.
- The rate of seed extraction using the machine was 30781 kg ha⁻¹.
- The efficiency of seed extraction using the machine was similar to that of the manual method.
- The emergence percentage of seeds obtained by the machine was similar to that of the manual method.
- The amount of crop calculated from the concept of economical break-even point was 7.7 tons.

Conclusion

In this study, an apparatus for mechanized extraction of cucumber seed was designed, fabricated and evaluated. The working element of the machine is the extractor helix that is rotated via the belt and pulley transmission system, which is activated using a 1 hp, 3 phase electric motor. For smooth start and stop of the motor, as well as the possibility of angular velocity variation of the machine helix, the motor was equipped with an electronic driver. Utilizing an emergency shutdown switch, the machine can be protected from unforeseen emergency situations. After using the machine for 6 months, it was recognized that strengthening the extractor helixes was necessary. According to the results of this study, using the machine led to 15 person reduction in the labor needs of the manual cucumber seed extraction method. Moreover, the amount of crop calculated from the economical break-even point was 7.7 tons.

Keywords: Greenhouse cucumber, Economical break-even point, Machine capacity, Seed extracting machine, Seed production

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۴۶۶-۴۵۳

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه نیمه خودکار خارج کننده بذر از خیار بذری

ایمان احمدی^{۱*}، مریم گل آبادی^۲، عبدالرضا اقتداری نائینی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶

چکیده

ایران با تولید سالانه ۱/۷ میلیون تن خیار، چهارمین تولیدکننده این محصول در سطح دنیاست، از سوی دیگر وجود بذر مناسب یکی از مهم‌ترین عوامل در افزایش تولید خیار است. در این پژوهش به درخواست یکی از شرکت‌های تولید بذر، دستگاهی برای استخراج بذر از محصول خیار بذری طراحی و ساخته شد و کارایی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. اجزای کاری دستگاه دو ماریچ چپ گرد و راست گرد هستند که در هنگام چرخش باعث خارج شدن پیوسته بذرها از داخل محصول خیار بذری می‌شوند. توان دورانی ماریچ‌ها توسط یک موتور الکتریکی با قدرت یک اسب بخار تأمین شد و به کمک سیستم انتقال توان پولی و تسمه‌ای به محور ماریچ‌ها منتقل گردید. برای راه‌اندازی و توقف آرام موتور و امکان پذیر شدن تغییر سرعت آن، موتور الکتریکی به یک راه‌انداز الکترونیکی مجهز شد. برای ارزیابی دستگاه، ظرفیت و نرخ استخراج بذر توسط ماشین با پارامترهای مشابه در روش دستی مقایسه شد و مقدار محصول در نقطه سر به سر اقتصادی تعیین گردید. بر مبنای نتایج به دست آمده به کارگیری دستگاه با ظرفیت کامل باعث کاهش ۱۵ نفری در تعداد کارگران مورد نیاز برای استخراج بذر به روش دستی می‌شود. همچنین وزن محصول در نقطه سر به سر اقتصادی برابر با ۷/۷ تن برآورد شد که از نظر زمانی با به کار بردن دستگاه به طور مداوم به مدت ۲۵/۳ ساعت حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تولید بذر، خیار گلخانه‌ای، ظرفیت ماشین، ماشین استخراج کننده بذر، نقطه سر به سر اقتصادی

فهرست نمادهای مورد استفاده در روابط

نماد Symbol	عبارت مورد استفاده در فرمول به انگلیسی Utilized phrase in the formula in English	عبارت مورد استفاده در فرمول به فارسی Utilized phrase in the formula in Farsi
SEE	Seed extraction efficiency	بازده استخراج بذر
n	Number of workers in the manual seed extraction	تعداد کارگر
τ مجاز	Allowable shear stress of the machine shaft	تنش برشی مجاز محور فلزی ماشین
σ	Normal stress caused by the fruit stiffness	تنش ناشی از سفتی محصول
P	Machine power	توان دستگاه
θ	Angle between helix blade and the normal line (helix is hold horizontally)	زاویه پره‌های ماریچ با موقعیت افقی با خط عمود
T	Seed extraction time	زمان استخراج بذر
r	Average radius of the blades that forms the helix tip	شعاع متوسط پره‌های تشکیل دهنده نوک ماریچ
$r_{\text{متوسط}}$	Average radius of the helix	شعاع متوسط ماریچ‌ها
μ بذر و پوسته	Friction coefficient between seeds and cucumber peel	ضریب اصطکاک بذرها با پوست خیار
μ بذر و برنج	Friction coefficient between seeds and brass	ضریب اصطکاک بذرها با فلز برنج

۱- دانشیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، ایران

۲- دانشیار اصلاح نباتات، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، ایران

۳- استادیار زراعت، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، ایران

۴- مرکز تحقیقات اصلاح و تولید بذر، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

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

CA	Capacity	ظرفیت
d	Machine shaft diameter	قطر محور ماشین
Tq	Torque	گشتاور
A	Area of the triangle blades that forms the helix tip	مساحت مثلث پره‌های تشکیل‌دهنده نوک مارپیچ
SE _R	Seed extraction rate	نرخ استخراج بذر
SR	Substitution rate of workers with the machine	نرخ جایگزینی کارگر با ماشین
F	Force	نیرو
ISW	Inaccessible extracted seeds	وزن بذرهای خارج از دسترس استخراجی از محصول
ASW	Available extracted seeds	وزن بذرهای در دسترس استخراجی از محصول
DSW	Dry weight of the extracted seeds	وزن خشک بذرهای خارج شده
W	Crop weight	وزن محصول
SEP	Specific electric power price (per kWh)	هزینه برق مصرفی به ازای kWh
MEP	Machine electric power price	هزینه برق مصرفی ماشین

مقدمه

عدم دسترسی به بذرهای با کیفیت از واریته‌های اصلاح شده در بسیاری از کشورها یکی از مهم‌ترین موانع در گسترش تولید محصولات کشاورزی است. مطالعات میدانی نشان‌دهنده این واقعیت است که بسیاری از کشاورزان برای کاشت از بذرهای ذخیره شده قدیمی استفاده می‌کنند.

بر اساس آمار FAO، سطح زیر کشت انواع خیار در جهان ۲/۲۳ میلیون هکتار است (FAOSTAT, 2020). همچنین سطح زیر کشت و مقدار تولید محصول خیار در ایران به‌ترتیب برابر با ۷۸۰۰۰ هکتار و ۱/۷ میلیون تن است (Ministry of Agriculture, 2016). بیشتر وزن خیار را آب تشکیل می‌دهد (۹۶٪)، همچنین ویتامین‌ها، مواد معدنی و اسیدهای ارگانیک زیادی در این محصول وجود دارد که آن را به یک محصول مغذی تبدیل می‌کند. خیار را می‌توان در نواحی دارای آب و هوای حاره در طول سال پرورش داد (Gopalakrishnan, 2007). برای پرورش خیار به‌جز زه‌کشی و آبیاری مناسب و حاصلخیز بودن خاک، دمای بهینه خاک برای جوانه زنی بذر باید بین ۱۸°C تا ۲۳°C باشد و رشد مطلوب گیاه در دمای خاک بین ۱۸°C تا ۳۰°C صورت می‌گیرد (Deyo & Malley, 2008).

فرآیند بذرگیری از خیار در بعضی از کشورها هنوز به‌صورت دستی انجام می‌شود. برای این کار خیار بذری پس از رسیدگی فیزیولوژیکی به‌صورت طولی با چاقو بریده شده و بذرهای همراه پالپ خارج می‌شوند. این روش به شدت خسته‌کننده و یکنواخت است. از طرف دیگر هزینه اضافی را به فرآیند تولید بذر تحمیل می‌کند. همچنین فرآیند دستی خارج کردن بذر کند پیش می‌رود و ممکن است تولیدکنندگان از لحاظ دسترسی به تعداد کافی کارگر در زمان مورد نیاز با مشکلاتی مواجه شوند. در نقطه مقابل، خارج کردن بذر با

روش‌های مکانیکی هزینه تولید بذر را کاهش داده و سرعت خارج کردن بذر را افزایش می‌دهد (Deepak, Jyothilakshmi, & Shifa, 2004). پیش از این پژوهشگران ماشین‌هایی برای خارج کردن بذر از فلفل (Gabani & Siripurapu, 1993)، گوجه (Kalra, Kaul, & Srivastava, 1983) و خیار (Wehner & Humphries, 1995; Mohan, 2012) توسعه داده‌اند.

برای طراحی ماشین‌های فرآوری محصولات کشاورزی اطلاع از خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی محصول اهمیت دارد (Mirzabe, Barati kakolaki, Abouali, & Sadin, 2017). خواص فیزیکی و مکانیکی خیار شامل سفتی سنجیده شده با نفوذسنج مخروطی، نیروی برشی محوری، قطر و طول خیار توسط (El Said, Atallah, Khalil, & El-Lithy, 2011) به‌ترتیب برابر با $2 \times 10^2 - 1 \times 10^3 \text{ N cm}^{-2}$ ، ۳۰-۷۰ N، ۶۰-۷۰ mm و ۲۰۰-۲۳۰ mm گزارش شد. از این ویژگی‌ها برای طراحی یک ماشین بذرگیر خیار استفاده شد. در این دستگاه با حرکت رفت و برگشتی بازو، اعمال برش طولی و استخراج بذر از محصول به‌طور همزمان انجام می‌شد. همچنین وزن، تعداد بذر، قطر و طول خیار بذری واریته بتا-آلفا گزارش شده توسط (Abd-Alla, 1993) به‌ترتیب برابر است با ۴۵۰-۵۰۰ gr، ۶۰۰-۲۰۰ mm، ۵۰-۶۵ mm و ۲۰۰-۲۶۰ mm.

در تحقیق دیگری به‌منظور آگاهی از خواص مکانیکی خیار، مرادی و همکاران (Moradi, Balanian, Taherian, & Mousavi, 2019) متوسط نیروی شکست فشاری و برشی خیار را به‌ترتیب برابر با ۶۲۸/۳۸N و ۷۴N اندازه‌گیری کردند. به‌طور کلی ماشین‌های بذرگیر از محصول خیار بذری به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

بذرگیر توده‌ای خیار (مناسب برای مقادیر بالا) که میوه را خرد می‌کند و توده پالپی به‌وجود می‌آورد. پس از استفاده از بذرگیر توده‌ای در مزرعه، پالپ‌های عاری از بذر و سایر قسمت‌های باقی‌مانده از خیار

رسیده یک ماشین استخراج بذر از خیار را توسعه دادند. ماشین از یک مخروط خارج کننده بذر، مکانیزم محرک، کانالی برای هدایت محصول و یک آبکش تشکیل شده بود. این ماشین به صرفه جویی زمانی ۴۷ ثانیه ای برای استخراج بذر از یک خیار در مقایسه با روش دستی منجر شد. در طول ۵ سال استفاده از ماشین، تفاوت معنی داری بین درصد جوانه زنی بذره های خارج شده با این ماشین در مقایسه با روش دستی مشاهده نشد.

از سوی دیگر هرچند ماشین های استخراج بذر که در خارج از کشور تولید شده اند، وجود دارند، اما به دلیل قیمت بالای دستگاه وارداتی مخصوصاً بعد از افزایش نرخ ارز، ساخت دستگاه در داخل کشور توجیه پذیر است، بنابراین هدف از انجام پژوهش حاضر طراحی، ساخت و ارزیابی یک ماشین مکانیکی خارج کننده بذر از محصول خیار بذری است که از نوع تک میوه ای بوده، قابلیت جابه جایی و تغییر سرعت دورانی محور و ارتفاع را داشته باشد و مناسب کار در گلخانه های تولید بذر کوچک و متوسط باشد.

مواد و روش ها

قبل از پرداختن به معرفی و روش ارزیابی ماشین، در جدول ۱ به برخی از خواص بیوفیزیکی محصول مورد استفاده در این پژوهش یعنی خیار گلخانه ای رقم سبا که با قابلیت کشت بهاره-پاییزه، دارای بوته خود تنظیم و متحمل به شرایط کم نوری و یک تا چهار میوه شیاردار کشیده زودرس در هر گره است، اشاره می شود. شایان ذکر است که طول، قطر و ضخامت پالپ نمونه های خیار با استفاده از یک کولیس-ورنیه اندازه گیری شد و متوسط مقادیر به دست آمده گزارش گردید. همچنین جرم خیارها با استفاده از یک ترازوی دیجیتال اندازه گیری شد و حجم آن ها با روش محاسبه حجم آب جابه جا شده محصول غوطه ور در آب به دست آمد و برای محاسبه مساحت تصویر شده از حاضرب طول در قطر نمونه های خیار استفاده شد.

با عملیات دیسک زنی با خاک مخلوط می شوند. در نقطه مقابل، یک بذرگیر تک میوه ای، حفراهی در طول خیار ایجاد می کند و بخش های باقی مانده از خیار را تقریباً دست نخورده باقی می گذارد که برای بیرون بردن از محیط گلخانه و یا آزمایشگاهی که معمولاً ماشین بذرگیر در آنجا نصب می شود مناسب است.

شایان ذکر است که بذره های به دست آمده از دستگاه به طور کامل عاری از پالپ نیستند و برای جدا کردن پالپ های باقی مانده روی بذرها از یکی از روش های تخمیر، مکانیکی و یا شیمیایی استفاده می شود.

و هنر و همکاران (Wehner, Tolla, & Humphries, 1983) یک نمونه آزمایشگاهی برای بذرگیری از خیار ساختند. این دستگاه قادر بود که بذرها را از محصول رسیده با نرخ ۱۰۰ خیار در دقیقه خارج کند. ماشین توانست ۹۸٪ از بذرهایی که به روش دستی استحصال می شدند را از محصول خارج کند. ماشین از دو غلتک با جهت چرخش عکس، یک استوانه دوار برای جدا کردن بذر از تکه های محصول خرد شده، یک سینی هدایت مواد و یک سینی جمع آوری بذر تشکیل شده بود.

دیپتی و همکاران (Deepthi, Jacintha, & Ali, 1993) یک ماشین استخراج بذر جریان محوری برای محصول خیار ساختند. اجزای اصلی ماشین عبارت بود از: مخزن استوانه ای، کانال تغذیه، محفظه برش اولیه، محفظه له کن و جداکن همزمان، تیغه های برشی نصب شده به صورت طولی، سیستم آب پاش، دریچه های قابل تنظیم و خروجی های بذر و پالپ. محصول رسیده داخل محفظه اول ریخته می شد و با تیغه های دوار به تکه های کوچکی تبدیل می شد، سپس تکه های خرد شده در محفظه له کن، له می شدند. جداسازی دانه ها از پالپ با خروج اجباری بذرها به کمک آب از سوراخ های الک صورت می گرفت.

و هنر و هومفریز (Wehner & Humphries, 1995) برای افزایش سرعت و راحتی کار خارج کردن بذرها از خیارهای منفرد

جدول ۱- برخی از خواص بیوفیزیکی خیار بذری مورد استفاده در این پژوهش

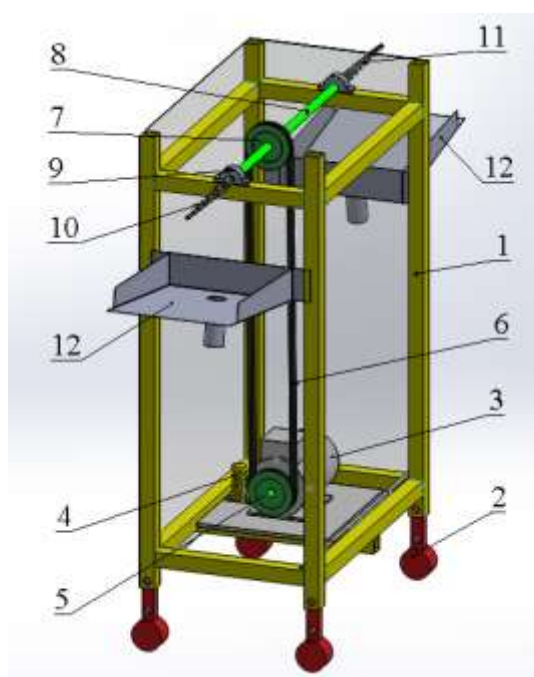
Table 1- Some biophysical properties of the seed cucumber that is studied in this research

ویژگی بیوفیزیکی خیار بذری Biophysical properties	مقدار کمینه Minimum value	مقدار بیشینه Maximum value	مقدار متوسط Average value
طول (mm) Length	190	230	210
قطر (mm) Diameter	45	70	57.5
جرم (gr) Mass	260	470	365
حجم (cm ³) Volume	250	500	375
مساحت تصویر شده (cm ²) Projected area	100	150	125
ضخامت پالپ (بخش بدون دانه) (mm) Pulp thickness	7	10	8.5

معرفی دستگاه

دستگاه خارج‌کننده بذر از خیار بذری به صورت نیمه خودکار طراحی شد، به این معنی که پس از برداشت و جمع کردن محصول در کنار دستگاه، خیارها به صورت تک تک توسط کارگر در مقابل بخش خارج‌کننده بذر قرار داده شده و به طرف آن هل داده می‌شوند و دستگاه کار خارج کردن بذر را انجام می‌دهد. پس از این عمل آنچه از محصول در دست کارگر باقی می‌ماند استوانه‌ای تو خالی و بدون بذر از خیار است که کنار گذاشته می‌شود. معیارهای مورد توجه در طراحی دستگاه عبارت بودند از:

- ۱- انجام عمل بذری از خیار به صورت تک تک
 - ۲- امکان استفاده دو اپراتور به طور همزمان از دستگاه
 - ۳- هدایت بذرها خارج شده به بخش جمع‌آوری بدون ایجاد مزاحمت برای اپراتورهای دستگاه
 - ۴- امکان تغییر ارتفاع دستگاه
 - ۵- امکان از کار انداختن دستگاه در مواقع اضطراری
 - ۶- امکان تغییر سرعت دورانی دستگاه در مواقع ضروری
- با توجه به معیارهای ذکر شده، بخش مکانیکی دستگاه به صورت آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است طراحی شد.



شکل ۱- بخش مکانیکی دستگاه خارج‌کننده بذر از خیار بذری (۱- شاسی، ۲- پایه چرخدار، ۳- موتور الکتریکی، ۴- پیچ ریگلاژ تسمه، ۵- پولی محرک، ۶- تسمه، ۷- پولی متحرک، ۸- محور دوار، ۹- یاتاقان غلتشی، ۱۰- مارپیچ راست‌گرد، ۱۱- مارپیچ چپ‌گرد، ۱۲- سینی شیب‌دار هدایت بذر)

Fig. 1. Mechanical parts of the cucumber seed extractor (1- Chassis, 2- Wheeled base, 3- Electric motor, 4- Belt regulating screw, 5- Driver pulley, 6- Belt, 7- Driven pulley, 8- Rotating shaft, 9- Ball bearing, 10- Clockwise rotating helix, 11- Counter clockwise rotating helix, 12- Seed discharge tray)

تنظیم سرعت دورانی محور، همچنین راه‌اندازی آرام موتور الکتریکی از طریق یک راه‌انداز الکترونیکی انجام شد و قطع جریان برق موتور الکتریکی در مواقع اضطراری به کمک کلیدهای emergency دستگاه عملی گردید. مارپیچ‌های راست‌گرد و چپ‌گرد به صورت آنچه در شکل ۲ نشان داده شده طراحی و ساخته شد.

قسمت‌های تشکیل‌دهنده دستگاه عبارتست از: شاسی دارای قابلیت تنظیم ارتفاع و مجهز به چرخ‌های تسهیل‌کننده حرکت دستگاه روی سطوح صاف، موتور الکتریکی محرک، سیستم انتقال توان پولی و تسمه‌ای دارای قابلیت ریگلاژ تسمه، محور دوار مستقر روی دو یاتاقان غلتشی، مارپیچ‌های راست‌گرد و چپ‌گرد برای خارج کردن بذر از محصول، سینی‌های شیب‌دار هدایت‌کننده بذرها خارج شده به بخش جمع‌آوری.



شکل ۲- مارپیچ‌های راست‌گرد و چپ‌گرد خارج‌کننده بذر از خیار بذری (a) طراحی شده، (b) ساخته شده
Fig. 2. The clockwise and counter-clockwise rotating seed extracting helixes a) Designed, b) Built

تخمین گشتاور ناشی از جدا شدن بذرهای توسط نوک صلیبی شکل مارپیچ

با دوران مارپیچ، هر یک از چهار مثلث تشکیل‌دهنده نوک صلیبی شکل به بافت خیار نیرو وارد می‌کنند. به محض این‌که نیروی محرک بر نیروی مقاوم ناشی از سفتی بافت خیار غلبه کند، جدایش بخشی از بافت محصول اتفاق می‌افتد. در سطوح مثلث شکل، حاصلضرب مساحت مثلث (A) در تنش ناشی از سفتی محصول (σ) (El Said *et al.*, 2011) نیروی مقاوم جدایش بذرهای (جداکننده F) را تشکیل می‌دهد. از ضرب نیروی محاسبه شده در بازوی گشتاور مقاوم (r) (یک سوم ارتفاع مثلث)، گشتاور مقاوم تخمین زده می‌شود که برابر با گشتاور محرک مورد نیاز برای عمل جدایش بذرهای از بافت داخلی خیار بذری است (رابطه (۱)).

$$Tq_{\text{جدایش}} = 4 \times Tq_{\text{مثلث}} = 4 \times (F_{\text{جداکننده}} \times r) \quad (1)$$

$$= 4 \times ((A \times \sigma) \times r)$$

تخمین گشتاور ناشی از نیروی اصطکاک به‌وجود آمده در اثر تماس بذرهای با دیواره فلزی مارپیچ، همچنین تماس بذرهای با پوسته خیار در هنگام خارج شدن آن‌ها از استوانه توخالی باقی‌مانده از خیار

از آنجا که برای استخراج بذر، کارگر باید خیار را در دست گرفته و به آرامی به سمت مارپیچ و در صورت نیاز به بالا و پایین حرکت دهد، بذرهای جدا شده از بافت خیار تحت تأثیر نیروی اصطکاک ناشی از تماس بذرهای با جداره فلزی مارپیچ، همچنین تماس بذرهای با جداره داخلی استوانه باقی‌مانده از خیار قرار می‌گیرند. نیروی عمودی به‌وجود آورنده اصطکاک توسط فشار دست کارگر تأمین می‌شود. حاصلضرب نیروی عمودی دست (N) (Rossi, Berton, Grélot, Barla, & Vigouroux, 2012) در حاصل جمع ضرایب اصطکاک بین بذر و سطح برنجی و بین بذر و جداره داخلی استوانه باقی‌مانده از خیار

در ادامه به روند طراحی مارپیچ‌ها و محور انتقال توان، همچنین انتخاب موتور محرک دستگاه پرداخته می‌شود:

ابتدا با توجه به ویژگی‌های ابعادی خیار بذری از نظر طول و قطر محصول، ابعاد بخش مارپیچ دستگاه تعیین شد، سپس با توجه به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خیار بذری، طراحی بخش محرک سامانه یعنی تعیین ابعاد سیستم انتقال توان و محاسبه قدرت موتور الکتریکی صورت پذیرفت.

متوسط طول و قطر خارجی خیار بذری به‌ترتیب ۲۱۰mm و ۵۸mm می‌باشد که بذرهای در استوانه‌ای داخلی به طول ۲۰۰mm و قطر ۳۰mm قرار گرفته‌اند. بنابراین محور مارپیچ به‌صورت مخروط ناقص با قطر اولیه ۵mm، قطر نهایی ۱۵mm و طول ۲۵۰mm در نظر گرفته شد که روی این محور، مارپیچ دو پره‌ای با قطر اولیه ۱۰mm، قطر نهایی ۲۴mm و گام ۶۵mm تعبیه گردید. با این طراحی زاویه سطح شیب‌دار پره‌ها با خط عمود (۳۰ درجه)، از زاویه اصطکاک بین بذرهای مرطوب و فلز مارپیچ (۱۰ درجه) بیشتر می‌شود که این موضوع سبب تخلیه آزاد بذرهای در حال جدا شدن به خارج از پوسته خیار می‌گردد. جنس فلز مارپیچ، آلیاژ برنج در نظر گرفته شد تا تماس بذرهای مرطوب باعث زنگ زدن آن نشود، همچنین ریخته‌گری مارپیچ در یک کارگاه ریخته‌گری معمولی امکان‌پذیر باشد. بخش جداکننده بذرهای از بافت داخلی خیار، نوک صلیبی شکل مارپیچ است که با حرکت دورانی خود و جابه‌جا شدن توأم خیار نسبت به مارپیچ با حرکت دست کارگر، به جدا شدن پیوسته بذرهای از بافت مرکزی خیار کمک می‌کند.

گشتاور مقاوم مارپیچ از دو بخش تشکیل شده است: گشتاور ناشی از جدا شدن بذرهای توسط نوک صلیبی شکل مارپیچ و گشتاور ناشی از نیروی اصطکاک به‌وجود آمده در اثر تماس بذرهای با دیواره فلزی مارپیچ، همچنین تماس آن‌ها با پوسته خیار در هنگام خارج شدن بذرهای از استوانه توخالی باقی‌مانده از خیار.

محرك دستگاه محاسبه شد:

$$P = Tq \times \omega \quad (4)$$

طراحی محور

محاسبه قطر محور دوار توپر با معیار تنش برشی مجاز و با استفاده از رابطه (۵) انجام شد:

$$\tau_{\text{مجاز}} = \frac{16(Tq)}{\pi d^3} \quad (5)$$

جایی که T ، d و $\tau_{\text{مجاز}}$ به ترتیب گشتاور انتقالی، قطر محور و تنش برشی مجاز هستند.

روند ساخت مارپیچ‌ها شامل پرینت سه‌بعدی قطعه طراحی شده به منظور ایجاد قالب، ریخته‌گری قالب با فلز برنج و تراشکاری و پرداخت نهایی قطعه می‌شود.

شاسی دستگاه با پروفیل آهن 4×4 و پایه آن با پروفیل آهن 3×3 ساخته شد. برای ساخت پوشش بیرونی دستگاه، همچنین ساخت سینی‌های هدایت‌کننده بذرها خارج شده به قسمت جمع‌آوری بذر از ورق آهنی با ضخامت $1/25 \text{ mm}$ استفاده شد. دستگاه ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

هزینه‌های صرف شده برای طراحی و ساخت دستگاه در جدول ۲ خلاصه شده است.

(بذر و پوسته μ + بذر و برنج μ) به تخمین نیروی اصطکاک ($F_{\text{اصطکاک}}$) می‌انجامد. سپس با توجه به زاویه پره‌های مارپیچ نسبت به خط عمود (θ) و تجزیه نیروی اصطکاک به دو مؤلفه یعنی مؤلفه گشتاورساز ($F_{\text{اصطکاک}} \times \sin \theta$) و مؤلفه در راستای محور ($F_{\text{اصطکاک}} \times \cos \theta$) و ضرب شعاع متوسط مارپیچ ($r_{\text{متوسط}}$) در مؤلفه گشتاورساز نیروی اصطکاک، تخمین گشتاور ناشی از اصطکاک بذرها ($Tq_{\text{اصطکاک}}$) صورت می‌گیرد. البته چون کارگر با دو دست خیار را در دست می‌گیرد، گشتاور به دست آمده باید در عدد ۲ ضرب شود تا گشتاور کل ناشی از اصطکاک تخمین زده شود (رابطه (۲)).

$$Tq_{\text{اصطکاک}} = 2 \times (F_{\text{اصطکاک}} \times \sin \theta) \times r_{\text{متوسط}} \\ = 2 \times ((\mu_{\text{بذر و پوسته}} + \mu_{\text{بذر و برنج}}) \times N \times \sin \theta) \times r_{\text{متوسط}} \quad (2)$$

تخمین گشتاور و توان کل دستگاه

پس از تخمین گشتاورهای ناشی از جدایش بذر و ناشی از اصطکاک، گشتاور کل دستگاه از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$Tq = 2 \times Tq_{\text{هلپس}} = 2 \times (Tq_{\text{جدایش}} + Tq_{\text{اصطکاک}}) \quad (3)$$

ضریب ۲ در رابطه (۳) به این علت وارد شده است که دستگاه از دو واحد خارج‌کننده بذر هلپسی شکل تشکیل شده است. در نهایت با در اختیار بودن گشتاور کل مورد نیاز دستگاه، توان موتور الکتریکی



شکل ۳- دستگاه ساخته شده برای خارج کردن بذر از خیار بذری

Fig. 3. The cucumber seed extractor

جدول ۲- لیست هزینه‌های مربوط به طراحی و ساخت دستگاه (قیمت‌ها مربوط به خرداد ماه سال ۱۳۹۸ است)

Table 2- Price list for designing and fabrication of the machine (prices were registered in June 2019)

موضوع Item	تعداد Quantity	قیمت واحد (هزار ریال) Unit price (thousand Rials)	قیمت (هزار ریال) Price (thousand Rials)
پرینت سه بعدی، ریخته‌گری، تراشکاری و پرداخت مارپیچ 3D printing, casting, machining and finishing of helix	2	6400	12800
خرید موتور سه فاز با توان یک اسب بخار Purchase of 1 hp, 3 phase electric motor	1	6900	6900
خرید راه‌انداز موتور الکتریکی Purchase of motor electronic driver	1	29300	29300
خرید و تراشکاری محور دوار Purchase and machining of the machine shaft	1	1000	1000
خرید یاتاقان و پولی Pulley and ball bearing price	2	800	1600
خرید پروفیل آهنی ۴×۴ و ۳×۳ به طول ۶ متر Purchase of 4×4 and 3×3 iron profiles with 6 m length	2	900	1800
جوشکاری شاسی Chassis welding	1	2000	2000
خرید کلیدهای الکتریکی دستگاه Purchase of the machine electric switches	1	3000	3000
خرید و خم‌کاری و رنگ‌آمیزی ورق‌های دستگاه Purchase, bending and painting of the machine sheets	1	4000	4000
هزینه پرسنلی طراحی و اجرای بخش الکتریکی Personnel wage for execution of the electrical parts	1	18000	18000
هزینه پرسنلی طراحی و اجرای بخش مکانیکی Personnel wage for execution of the mechanical parts	1	17000	17000
Total sum of items	جمع کل		96400

روش ارزیابی دستگاه

ارزیابی دستگاه ساخته شده با توجه به پارامترهای زیر صورت گرفت:

(۱) ظرفیت: این پارامتر با محاسبه نسبت وزن کل خیارهای مورد استفاده به زمان کل اختصاص یافته برای بذریکری به دست می‌آید. ظرفیت بر حسب واحد کیلوگرم بر ساعت بیان می‌شود (Mohan, 2012) (روابط (۶) و (۷) و (۸)):

$$CA_{\text{دستی}} = \frac{W_{\text{دستی}}}{T_{\text{دستی}}} (kg h^{-1}) \quad (۶)$$

$$CA_{\text{کارگر}} = \frac{CA_{\text{دستی}}}{n} (kg h^{-1}) \quad (۷)$$

$$CA_{\text{ماشین}} = \frac{W_{\text{ماشین}}}{T_{\text{ماشین}}} (kg h^{-1}) \quad (۸)$$

از تقسیم ظرفیت ماشین به ظرفیت استخراج بذریکری هر کارگر در روش دستی و کم کردن عدد ۲ از نتیجه به دست آمده (چون دستگاه برای کار به دو اپراتور نیاز دارد)، تعداد کارگرانی به دست می‌آید که یک دستگاه می‌تواند با آن‌ها جایگزین شود (رابطه ۹):

$$SR = \left(\frac{CA_{\text{ماشین}}}{CA_{\text{کارگر}}} - 2 \right) \quad (۹)$$

(۲) نرخ استخراج بذریکری: با محاسبه نسبت وزن بذریکری خارج شده (پس از خشک شدن) به زمان اختصاص یافته برای بذریکری، پارامتر نرخ استخراج بذریکری بر حسب واحد کیلوگرم بر ساعت به دست می‌آید (Mohan, 2012) (روابط (۱۰) و (۱۱) و (۱۲)):

$$SER_{\text{دستی}} = \frac{DSW_{\text{دستی}}}{T_{\text{دستی}}} (kg h^{-1}) \quad (۱۰)$$

$$SER_{\text{کارگر}} = \frac{SER_{\text{دستی}}}{n} (kg h^{-1}) \quad (۱۱)$$

$$SER_{\text{ماشین}} = \frac{DSW_{\text{ماشین}}}{T_{\text{ماشین}}} (kg h^{-1}) \quad (۱۲)$$

(۳) بازده استخراج بذریکری: با محاسبه نسبت وزن خشک بذریکری خارج شده از محصول توسط ماشین به وزن خشک کل بذریکری موجود در محصول (حاصل جمع وزن خشک بذریکری خارج شده توسط ماشین و بذریکری تلف شده) بازده استخراج بذریکری به دست می‌آید (Mohan, 2012). (منظور از بذریکری تلف شده، وزن آن بخش از بذریکری که یا به اطراف پرتاب شده‌اند و یا در میوه باقی

مانده‌اند و از آن جدا نشده‌اند) (روابط (۱۳) و (۱۴):

$$SEE_{دستی} = \frac{ASW_{دستی}}{ASW_{دستی} + ISW_{دستی}} \times 100 \quad (13)$$

$$SEE_{ماشین} = \frac{ASW_{ماشین}}{ASW_{ماشین} + ISW_{ماشین}} \times 100 \quad (14)$$

۴) درصد جوانه‌زنی بذر: برای اندازه‌گیری درصد جوانه‌زنی

بذر، ابتدا نمونه‌هایی از بذرهای به‌دست آمده از روش استخراج دستی و ماشینی جمع‌آوری شده و برای ایجاد محیط جوانه‌زنی از سینی پلاستیکی دارای ماسه استفاده شد. پس از کاشت، بذرها به‌صورت قطره‌ای در صورت نیاز آبیاری شدند. جوانه‌ها در روز دهم پس از کاشت ارزیابی شدند و تعداد جوانه‌های نرمال شمارش شد. از تقسیم تعداد جوانه‌های نرمال به تعداد بذرهای کاشته شده، پارامتر درصد جوانه‌زنی بذر محاسبه گردید (Davies, Di Sacco, & Newton, 2015; Mohan 2012).

۵) نقطه سر به سر اقتصادی (Levine & Boldrin, 2008)

با برابر قرار دادن هزینه‌های استخراج بذر به‌صورت ماشینی و روش دستی (رابطه ۱۵)، نقطه سر به سر قابل محاسبه است (از رابطه نقطه سر به سر مقدار محصولی محاسبه می‌شود که در صورت در اختیار بودن محصول بیشتری از این مقدار، هزینه انجام کار به‌صورت دستی از هزینه انجام کار به‌صورت ماشینی پیشی می‌گیرد). هزینه استخراج بذر با ماشین از رابطه $A + (B \times m)$ محاسبه می‌شود و هزینه استخراج بذر به روش دستی از رابطه $C \times m$ به‌دست می‌آید که در آن:

A: هزینه کل ساخت دستگاه (ریال)

B: هزینه متغیر استفاده از ماشین (ریال بر کیلوگرم)

m: وزن محصول (کیلوگرم) و

C: دستمزد کارگری (ریال بر کیلوگرم) است.

$$A + (B \times m) = C \times m \xrightarrow{yields} m = \frac{A}{(C-B)} \quad (15)$$

برای محاسبه پارامترهای B و C به‌ترتیب از روابط $\frac{(2W+MEP)}{CA}$ و $\frac{W}{CA}$

استفاده می‌شود که در آن:

W: دستمزد کارگری (ریال بر ساعت)

CA: ظرفیت ماشین در خارج کردن بذر (کیلوگرم بر ساعت)

کارگر CA: ظرفیت یک کارگر در روش دستی استخراج بذر

(کیلوگرم بر ساعت) و

MEP: هزینه برق مصرفی دستگاه (ریال بر ساعت)، برای

محاسبه MEP از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود:

$$MEP = SEP \left(\frac{\text{ریال}}{kWh} \right) \times P(kW) \quad (16)$$

در این رابطه SEP هزینه برق مصرفی به‌ازای واحد انرژی الکتریکی (kWh) است که از جداول برق مصرفی اداره برق به‌دست می‌آید و P توان ماشین است.

به‌منظور مقایسه نتایج به‌دست آمده از استخراج بذر به شیوه دستی و ماشینی در قالب طرح آماری، ابتدا آزمایش‌های ارزیابی ماشین در سه تکرار انجام شد و پارامترهای ظرفیت، نرخ استخراج بذر، بازده استخراج بذر و درصد جوانه‌زنی بذر با استفاده از روش دستی و ماشینی اندازه‌گیری شدند و نتایج به‌دست آمده از سه تکرار با آزمون student's t-test مقایسه شد.

داده‌های به‌دست آمده برای محاسبه پارامترهای مورد استفاده در

ارزیابی استخراج بذر به روش دستی و ماشینی در تکرار اول در جدول

۳ به‌صورت کمی آورده شده است.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی دستگاه ساخته‌شده

Table 3- Utilized parameters for the evaluation of the machine

روش استفاده از دستگاه	روش دستی	واحد	پارامترهای اندازه‌گیری شده در تکرار اول
Machine method	Manual method	Unit	Measured parameters in the first replication
136.3	109.8	kg	Crop weight وزن محصول
27	92	min	Seed extraction time زمان بذریکری
2	4	-	Number of workers تعداد کارگر
1702	1730	gr	Weight of total seeds وزن کل بذرهای به‌دست آمده
2.7	8	gr	Weight of missed seeds وزن بذرهای تلف‌شده

منظور از بذرهای تلف‌شده، وزن آن بخش از بذرهای که یا به اطراف پرتاب شده‌اند و یا در میوه باقی مانده‌اند و از آن جدا نشده‌اند.

The meaning of missed seeds is the weight of that part of the seeds that are either thrown around or remain in the fruit and are not separated from it.

نتایج و بحث

الف) نتایج تخمین گشتاور و توان مورد نیاز دستگاه

با استفاده از رابطه (۱) و با توجه به این‌که مقادیر مساحت

مثلث‌های تشکیل‌دهنده نوک ماریچ، بازوی گشتاور مقاوم (r) و تنش ناشی از سفتی خیار (σ) به‌ترتیب برابر با ۲۵mm²، ۱/۶۶mm و ۱N mm⁻² هستند، مقدار گشتاور مورد نیاز برای جدایش بذرهای برابر

در نهایت با استفاده از رابطه (۵) و با توجه به این که $\tau_{\text{مجاز}} = 20 \text{ MPa}$ لحاظ گردید، قطر محور محرک دستگاه برابر با $9/5 \text{ mm}$ به دست آمد که با لحاظ کردن ضریب اطمینان ۳، قطر محور انتقال توان دستگاه برابر با 15 mm در نظر گرفته شد.

ب) ارزیابی اولیه کارکرد دستگاه

پس از کامل شدن دستگاه از آن به مدت ۶ ماه به صورت آزمایشی استفاده شد تا عیوب احتمالی دستگاه مشخص شوند. پس از گذشت این بازه زمانی و لحاظ کردن طرز رفتار معمول کارگران با دستگاه، مثل انداختن بخشی از وزن دست‌ها روی محورهای دوار مشخص شد که مارپیچ‌های دستگاه احتیاج به تقویت دارند، بنابراین مارپیچ‌های جدید به صورت آن چه در شکل ۴ نشان داده شده، طراحی گردید.

با $0/167 \text{ Nm}$ تخمین زده شد. از سوی دیگر با استفاده از رابطه (۲) و مقادیر زیر:

$$F = 300 \text{ N} = \text{نیروی فشاری دست}$$

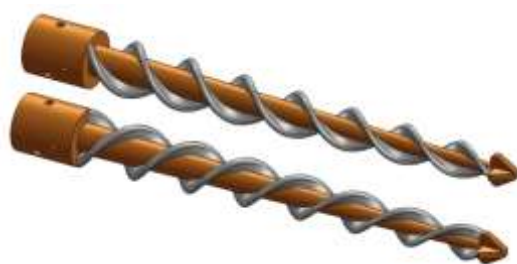
$$\mu = 0/14 = \text{بذر و برنج}$$

$$\mu = 0/2 = \text{بذر و پوسته}$$

$$r_{\text{متوسط}} = 15 \text{ mm}$$

$$\theta = 30^\circ$$

مقدار گشتاور ناشی از اصطکاک برابر با $1/53 \text{ Nm}$ تخمین زده شد، بنابراین گشتاور مقاوم کل برابر با $3/394 \text{ Nm}$ به دست آمد. با در اختیار بودن گشتاور کل مورد نیاز دستگاه، توان موتور الکتریکی محرک دستگاه با فرض سرعت دورانی 600 rpm معادل $0/284 \text{ hp}$ محاسبه گردید. به منظور لحاظ شدن سرعت‌های بالاتر در مقدار توان در اختیار دستگاه، همچنین دخالت عامل ضریب اطمینان در طراحی، توان موتور دستگاه 1 hp در نظر گرفته شد.

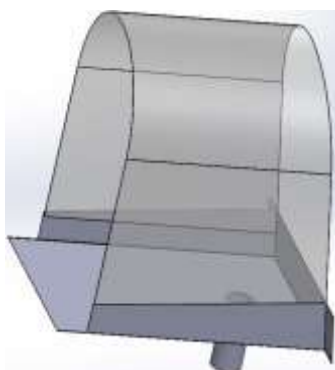


شکل ۴- مارپیچ‌های بازطراحی شده دستگاه

Fig. 4. The re-designed helixes of the machine

قرار داشت، شکایت داشتند که با نصب قطعه گنبدی شکل نشان داده شده در شکل ۵، این عیب برطرف شد.

همچنین استفاده کننده‌های دستگاه نسبت به پرتاب شدن موردی بذرها به بیرون از محیط جمع‌آوری بذور که زیر مارپیچ‌های دستگاه



شکل ۵- نصب قطعه گنبدی شکل برای جلوگیری از پرتاب شدن موردی بذرها به اطراف

Fig. 5. The designed cover for preventing occasional seed losses during extraction

این نکته اهمیت دارد که روش استخراج بذر مورد استفاده در دستگاه پژوهش (Wehner et al., 1983)، روش غلتک‌های خردکننده خیار است که با روش استخراج بذر به کار رفته در این پژوهش تفاوت دارد. همچنین

Wehner and Humphries (1995) زمان استخراج بذر ۱۸ ثانیه‌ای به‌ازای هر خیار را برای ماشین دارای مکانیزم پیچ ارشمیدوسی ساخته شده در آن پژوهش گزارش کردند که با زمان ۹ ثانیه‌ای به‌دست آمده در این پژوهش به‌ازای هر خیار برای هریک از واحدهای استخراج‌کننده بذر قابل مقایسه است.

محاسبه بازده استخراج بذر

در این پژوهش متوسط بازده استخراج بذر ماشین در سه تکرار برابر با ۹۹/۶٪ به‌دست آمد (جدول ۴). در مقام مقایسه Mohan (2012) گزارش کرد که بازده استخراج بذر خیار در ماشین توسعه‌یافته در آن پژوهش در بازه ۹۹٪ تا ۱۰۰٪ تغییر می‌کند که با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش از نقطه نظر بازده استخراج بذر همخوانی دارد.

محاسبه درصد جوانه‌زنی بذر

از هر گروه بذره‌های به‌دست آمده به روش‌های دستی و ماشینی، نمونه‌های ۸۰ بذری انتخاب شد و درصد جوانه‌زنی بذرها محاسبه گردید. در این تحقیق متوسط درصد جوانه‌زنی بذره‌های به‌دست آمده از روش ماشینی در سه تکرار برابر با ۹۴/۱٪ به‌دست آمد (جدول ۴). در مقام مقایسه از نظر شاخص جوانه‌زنی بذر، Mohan (2012) عدد ۹۶٪ را برای جوانه‌زنی بذره‌های استخراج شده به‌وسیله ماشین ساخته شده در آن پژوهش ارائه داده است. همچنین Wehner and Humphries (1995) اظهار داشتند که هیچ کاهشی در قدرت جوانه‌زنی بذره‌های به‌دست آمده از روش ماشینی در مقایسه با روش دستی در مدت زمان ۵ ساله استفاده از ماشین مشاهده نشد.

ج) نتایج به‌دست آمده از دیدگاه پارامترهای مکانیزاسیونی

به‌منظور مقایسه نتایج به‌دست آمده از استخراج بذر به شیوه دستی و ماشینی در قالب طرح آماری، ابتدا آزمایش‌های ارزیابی ماشین در سه تکرار انجام شد و پارامترهای ظرفیت، نرخ استخراج بذر، بازده استخراج بذر و درصد جوانه‌زنی بذر با استفاده از روش دستی و ماشینی اندازه‌گیری شدند و نتایج به‌دست آمده از سه تکرار با آزمون student's t-test مقایسه شد.

مقادیر شاخص‌های به‌دست آمده از سه تکرار در جدول ۴ آورده شده است. همچنین با استفاده از داده‌های به‌دست آمده و روابط ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها، پارامترهای نرخ جایگزینی دستگاه با کارگر، مقدار محصول در نقطه سر به سر اقتصادی و زمان رسیدن به نقطه سر به سر اقتصادی محاسبه شد که نتایج مربوطه در جدول ۵ آورده شده است.

محاسبه ظرفیت ماشین

در این پژوهش متوسط ظرفیت ماشین در سه تکرار برابر با 304 kg h^{-1} به‌دست آمد (جدول ۴). در مقام مقایسه در پژوهش Mohan (2012) ظرفیت ماشین استخراج بذر خیار برابر با 219 kg h^{-1} گزارش شده است. یادآوری این نکته اهمیت دارد که ماشین استفاده شده در پژوهش Mohan (2012) از یک واحد استخراج‌کننده بذر مارپیچی تشکیل شده بود، در حالی که ماشین توسعه‌یافته در این پژوهش دو واحدی است، بنابراین ظرفیت هر واحد از ماشین برابر با 152 kg h^{-1} است. از سوی دیگر Wehner et al., (1983) اعلام کردند که ماشین ساخته شده در آن پژوهش قادر به استخراج بذر از ۱۰۰ خیار در هر دقیقه است، در حالی که ماشین توسعه‌یافته در این پژوهش قادر به استخراج بذر از ۱۴ خیار در دقیقه است (ظرفیت ماشین برابر با $5/06 \text{ kg min}^{-1}$ است که با در نظر گرفتن وزن متوسط هر خیار بذری برابر با ۳۶۵g، ماشین قادر به خارج کردن بذر از ۱۴ خیار در هر دقیقه است). در توجیه این تفاوت توجه به

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های ارزیابی‌کننده روش‌های ماشینی و دستی در استخراج بذر

Table 4- The values of evaluating indexes for machine and manual seed extraction methods

ظرفیت ماشین (kg h ⁻¹)		نرخ استخراج بذر (kg h ⁻¹)		بازده استخراج بذر (%)		درصد جوانه‌زنی بذر (%)	
Machine capacity		Rate of seed extraction		Seed extraction efficiency		Seed germination	
دستی	ماشینی	دستی	ماشینی	دستی	ماشینی	دستی	ماشینی
Manual	Machine	Manual	Machine	Manual	Machine	Manual	Machine
17.85	302.4	0.282	3.78	99.5	99.8	95	93.7
16.93	310.3	0.274	3.55	99.4	99.7	93.7	95
18	300	0.27	3.71	99.1	99.4	91.2	93.7
17.59	304	0.28	3.68	99.3	99.6	93.3	94.1
تکرار ۱ Replication1		تکرار ۲ Replication2		تکرار ۳ Replication3		میانگین Average	

بر اساس نتیجه آزمون در سطح احتمال ۱٪ بین روش دستی و ماشینی از نقطه نظر پارامترهای ظرفیت ماشین و نرخ استخراج بذر تفاوت معنی دار وجود دارد، اما تفاوت معنی داری از نقطه نظر پارامترهای بازده استخراج و درصد جوانه زنی بذر مشاهده نشد.

جدول ۵- مقادیر شاخص های نرخ جایگزینی کارگر با ماشین، مقدار محصول و زمان رسیدن به نقطه سر به سر اقتصادی

Table 5- The values of the replacement rate of workers with the machine, the amount of crop and the time required for reaching to the economical break-even point

نرخ جایگزینی دستگاه با کارگر Replacement rate of workers with the machine	مقدار محصول در نقطه سر به سر (ton) Amount of crop in the economical break-even point	زمان رسیدن به نقطه سر به سر (h) The time required for reaching to the economical break-even point
تکرار ۱ Replication1	8	26.5
تکرار ۲ Replication2	7	22.6
تکرار ۳ Replication3	8	26.7
میانگین Average	7.7	25.3

الکتریکی سه فاز با قدرت یک اسب بخار تأمین شد. برای راه اندازی و توقف آرام موتور، همچنین امکان تغییر سرعت دورانی محور، موتور الکتریکی به راه انداز الکترونیکی مجهز گردید. پس از استفاده اولیه به مدت ۶ ماه از دستگاه مشخص شد که ماریچ ها باید باز طراحی و تقویت شوند. بر اساس نتایج به دست آمده به کارگیری این دستگاه به کاهش ۱۵ نفری نیاز کارگری در استخراج بذر به روش دستی منجر شد. همچنین وزن محصولی که باعث اقتصادی شدن استفاده از دستگاه در مقایسه با روش دستی در استخراج بذر می شود، برابر با ۷/۷ تن برآورد شد.

همانطور که مشاهده می شود به طور متوسط استفاده از ماشین باعث عدم به کارگیری ۱۵ کارگر می شود. از سوی دیگر اگر مقدار محصول از ۷/۷ تن بیشتر باشد، ساخت و استفاده از دستگاه در مقایسه با استخراج بذر به روش دستی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. از نظر زمانی، تعداد ساعات به کار بردن دستگاه برای رسیدن به نقطه سر به سر اقتصادی برابر با ۲۵/۳ ساعت به دست آمد، بنابراین با انجام کار استخراج بذر به صورت ماشینی و با تمام ظرفیت، بیش از یک شبانه روز کاری زمان لازم است تا استفاده از ماشین نسبت به روش دستی استخراج بذر از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش به سفارش و کمک مالی شرکت دانش بنیان نگین بذر دانش و در قالب طرح برون دانشگاهی انجام شده است که بدین وسیله مراتب سپاسگزاری از پرسنل شرکت مذکور اعلام می شود.

نتیجه گیری

در این پژوهش به طراحی، ساخت و ارزیابی یک دستگاه برای استخراج مکانیزه بذر از محصول خیار بذری اقدام شد. جزء کاری دستگاه ماریچ های خارج کننده بذر هستند که حرکت دورانی آن ها از طریق سیستم انتقال توان پولی و تسمه ای و با به کارگیری یک موتور

References

1. Abd-Alla, A. M. (1993). *Physiological studies on the yield and quality of cucumber seeds*, Ph. D., Horticultural Department, Agricultural College, Ain Shams U.: 67-68.
2. Davies, R., Di Sacco, A., & Newton, R. (2015). *Germination testing: procedures and evaluation*. Technical report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29338.85440>.
3. Deepak, E., Jyothilakshmi, C., & Shifa, T. D. (2004). *Development and testing of a power operated ash gourd seed extractor*. Unpublished B. Tech (Ag. Engg) project. Kerala Agricultural University, Thrissur, India.
4. Deepthi, P. E., Jacintha, K. J., & Ali, M. (1993). *Fabrication and testing of a power operated axial flow seed extractor*. Unpublished B. Tech (Ag. Engg) project. Kerala Agricultural University, Thrissur, India.
5. Deyo, A., & Malley, B. O. (2008). *Cucurbitaceae. Food for Thought: The Science, Culture, & Politics of Food*. Hamilton College.

6. El Said, I. Y., Atallah, M. M., Khalil, K. S., & El-Lithy, A. M. (2011). Physical and mechanical properties of cucumber applied to seed extractor. *Journal of Soil Science and Agricultural Engineering*, 2(8), 871-880. <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55669>.
7. FAO. (2020). World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb1329en>
8. Gabani, S. H., & Siripurapu, S. C. B. (1993). Chilli seed extractor. *Spice India*, 9, 5-8.
9. Gopalakrishnan, T. R. (2007). *Horticulture sciences series, Vegetable Crops*. New India Publishing Agency, Pitam Pura, New Delhi.
10. Kalra, S. M., Kaul, K. K., & Srivastava, R. (1983). Development of tomato seed extractor. *Journal of Agricultural Engineering*, 20(3), 183-186.
11. Levine, D., & Boldrin, M. (2008). *Against Intellectual Monopoly*. Cambridge University Press. p. 312. ISBN 978-0-521-87928-6.
12. Ministry of Agriculture. Agricultural statistics. (2016).
13. Mirzabe, A. H., Barati kakolaki, M., Abouali, B., & Sadin, R. (2017). Evaluation of some engineering properties of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seeds and kernels based on image processing. *Information Processing in Agriculture*, 4, 300-315. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.07.001>.
14. Mohan, A. (2012). *Development and evaluation of a seed extractor for ash gourd and cucumber*. MS Thesis. Faculty of agricultural engineering and technology, Kerala Agricultural University, Kerala, India.
15. Moradi, M., Balanian, H., Taherian, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2019). Physical and mechanical properties of three varieties of cucumber: A mathematical modeling. *Journal of Food Process Engineering*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13323>.
16. Mousavizadeh, S. J., Mashayekhi, K., Garmakhany, A. D., Ehteshamnia, A., & Jafari, S. M. (2010). Evaluation of some physical properties of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 4(4), 107-115.
17. Rossi, J., Berton, E., Grélot, L., Barla, C., & Vigouroux, L. (2012). Characterisation of forces exerted by the entire hand during the power grip: effect of the handle diameter. *Ergonomics* 55(6), 682-692. <https://doi.org/10.1080/00140139.2011.652195>.
18. Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., & Buckmaster, D. R. (2006). *Engineering Principles of Agricultural Machines*, second ed. ASAE Publication, USA.
19. Wehner, T. C., & Humphries, E. G. (1995). A single fruit seed extractor for cucumbers. *Horticultural Thechnology*, 5(3), 268-273. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.5.3.268>.
20. Wehner, T. C., Tolla, G. E., & Humphries, E. G. (1983). A plot scale extractor for cucumber seeds. *Horticultural Science*, 18(2), 246-247.



Design and Construction of a Cabinet Dryer for Food Waste and Evaluation of its Kinetics and Energy Consumption

A. Khaloahmadi¹, O. R. Roustapour^{2*}, A. M. Borghae³

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

2- Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

3- Department of Biosystems Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: o.roostapour@areo.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69918.1037>

Received: 09-05-2021

Revised: 05-08-2021

Accepted: 08-08-2021

Available Online: 10-08-2021

How to cite this article:

Khaloahmadi, A., Roustapour, O. R., & Borghae, A. M. (2022). Design and Construction of a Cabinet Dryer for Food Waste and Evaluation of its Kinetics and Energy Consumption. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 467-480. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69918.1037>

Introduction

Providing new solutions to control wet waste is one of the most important issues in maintaining public health. Drying will reduce the harmful effects on the environment by reducing moisture and the smell of wastes as well as easy transportation and disposal costs. The purpose of the design and development of the household dryer is to dry food waste in order to reduce its volume and prevent the spread of its pollution in the air, water, and soil. To study the drying behavior of food waste, an experimental cabinet dryer was designed, fabricated, and evaluated for drying food waste.

Materials and Methods

The dryer consisted mainly of the drying chamber, electric heater, fan, air inlet channel, mesh tray, air distribution plates, temperature sensor, and control panel. Different parts of the dryer were made of a stainless galvanized sheet. The dryer was modeled using Catia 2019 software and its various parts were designed. The heating power was calculated as 2.7 kW. A centrifugal fan with an air volume of $310 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, 2800 rpm, and 110 Pa was used to supply airflow in the dryer. In the drying process, a tray with medium and lateral air passage was fabricated and applied. Food waste was obtained from fruit and vegetable waste, homemade food, and fruit shops. And nonfood items such as glass, paper, plastics, and metals were separated from the waste and crushed with a shredder, and reduced to sizes less than 20 mm. First, the product was placed in the environment for one hour and then pressed with a mechanical press with the same pressure to eliminate part of the water. An anemometer UT363 model made in China was used to measure the air velocity. The temperature was measured and controlled by a temperature thermostat of G-sense model made in Iran. The effect of three temperatures of 50, 60, and 70 °C and three inlet velocities of 1, 1.5, and 2 m s^{-1} on the kinetics and intensity of drying of food waste and energy consumption of food waste with a thickness of 3 cm was investigated. Moisture ratio and drying intensity diagrams were extracted. Diffusion, activation energy, and energy consumption were determined.

Results and Discussion

Drying kinetics diagrams showed that temperature had a significant effect on moisture variation of food waste during drying. Drying period decreased with increasing temperature. The slope of the drying intensity diagrams increased with the increase of the dryer temperature. Drying rate was decreased at the temperature of 70 °C and it had a steeper slope that indicates the more intensity of the drying process in this condition. The drying process of all three samples occurred in the falling rate stage. The air duct on the side and in the middle of the tray caused hot air conducted above the tray and increased energy consumption. Effective moisture diffusivity of food waste during the drying process was in the range of 3.65×10^{-9} – $4.56 \times 10^{-9} (\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$. The effective moisture diffusivity at temperatures of 50 °C and 60 °C was less than 70 °C. Because at the temperature of 70 °C, the membrane resistance of the cell destroyed by high heat and increased the diffusion coefficient in the material.

Conclusion

Increasing temperature caused the drying period decreased and the drying occurred in the falling rate stage. Temperature and the interaction of velocity and temperature had a significant effect on the drying process. The highest drying intensity and the lowest drying time were observed at the temperature of 70 °C and a velocity of 2 m s⁻¹. Energy consumption had the maximum value at the temperature of 70 °C and a velocity of 2 m s⁻¹ and a minimum value at the temperature of 50 °C and a velocity of 1 ms⁻¹. The amount of activation energy for the food waste mass at three velocities was equal to 10417.44 J mol⁻¹.

Keywords: Activation energy, Cabinet dryer, Energy consumption, Food waste drying, Moisture diffusivity

مقاله پژوهشی

جلد 12، شماره 4، زمستان 1401، ص 480-467

طراحی و ساخت یک خشک‌کن کابینتی برای خشک کردن ضایعات غذایی و ارزیابی سینتیک و مصرف انرژی آن

احمد خالواحمدی¹، امید رضا روستاپور^{2*}، علی محمد برقمی³

تاریخ دریافت: 1400/02/19

تاریخ پذیرش: 1400/05/17

چکیده

ارائه راه کارهای جدید برای بهبود فرایند و کاهش زمان خشک شدن و همچنین توسعه خشک کردن در مهار زباله‌های تر یکی از مسائل مهم در حفظ سلامت جامعه است. خشک کردن می‌تواند از طریق کاهش رطوبت، ذخیره‌سازی برای آینده، حمل و نقل آسان، بهبود ارزش‌های گرمایی و وابستگی کمتر به سوخت‌های فسیلی، کاهش بوی زباله، کاهش ضایعات و کاهش اثرات زیست‌محیطی را به دنبال داشته باشد. در این راستا جهت مطالعه رفتار خشک شدن ضایعات غذایی یک نمونه خشک‌کن کابینتی طراحی، ساخته و ارزیابی شد. توان حرارتی معادل 2/7 kW به‌عنوان منبع گرمایش هوای ورودی تعیین شد. در این راستا طبق محاسبات انجام شده از یک فن گریز از مرکز با حجم هوای $310 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ، 2800 rpm و 110 pa برای ایجاد جریان هوا در خشک‌کن استفاده شد. سینی خشک‌کن دارای مجاری هواگذر میانی و جانبی بود. تاثیر سه سطح دمای 50، 60 و 70 °C و سه سطح سرعت جریان هوای ورودی 1، 1/5 و 2 m s^{-1} بر مدت زمان، شدت خشک شدن و میزان مصرف انرژی خشک کردن ضایعات غذایی با ضخامت 3cm مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهای نسبت رطوبت و شدت خشک شدن استخراج شد. نتایج نشان داد تمام فرایند خشک شدن در دوره نزولی رخ داده است. مصرف انرژی در دمای 70 °C بیشترین و در دمای 50 °C کمترین مقدار است. مقدار انرژی فعال‌سازی برای توده ضایعات غذایی در سه سطح سرعت، مقدار ثابت $10417/44 \text{ J mol}^{-1}$ به‌دست آمد. ضریب نفوذ رطوبت در دماهای 50 و 60 °C کمتر از دمای 70 °C بوده است زیرا با افزایش دما مقاومت سلولی کاهش یافته و نفوذ رطوبت افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انرژی فعال‌سازی، انرژی مصرفی، خشک کردن پسماندهای غذایی، خشک‌کن کابینتی، ضایعات غذایی، ضریب نفوذ رطوبت

مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین اولویت‌های کشورهای جهان در حوزه زیست‌محیطی، بازیافت زباله است. مواد آلی قابل تجزیه، به‌طور عمده زباله‌های تولیدشده در آشپزخانه‌ها توسط خانوارها در سراسر جهان است. تشویق مردم برای جدا کردن و خشک کردن زباله‌های آلی پروژه نویدبخش برای مدیریت پسماندهای خانگی آلی ارگانیک است

تا به‌طور معنی‌داری از حجم آن‌ها کاسته شود. اهداف پروژه خشک کردن زباله، طراحی و توسعه خشک‌کن خانگی نوآورانه، انعطاف‌پذیر، جمع و جور و مناسب برای خشک شدن زباله به‌منظور کاهش حجم آن‌ها و جلوگیری از انتشار آن در هوا، آب و خاک است. به‌طور کلی، زباله‌های زیستی خشک یک منبع کربن ثابت است که می‌تواند برای تولید انرژی سبز نیز استفاده شود. محققان استفاده از خشک‌کن خورشیدی را برای خشک کردن ضایعات غذایی برای استفاده به‌عنوان خوراک دام مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که میزان خشک شدن در خشک‌کن‌های خورشیدی به شدت وابسته به مقدار محصولات است و مقدار خشک شدن می‌تواند بر این اساس تغییر کند. همچنین خشک‌کن خورشیدی برای مزارع مناسب است و می‌تواند در مزارع حیوانی کوچک و متوسط با اولویت پرورش طیور مورد استفاده قرار گیرد (Nijmeh, Ragab, Emish, & Jubran, 1998). رفتار خشک کردن ضایعات غذایی با ترکیبی از برگ‌های کلم و کاهو در دمای بین 50 تا 150 °C در یک خشک‌کن جریان متقاطع

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید، اقلید، ایران

2- موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

3- گروه مهندسی بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(*) - نویسنده مسئول: (Email: o.roostapour@areo.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69918.1037>

با ضخامت 1 تا 2cm مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا منحنی‌های خشک شدن استخراج شد. نتایج نشان داد که شدت خشک کردن در دمای 150°C تا 7 مرتبه بیشتر از دمای 50°C است و در رطوبت بالا نسبت خشک شدن نیز بیشتر می‌باشد (López, Iguaz, Esnoz, & Vírveda, 2000). محققان دیگر یک خشک‌کن با بازیافت گرمای زباله را طراحی کردند؛ در این خشک‌کن رطوبت و هوای خروجی زباله‌ها از خشک‌کن به منبع حرارتی فرستاده می‌شد. نتایج نشان داد که هوا از طریق تماس با زباله نساجی آلوده، به محیط منتقل می‌شود و هوای خروجی سیستم زباله خشک‌کن شامل گرد و غبار و مواد شیمیایی آلوده در طی خشک کردن نمی‌تواند دوباره استفاده شود (Ogulata, 2004). در مطالعه‌ای، بهبود طراحی خشک‌کن کابینتی، کاهش کل زمان خشک شدن، بهینه‌سازی با هزینه کم، تولید محصول مناسب و با کیفیت، مورد نظر قرار گرفت. اجزای مختلف موجود خشک‌کن شامل یک کابینت بود که سینی‌های حاوی دانه در آن قرار داشت. گرما از طریق یک منبع حرارتی تامین و هوای گرم با کمک فن گریز از مرکز به محفظه خشک‌کن منتقل می‌شد. آن‌ها افت فشار استاتیک را در کانال‌ها با استفاده از معادله داری و دیاگرام مودی محاسبه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از فن گریز از مرکز هزینه کمتری دارد و باعث توزیع یکنواخت گرما بر روی تمام دانه‌ها و تامین مقدار مناسب هوای مورد نیاز در محفظه خشک‌کن می‌شود و همچنین باعث خشک شدن سریع‌تر دانه‌ها می‌شود (Adzimah & Seckley, 2009). به‌منظور ارزیابی و امکان‌سنجی خشک شدن آفتابی زباله، یک خشک‌کن آفتابی در مقیاس کوچک طراحی و ساخته شد. خشک‌کن دارای یک پوشش شیشه‌ای و از چوب با وزن کم و مقاومت مکانیکی بالا و قسمت‌های داخلی و خارجی با ورق‌های فولادی گالوانیزه سیاه و با عایق داخلی پشم شیشه پوشیده شده بود. عملکرد خشک‌کن به این صورت بود که بخشی از پرتوهای خورشیدی از پوشش شیشه‌ای عبور کرده و به جاذب که برای افزایش جذب اشعه خورشیدی به رنگ مشکی مات نقاشی شده بود می‌رسید. راندمان حرارتی خشک‌کن $9/4\%$ تا $28/2\%$ متغیر بود. در آزمایش‌های خشک کردن، راندمان خشک کردن از $2/4\%$ تا $3/5\%$ متغیر بود. نتایج نشان داد که سطح اشعه خورشیدی بالاتر باعث افزایش درجه حرارت بالاتر و افزایش روند خشک شدن می‌شود (Ferreira, Gonçalves, & Miao, 2013). در تحقیقی یک خشک‌کن زباله طراحی شد که با تزریق جریان هوای گرم از پایین باعث ایجاد گردابه شده و قادر بود که زباله‌ها را خشک کند. سه نوع ورودی هوای گرم در پایین خشک‌کن در نظر گرفته شد و با استفاده از روش CFD، الگوی گردابه‌های جریان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که گردابه هوای گرم تحت تاثیر تعداد ورودی‌ها قرار نمی‌گیرد (Kim, Kang, & Jeong, 2019).

(2014). یک خشک‌کن بستر سیال برای خشک کردن زیست‌توده طراحی شد. مواد اولیه زیست‌توده در این خشک‌کن چوب اره از درخت صنوبر با محتوای رطوبتی 60% و جرم حجمی 282kg m^{-3} بود. نتایج حاصله نشان داد که نسبت خشک شدن زیست‌توده در خشک‌کن بستر سیال بالا است و برای تاثیر بیشتر نیاز به جداسازی ذرات بی اثر مانند شن و ماسه نیست (Liu et al., 2014). تجزیه و تحلیل خشک کردن سه پسماند اصلی روغن زیتون (تقاله زیتون، فاضلاب آسیاب زیتون و لجن باقی‌مانده) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از یک خشک‌کن خورشیدی در سه حالت طبیعی، اجباری و استفاده از سیستم اضافی برای تامین انرژی (نوع ترکیبی) استفاده شد. نتایج نشان داد که زمان خشک کردن در حالت ترکیبی کاهش قابل‌توجهی داشته است. افزایش دمای هوا و همچنین کاهش رطوبت نسبی آن باعث کاهش زمان خشک شدن، بین 20 تا 40% شد (Montero et al., 2015). در تحقیق دیگری با استفاده از یک خشک‌کن خورشیدی محصولات کشاورزی نسبت به خشک کردن زباله‌های غذایی رستوران‌ها اقدام و خواص ترمودینامیکی سیال در نقاط ورودی و خروجی اندازه‌گیری شد. در این راستا انرژی مصرفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان خشک شدن به شدت تابش خورشید و مدت زمان تابش بستگی دارد (Ikem, Osim, Nyong, & Takim, 2016). دیگر محققان یک خشک‌کن نقاله‌ای خورشیدی را برای کاهش رطوبت مواد زیست‌توده طراحی کردند. سیستم طراحی شده در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد و بهینه‌سازی اقتصادی توسط یک الگوریتم ژنتیک در برنامه‌های مختلف اقتصادی انجام گردید. خشک‌کن از یک جمع‌کننده خورشیدی با صفحه صاف، پنل‌های فتوولتائیک، یک فن، یک مبدل حرارتی با سوخت کمکی، محفظه خشک کردن و جداکننده سیکلونی تشکیل شده بود. نتایج نشان داد که بسته به شرایط اقتصادی، خشک کردن زیست‌توده با خشک‌کن طراحی شده بین 4 تا 7 سنت در هر کیلوگرم زیست‌توده هزینه دارد و استفاده از انرژی خورشیدی یک روش مقرون به صرفه برای خشک کردن زیست‌توده در مقیاس بزرگ نیست (Shirinbakhsh & Amidpour, 2017). نحوه توزیع جریان هوای کنارگذر و میان‌گذر در مدل سه‌بعدی خشک‌کن با ظرفیت 30kg شلتوک را با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی کردند. در الگوی کنارگذر، هوا از دیواره‌های جانبی مخزن و در میان‌گذر، از کانال وسط مخزن به میان توده وارد می‌شد. شبیه‌سازی نشان داد که هوا از مجراهای میان‌گذر و کنارگذر با سرعت بیشتری جریان می‌یابد. عدم وجود کانال میانی در الگوی کنارگذر منجر به تولید دمایی نامنظم با اعوجاج زیاد می‌شود (Roustapour, Azimi, & Gazor, 2019). با توجه به این‌که توزیع هوا بر نحوه خشک کردن و در نتیجه کاهش زمان فرآیند و میزان مصرف انرژی تاثیر می‌گذارد، در

خواهد بود. ΔT اختلاف دمای بین خشک‌کن و محیط (40°C) Q_{heat} مقدار حرارت مورد نیاز جهت خشک کردن (J) P_{heater} توان حرارتی مورد نیاز H_{fg} گرمای ویژه تبخیر (kJ kg^{-1}) می‌باشد. ظرفیت گرمایی ویژه (C_p) اکثر مواد جامد کمتر از آب ($4/1813 \text{ kJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$) می‌باشد. به دلیل ماهیت ناهمگن ضایعات غذایی، تنوع زیادی در خصوصیات حرارتی آن وجود دارد لذا برای به‌دست آوردن ظرفیت گرمایی ویژه ضایعات غذایی، از رابطه (5) استفاده شد (Singh & Heldman, 2009).

$$C_p = 0.837 + 3.349x_w \quad (5)$$

x_w محتوی رطوبت مواد می‌باشد که برای ظرفیت گرمایی ویژه ضایعات غذایی با رطوبت (82٪)، مقدار $3/583 \text{ kJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$ محاسبه شد و بر این اساس، مقدار توان گرم‌کن برقی $1/9 \text{ kW}$ به‌دست آمد. به‌منظور افزایش کارایی دستگاه خشک‌کن در تامین هوای لازم در دماهای بالاتر از 80°C ، از 5 المنت میله‌ای با مجموع توان $2/7 \text{ kW}$ به‌عنوان منبع حرارتی هوای ورودی استفاده شد.

حجم هوا

بر اساس رابطه موازنه انرژی، مقدار حرارتی که گرم‌کن تولید می‌نماید با مقدار حرارتی که هوا کسب می‌کند، برابر می‌باشد. لذا با محاسبه توان هیتر از رابطه (4) و موازنه قرار دادن با رابطه (6)، دبی جرمی هوا، و در نهایت از رابطه (7) حجم هوا محاسبه گردید (Adzimah & Seckley, 2009; Lewis, 1990).

$$Q_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{air}} C_p \Delta T \quad (6)$$

$$v = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\rho} \quad (7)$$

Q_{air} مقدار حرارتی که هوا کسب کرده است، $\dot{m}_{\text{air}}$ دبی جرمی هوا (kg s^{-1})، C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا ($\text{kJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$)، v میزان هوای مورد نیاز ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)، ρ جرم حجمی هوا (kgm^{-3}) می‌باشد. اگر ضریب طراحی $1/5$ در نظر گرفته شود حجم هوای مورد نیاز $0/071 (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$ یا $256 (\text{m}^3 \text{h}^{-1})$ خواهد بود.

انتخاب فن

برای این که فرآیند خشک شدن به‌طور موثر اتفاق بیفتد، به جریان هوای کافی نیاز است. این امر مستلزم استفاده از یک فن مناسب می‌باشد که بر فشار استاتیک ایجاد شده در کابینت خشک‌کن غلبه کرده و همچنین جریان هوا را با سرعت مناسب تامین کند. افت فشار ناشی از مسیر جریان برابر مجموع افت فشار در مسیر مستقیم، افت فشار ناشی از تغییر سطح مقطع و افت فشار ناشی از مقاومت ضایعات غذایی است. افت فشار ناشی از اصطکاک بخش اول بر اساس ضریب اصطکاک و عدد رینولدز و رابطه داری از رابطه (8) و افت فشار بخش دوم بر اساس رابطه (9) تعیین شد (Adzimah & Seckley, 2009).

این تحقیق یک خشک‌کن کابینتی با سینی دارای مجاری هواگذر میانی و جانبی برای خشک کردن ضایعات غذایی طراحی و ساخته شد و تاثیر دما و سرعت جریان هوای ورودی بر مدت زمان و نسبت خشک شدن ضایعات غذایی و میزان مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت خشک‌کن کابینتی

در طراحی خشک‌کن کابینتی موارد ذیل مد نظر قرار گرفت: 1- قابلیت تغییر و تنظیم دقیق فاکتورهای آزمایش مانند سرعت و دمای هوای ورودی و تعویض صفحات توزیع‌کننده، 2- جلوگیری از اتلاف حرارت و سهولت کار کردن. خشک‌کن مورد نظر شامل محفظه خشک کردن، گرم‌کن برقی، فن، کانال ورودی هوا، صفحات توزیع هوا، حسگر دمای هوا، سینی توری با مجاری هواگذر میانی و جانبی و تابلو برق کنترل است. قسمت‌های مختلف محفظه هوای گرم از ورق گالوانیزه، دو جداره با ضخامت 2cm با عایق پشم شیشه ساخته شد. در طراحی خشک‌کن، میزان رطوبت تبخیر شده با توجه به ابعاد سینی $(0/57 \times 0/4 \times 0/05) \text{ m}^3$ و برای حداکثر ضخامت 5 cm و تعیین ظرفیت 10kg در هر وعده و رسیدن تا رطوبت 10٪ (بر پایه تر) با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه گردید (Ehime, 2008; Adzimah & Seckley, 2009). رطوبت اولیه و جرم حجمی ضایعات غذایی از میان مطالعات انجام شده بالاترین مقدار به‌ترتیب 82٪ (بر پایه تر) و 892 kgm^{-3} در نظر گرفته شد (Shin & Youn, 2005).

$$M = \rho v \quad (1)$$

$$M_R = M \left(\frac{X_1 - X_2}{1 - X_2} \right) \quad (2)$$

که در آن v حجم سینی (m^3)، ρ جرم حجمی ضایعات غذایی (892 kgm^{-3})، M ظرفیت خشک‌کن در هر وعده (kg)، M_R مقدار رطوبت ضایعات غذایی که باید خشک شود (kg)، X_1 رطوبت اولیه مواد 82٪ و X_2 مقدار رطوبت نهایی مطلوب برای خشک کردن (10٪) هست.

انرژی حرارتی مورد نیاز

انرژی حرارتی لازم جهت تبخیر آب ضایعات غذایی از رابطه (3)، و مقدار توان حرارتی از رابطه (4) به‌دست آمد (Ehime, 2008; Adzimah & Seckley, 2009).

$$Q_{\text{heat}} = MC_p \Delta T + M_R H_{\text{fg}} \quad (3)$$

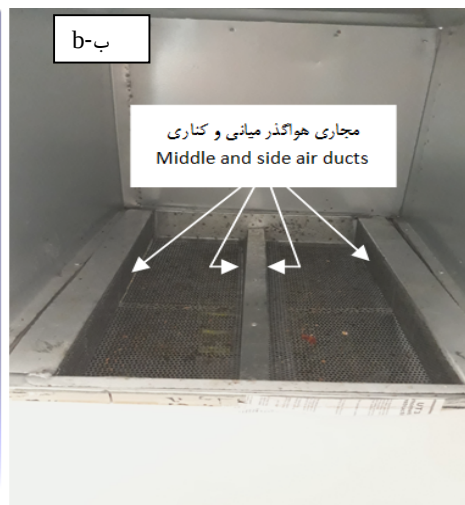
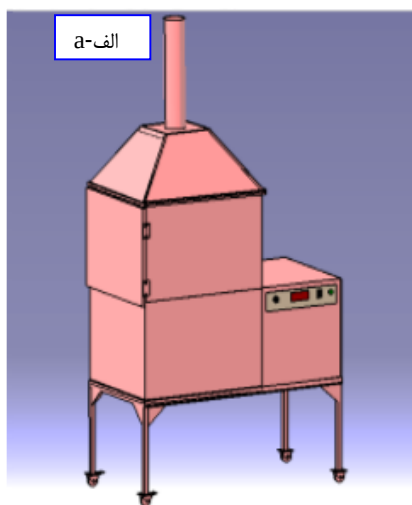
$$P_{\text{heater}} = \frac{Q_{\text{heat}}}{\text{time(s)}} \quad (4)$$

اگر دمای ورودی خشک‌کن حداکثر 80°C باشد 25٪ صرف خشک کردن شود و دمای محیط 20°C باشد اختلاف دما حدود 40°C

در روابط بالا، ρ_p جرم حجمی توده ضایعات غذایی و ρ_f جرم حجمی مواد خشک است. افت فشار کل از مجموع افت فشار ناشی از مسیر عبور هوا و افت فشار بستر 70pa محاسبه شد. که با محاسبه ضریب طراحی 1/5 مقدار 105 pa تعیین می‌شود. برای اطمینان از توزیع مناسب هوا به محفظه خشک‌کن و مصرف انرژی کمتر، از یک فن گریز از مرکز با حجم هوای $310\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ و 2800rpm و 110pa استفاده شد.

طراحی نرم‌افزاری

پس از محاسبات لازم، به طراحی نرم‌افزاری پرداخته شد. در اینجا از نرم‌افزار Catia 2019 استفاده شد و قسمت‌های مختلف خشک‌کن طراحی و ساخته شد. شکل 1 طرح‌واره خشک‌کن و سینی با مجاری هواگذر میانی و جانبی را نشان می‌دهد.



شکل 1- الف: طرح‌واره خشک‌کن، ب: سینی خشک‌کن
Fig. 1. a: Schematic of the dryer, b: Tray of dryer

خشک شدن و میزان مصرف انرژی دستگاه، ضخامت 3cm برای خشک کردن ضایعات غذایی انتخاب شد (Gazor, Minaee, & Rostami, 2005). ضایعات غذایی با لایه‌ای به ضخامت 3cm روی سینی خشک‌کن ریخته شدند و سپس مقدار 47gr از ضایعات غذایی در داخل ظرف‌های توری مکعبی با ابعاد سطح مقطع $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ریخته و در سه جای سینی حاوی ضایعات غذایی جاسازی شدند. سپس با برقراری جریان هوای گرم در محفظه، فرایند خشک کردن انجام شد. روش خشک کردن به این صورت بود که هوای گرم به زیر سینی محتوی توده ضایعات و اطراف سینی برخورد کرده و هوای گرم

$$\Delta H_f = \lambda L U^2 / 2gh \quad (8)$$

$$\Delta H_C = \frac{U^2}{2g} \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (9)$$

U سرعت هوا در محفظه طبق معادله مومنتوم تعیین می‌شود h ضخامت لایه مواد در سینی (m)، L طول محفظه (m)، ΔH_f افت فشار در مسیر مستقیم (pa)، λ ضریب اصطکاک، A_2 سطح مقطع محفظه خشک‌کن (m^2) و A_1 نیز سطح مقطع محفظه بخاری (m^2) است. ضریب اصطکاک بر حسب زبری نسبی و عدد رینولدز جریان و با استفاده از جریان مودی در بخش‌های مختلف مسیر جریان بین محدوده 0/023 و 0/035 تعیین شد. افت فشار ناشی از بستر، با استفاده از رابطه (10) محاسبه شد (Amiri Chayan, Khoshtaghaza, & Kianmehr, 2004) ε ضریب تخلخل از رابطه (11) تعیین شد (Lewis, 1990).

$$\Delta p_{bed} = g(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)h \quad (10)$$

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \times 100 \quad (11)$$

آزمون و ارزیابی

مواد زائد مورد استفاده از پسماندهای میوه و سبزیجات، غذاهای خانگی و مغازه‌های میوه‌فروشی فراهم گردید. مواد غیر خوراکی مثل شیشه، کاغذ، پلاستیک و فلزات از زباله‌ها جدا شده و بقیه با دستگاه خردکن صنعتی مدل kaspian 909 (ساخت ایران) به قطعات کوچک‌تر از 20mm تبدیل شدند. ابتدا محصول مورد نظر یک ساعت در محیط قرار داده شد تا با محیط هم دما شود و سپس برای از بین بردن بخشی از آب، با یک پرس فشاری دستی فشرده شدند. با توجه به تاثیر کاهش ضخامت لایه محصول بر روی کاهش مدت زمان

(Roustapour, Maftoonazad, & Khaloahmadi, 2014)

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_o - M_e} \quad (12)$$

$$MR = \frac{M_d}{M_o} \quad (13)$$

$$X_{d.b.} = \frac{w_w - w_d}{w_d} \quad (14)$$

$$N = \frac{-M_d}{A} \frac{dx}{dt} \quad (15)$$

که در آن $X_{d.b}$ رطوبت بر پایه خشک، M_d رطوبت در لحظه جاری بر پایه خشک و M_o رطوبت اولیه محصول $(kg_{water} / kg_{drymatter}^{-1})$ می‌باشند و W_d وزن خشک (kg)، W_w وزن در طی خشک کردن (kg)، dt زمان متوالی بین دو توزین (h)، dx رطوبت متوالی بین دو زمان توزین، A سطح تبخیر (m^2)، N آهنگ شدت خشک شدن ($kg / m^2 h^{-1}$) می‌باشد.

تعیین انرژی مصرفی

میزان انرژی مصرفی در هر فاز خشک کردن از رابطه (16) محاسبه شد (Motevali, Abbaszadeh, Minaei, Khoshtaghaza, & Ghobadian, 2012).

$$E_t = A v \rho_a C_a \Delta T Dt \quad (16)$$

E_t انرژی مصرفی در هر آزمایش ($kW.h$)، A سطح مقطع، ρ_a چگالی هوا (kg / m^3)، ΔT اختلاف دمای خشک‌کن و محیط ($^{\circ}C$)، Dt زمان کل خشک شدن برای هر فاز (h)، C_a ظرفیت حرارتی هوا ($kJ / kg^{\circ}C^{-1}$) می‌باشد.

تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی

ضریب نفوذ موثر با استفاده از قانون دوم پخش فیک و با در نظر گرفتن ضخامت لایه توده مورد نظر به صورت باریکه نامحدود و برای زمان‌های طولانی خشک شدن، از رابطه (17) محاسبه شد (Ghasemkhani, Rafiei, Kayhani, & Dalvand, 2018).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (17)$$

$$K_0 = \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right) \quad (18)$$

که در آن L ، نصف ضخامت لایه (m)، D_{eff} ضریب نفوذ موثر رطوبت ($m^2 s^{-1}$)، MR نسبت رطوبت می‌باشد. انرژی فعال‌سازی با استفاده از رابطه (19) محاسبه شد.

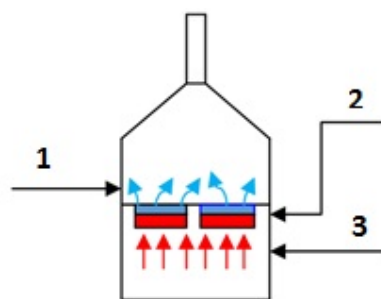
$$D = D_0 \cdot \exp(E_a / RT) \quad (19)$$

معادله بالا، شکلی خطی به صورت $y = mx + b$ دارد. اگر از دو طرف رابطه بالا، لگاریتم طبیعی بگیریم، به رابطه (20) خواهیم رسید. ضریب K_1 طبق رابطه (21) محاسبه می‌شود.

$$\ln D = \ln D_0 - E_a / RT \quad (20)$$

$$K_1 = E_a / R \quad (21)$$

توسط کانالی از وسط سینی و همچنین از کناره‌های سینی عبور می‌کرد و باعث خشک شدن محتویات سینی می‌شد (Roustapour et al., 2019) (شکل 2). فرایند خشک کردن در سه سطح دمای 50، 60 و $70^{\circ}C$ و سه سطح سرعت جریان هوای ورودی 1، 1/5 و $2ms^{-1}$ در سه تکرار انجام شد و منحنی‌های سینتیک آن‌ها استخراج گردید. تجزیه و تحلیل آماری با بررسی اثرات 3 دما و 3 سرعت هوا در 3 تکرار با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد آزمون مقایسه با استفاده از آزمون LSD و با نرم‌افزار spss26 انجام گرفت.



شکل 2- روش خشک شدن ضایعات غذایی در خشک‌کن (1- تبخیر، 2- سینی محصول، 3- منبع حرارت)

Fig. 2. Drying procedure of waste food in dryer (1. Vaporization, 2. Tray, 3. Heater)

در طی فرآیند، ظرف نمونه‌ها هر 30 دقیقه یکبار توزین شدند. این فرایند تا زمان رسیدن وزن محصول به مقدار ثابت ادامه داشت (Gazor et al., 2005). برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا از یک سرعت‌سنج پروانه‌ای مدل UNIT UT363 (ساخت چین) استفاده شد. دما به وسیله ترموکوپل از نوع G-sense تولید ایران اندازه‌گیری و کنترل می‌شد که در قسمت پایین‌تر از سینی ضایعات غذایی نصب شده بود.

سینتیک خشک شدن

برای تعیین مدت زمان خشک شدن به دست آوردن نمودارهای سینتیک خشک شدن ضروری است. برای به دست آوردن نسبت رطوبت MR از رابطه (12) استفاده شد. در موادی که دارای رطوبت زیاد هستند رابطه نسبت رطوبت به رابطه (13) ساده می‌شود (Ertekin & Yaldiz, 2004). رطوبت مواد طی خشک شدن بر پایه خشک به وسیله رابطه (14) محاسبه شد (Tun & Juchelkova, 2019). نموداری که از رسم آهنگ خشک شدن در مقابل درصد رطوبت بر پایه وزن خشک به دست می‌آید منحنی شدت خشک شدن نامیده می‌شود؛ تعیین شدت خشک شدن از رابطه (15) به دست آمد

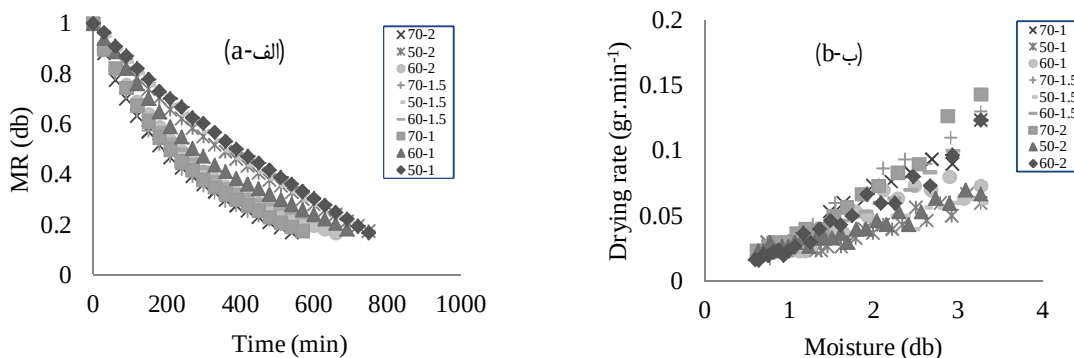
زمان خشک شدن کاهش یافته است (شکل 4). افزایش دما موجب شد که سرعت خروج رطوبت از توده‌ها افزایش یافته و منحنی‌های به‌دست آمده از تغییرات رطوبت محصول در واحد زمان دارای شیب بیشتر باشد. در دماهای 60، 70 و 50°C با سرعت‌های 1/5 و 1ms⁻¹ به‌ترتیب کم‌ترین زمان خشک شدن و بیشترین شیب را دارند. کاهش زمان خشک شدن با افزایش دما برای بسیاری از مواد غذایی مانند برگ گزنه (Alibas, 2007)، تفاله گوجه‌فرنگی (Al-Rostami Baroji, Seiiedlou, 2010)، هویج (ArslanOzcan, 2017)، انار (Mazandarani, Heris, & Dehghannya, 2017)، دارچین (Aghajani, Daraei Garmakhany, Bani Ardalan, & Nouri, 2017)، ضایعات کاهو و کلم (López et al., 2000) به‌دست‌آمده است. با توجه به نمودارهای شدت خشک شدن شکل (3-ب)، آهنگ خشک شدن با افزایش دمای هوای خشک‌کن بیشتر گردیده است. در ناحیه اول خلل و فرج پر از آب است و سطح ماده به‌وسیله مایع کاملاً مرطوب است گرما صرف رسانیدن دمای محصول به دمای نهان تبخیر شده است.

که E_a انرژی فعال‌سازی (kJ mol^{-1})، R ثابت جهانی گازها ($\text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)، D_0 ثابت ضریب نفوذ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)، T دمای مطلق هوا (K) می‌باشد. در فرایند خشک کردن انرژی فعال‌سازی به کمترین انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر رطوبت از محصول و ادامه فرایند اطلاق می‌شود و یک مولفه بسیار مهم برای تخمین حداقل شرایط خشک کردن برای به‌دست آوردن نوع ماده دلخواه خشک شده می‌باشد (Ghasemkhani et al., 2018). متغیرهای دما و سرعت در هر آزمایش به‌صورت جداگانه جمع‌آوری و ثبت شدند.

نتایج و بحث

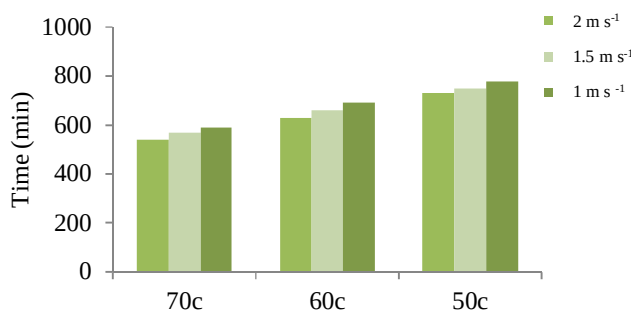
بررسی سینتیک خشک شدن

محتوی رطوبت ضایعات غذایی طی خشک‌شدن به نسبت رطوبت تبدیل شد. نمودارهای آهنگ خشک شدن و نسبت رطوبت استخراج گردید (شکل 3-3). نمودارهای نسبت رطوبت در شکل (3-الف) نشان می‌دهند که دما و سرعت هوا تأثیر به‌سزایی بر تغییرات محتوای رطوبتی محصول داشته است. چنان‌که با افزایش دما و سرعت مدت



شکل 3- الف: تغییرات نسبت رطوبت، ب: شدت خشک شدن

Fig. 3. a: Changes of moisture rate, b: Drying rate



شکل 4- مدت زمان خشک شدن

Fig. 4. Drying time

سپس تبخیر حرکت خود را به سمت مرکز جسم دنبال کرده است، بعد از آن، مرحله نهایی خشک شدن شروع شده است. در دمای 70°C و سرعت 2 ms^{-1} آهنگ نزولی از شیب بیشتری برخوردار است. تمام فرایند خشک شدن برای هر سه نمونه در دوره نزولی رخ داده است که نشان‌دهنده مقاومت درونی در خروج رطوبت از ضایعات غذایی می‌باشد. در دوره نزولی خشک شدن، دما، مهم‌ترین عامل فیزیکی است که بر روی خشک کردن تاثیر می‌گذارد. چنین نتیجه‌ای توسط محققان دیگر در مورد خشک شدن محصولات کشاورزی مانند نناع (Ayadi, Mabrouk, Zouari, & Ahmed, 2014) و زرشک (Chaji, Ghasem zadeh, & Ranjbar, 2008) به‌دست آمده است.

آنالیز آماری

جدول 1 نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس خشک شدن را در سطح 1٪ نشان می‌دهد. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فاکتورهای دما و برهمکنش سرعت و دما در سطح 1٪ معنی‌دار و فاکتور سرعت جابه‌جایی هوا هم در سطح 1٪ معنی‌دار بودند. اما با توجه به جدول 2 و مشاهده نتایج مقایسه میانگین‌ها به روش LSD نشان داد که فاکتور دما بین دماهای 60°C و 70°C معنی‌دار نشده است ولی بین دماهای 50°C و 60°C و همچنین بین 50°C و 70°C معنی‌دار شده است و فاکتور سرعت جابه‌جایی هوا هم بین سرعت‌های 1 ms^{-1} و $1/5\text{ ms}^{-1}$ و همچنین بین $1/5\text{ ms}^{-1}$ و 2 ms^{-1} معنی‌دار نشده است اما بین سرعت‌های 1 ms^{-1} و 2 ms^{-1} معنی‌دار شده است که می‌تواند به این دلیل باشد که اختلاف سرعت $0/5\text{ ms}^{-1}$ تاثیر به‌سزایی در روند خشک کردن نداشته است اما افزایش اختلاف سرعت جابه‌جایی هوا به 1 ms^{-1} در خشک کردن موثر بوده است. هوای گرم پس از برخورد به

زیر سینی محتوی توده ضایعات غذایی، توسط کانالی از میان و کنار توده عبور می‌کند و باعث خشک شدن محتویات سینی می‌شود در این روش پس از خشک شدن و کاهش حجم مواد و باز شدن منافذ کانال میانی و کناری سینی منجر به کاهش حجم هوا در پشت سینی مواد می‌شود و هوا سریع‌تر به سمت بالای سینی حرکت کند که باعث کاهش شار حرارتی در میان توده و خلل و فرج توده می‌شود. در نتیجه نفوذ هوای گرم به مواد متخلخل با شدت کمتری رخ می‌دهد. در این روش ابتدا موادی که به دیوارهای سینی نزدیک‌ترند زودتر خشک شده و کاهش حجم بیشتری نسبت به بقیه مواد دارند. در نتیجه وجود مجاری هواگذر میانی و جانبی باعث عبور سریع هوا و کاهش فشار در پشت سینی ضایعات غذایی می‌شود و این با نتایج محققان دیگر مطابقت دارد. روستاپور و همکاران (Roustapour et al., 2019) دو الگوی ورودی هوای میان‌گذر و کنارگذر را با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی کرده بودند. در الگوی میانی هوای گرم از منافذ توری وسط محفظه به سمت بالا حرکت کرده و در داخل توده شلوك از جداره‌های اطراف منتشر می‌شد و در الگوی کنارگذر جریان هوا از دو کانال تعبیه شده در طرفین خشک‌کن وارد محفظه می‌شد. بررسی تغییرات جریان در مخزن خشک‌کن با الگوی جریان میان‌گذر نشان داده بود که هوا پس از عبور از کانال ورودی به‌صورت یک هسته پر سرعت در زیر خشک‌کن توسعه می‌یابد و جریان به محض ورود به سطح زیرین در گذر میانی توسعه می‌یابد. کانتور سرعت، در صفحات کناری با الگوی جریان کنارگذر تا حدود زیادی مشابه هم بود و بیشترین تمرکز خطوط دما در نزدیکی دیواره‌ها که جریان سیال در آن‌ها وجود داشت دیده می‌شد که حاکی از بیشتر بودن سرعت جریان هوا در آن نواحی بود.

جدول 1- نتایج تجزیه واریانس تاثیر دما و سرعت هوا روی زمان خشک شدن ضایعات غذایی

Table 1- Results of variance the effect of temperature and speed on drying time of food waste

منابع تغییر Source	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی Degree of Freedom	میانگین مربعات Mean Squares	F
سرعت Velocity	1.944	2	0.972	7.022 ^{ns}
دما Temperature	24.186	2	12.093	87.378 ^{**}
سرعت×دما Temperature× Velocity	3.611	4	0.903	6.523 ^{**}
خطا Error	2.491	18	0.138	
تعداد کل Total	22480.546	27		

^{**} اختلاف معنی‌دار در سطح 1٪، ^{ns} عدم اختلاف معنی‌داری در سطح 1٪

^{**} Significant difference at probability level of 1%

^{ns} Non significant difference at probability level of 1%

جدول 2- نتایج مقایسه میانگین‌های تجزیه واریانس به روش LSD

Table 2- Results of comparison means of analysis variance by LSD method

منابع تغییر Source	(I)	(J)	اختلاف میانگین Mean Difference (I-J)
سرعت Velocity	1.0	1.5	.318 ^{ns}
		2.0	.657 ^{**}
	1.5	1.0	-.318 ^{ns}
		2.0	.339 ^{ns}
	2.0	1.0	-.657 ^{**}
		1.5	-.339 ^{ns}
دما Temperature	50	60	1.980 ^{**}
		70	2.034 ^{**}
	60	50	-1.980 ^{**}
		70	.054 ^{ns}
	70	50	-2.034 ^{**}
		60	-.054 ^{ns}

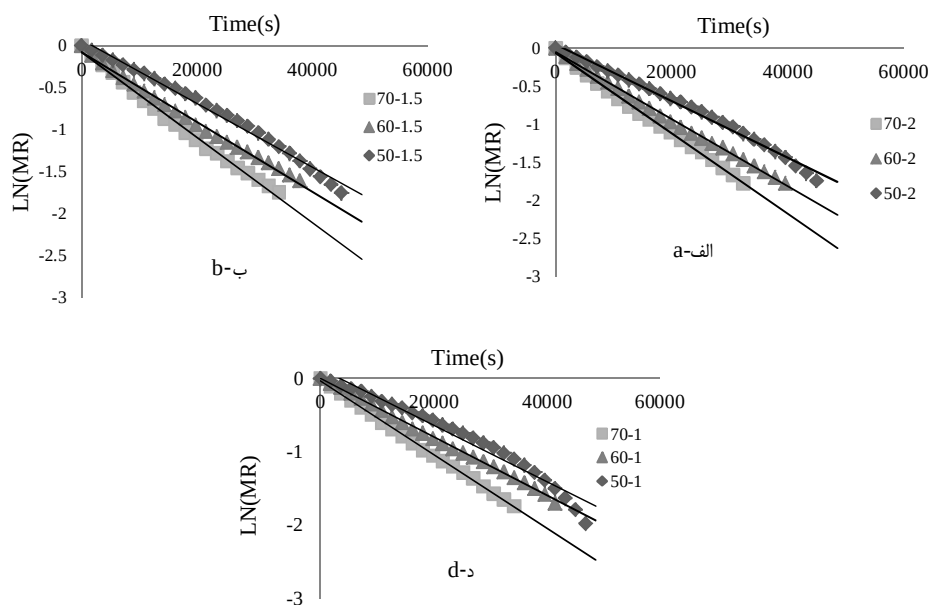
** اختلاف معنی‌دار در سطح 1%، ns عدم اختلاف معنی‌داری در سطح 1%

** Significant difference at probability level of 1%

^{ns} Non significant difference at probability level of 1%

انتشار دمایی در محیط متخلخل مشاهده نکردند (Roustapour et al., 2019). در این آزمایش هم اختلاف سرعت $0/5 \text{ ms}^{-1}$ به علت مقاومت توده ضایعات تاثیر به‌سزایی در روند خشک کردن نداشت و نتایج تجربی این آزمایش با نتایج شبیه‌سازی مطابقت دارد.

آنها با شبیه‌سازی تغییرات دما در دو الگو به این نتیجه رسیدند که سرعت بالای جریان در کانال‌های میان‌گذر نسبت به داخل توده و با وجود مقاومت فشاری توده محصول، انرژی، فرصت کافی برای نفوذ به توده متخلخل را نداشته است و در الگوی کنارگذر هم هیچ



شکل 5- نمودارهای LN(MR) نسبت به زمان

Fig. 5. Diagram of ln(MR) relative to time

رابطه‌های (28)، (29) و (30) رابطه‌های رگرسیونی خطی شکل (5-د) در سرعت $1 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ به‌ترتیب برای دماهای 60 و 70°C با ضریب تبیین ($R^2 > 99\%$) می‌باشد. رابطه‌ها در دماهای 50 و 60°C دارای شیب خطی یکسان و کمتر از دمای 70°C می‌باشد.

$$Y = -4 \times 10^{-05}x + 0.1279 \quad (28)$$

$$Y = -4 \times 10^{-05}x - 0.0032 \quad (29)$$

$$Y = -5 \times 10^{-05}x - 0.0342 \quad (30)$$

جدول 3 ضرایب نفوذ موثر رطوبت خشک شدن ضایعات غذایی را در سطوح مختلف دما و سرعت نشان می‌دهد مقادیر ضریب نفوذ موثر در دو دمای 50 و 60°C یکسان و کمتر از دمای 70°C می‌باشد. مقدار ضریب نفوذ موثر در دو دمای 50 و 60°C معادل $3/65 \times 10^{-9} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ و در دمای 70°C $4/56 \times 10^{-9} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ می‌باشد. که دلیل این امر این است که در دمای 70°C مقاومت غشایی سلول در اثر درجه حرارت بالا تخریب شده و این لایه غشایی از بین رفته و رطوبت می‌تواند از قسمت داخلی مواد به سطح خارجی انتقال یافته و سرعت خروج آن افزایش یابد. این امر سبب افزایش ضریب انتقال جرم داخلی یا همان ضریب نفوذ در مواد می‌شود. لویز و همکاران در سال 2000 ضریب نفوذ موثر رطوبت را برای ضایعات سبزیجات کلم و کاهو، برای ضخامت 1 تا 2 cm و در دماهای 50 تا 150°C در دستگاه خشک‌کن جریان متقاطع را در محدوده $6/03 \times 10^{-9}$ تا 10^{-8} $3/15$ اعلام کرده بودند (Lopez et al., 2000).

تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت

جهت محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت منحنی‌های $\text{Ln}(\text{MR})$ نسبت به زمان رسم شدند و رابطه‌های رگرسیونی خطی و ضریب شیب خطی آن‌ها تعیین گردید. شکل 5 نمودارهای $\text{Ln}(\text{MR})$ را در مقابل زمان نشان می‌دهد.

رابطه‌های رگرسیونی خطی شکل (5-الف) در سرعت $2 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ در رابطه‌های 22 و 24 به‌ترتیب برای دماهای 60 و 70°C با ضریب تبیین ($R^2 > 99\%$) به‌دست آمده است. نمودارهای $\text{Ln}(\text{MR})$ در دماهای 50 و 60°C دارای مقدار شیب خطی یکسان و کمتر از دمای 70°C می‌باشد.

$$Y = -4 \times 10^{-05}x + 0.0495 \quad (22)$$

$$Y = -4 \times 10^{-05}x - 0.0551 \quad (23)$$

$$Y = -5 \times 10^{-05}x - 0.0652 \quad (24)$$

همچنین رابطه‌های رگرسیونی خطی شکل (5-ب) در سرعت $1/5 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ در رابطه‌های 25 و 27 که به‌ترتیب برای دماهای 50 و 60°C با ضریب تبیین ($R^2 > 99\%$) به‌دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمودارهای $\text{Ln}(\text{MR})$ در دماهای 50 و 60°C دارای مقدار شیب خطی یکسان و کمتر از دمای 70°C می‌باشد.

$$Y = -4 \times 10^{-05}x + 0.0758 \quad (25)$$

$$Y = -4 \times 10^{-05}x - 0.0747 \quad (26)$$

$$Y = -5 \times 10^{-05}x - 0.0732 \quad (27)$$

جدول 3- ضرایب نفوذ رطوبت خشک شدن ضایعات غذایی در سطوح مختلف دما و سرعت

Table 3- Effective moisture coefficients of drying food waste at different levels of temperature and velocity

دما Temperature ($^\circ\text{C}$)	سرعت Velocity (ms^{-1})	ضریب نفوذ موثر رطوبت Effective Moisture coefficients (m^2s^{-1})
50	2	3.65×10^{-09}
60	2	3.65×10^{-09}
70	2	4.56×10^{-09}
50	1.5	3.65×10^{-09}
60	1.5	3.65×10^{-09}
70	1.5	4.56×10^{-09}
50	1	3.65×10^{-09}
60	1	3.65×10^{-09}
70	1	4.56×10^{-09}

سه دما دارای مقدار شیب خطی یکسان می‌باشند. در جدول 4 مقادیر انرژی فعال‌سازی نشان می‌دهد که در سه سطح سرعت انرژی فعال‌سازی یکسان است. مقدار این انرژی برای توده ضایعات غذایی در سه سرعت مقدار ثابت $10417/44 \text{ (J mol}^{-1}\text{)}$ به‌دست آمد که در محدوده انرژی فعال‌سازی ضایعات غذایی قرار دارد (Jo, Kim, Shin, Lee, & Yoo, 2017).

$$Y = -1253x - 15.594 \quad (31)$$

تعیین انرژی فعال‌سازی

انرژی فعال‌سازی با ترسیم $\text{Ln}(\text{Deff})$ نسبت به $1/T$ به‌دست می‌آید. شکل 6 نمودارهای $\text{Ln}(\text{Deff})$ نسبت به $1/T$ را نشان می‌دهد. رابطه‌های رگرسیونی خطی در سرعت‌های 1 ، $1/5$ و $2 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ در رابطه‌های (31)، (32) و (33) به‌ترتیب برای دماهای 50 ، 60 و 70°C با ضریب تبیین ($R^2 = 0.7665$) به‌دست آمد. رابطه‌ها در هر

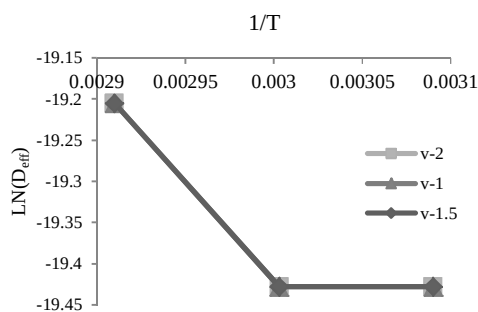
هواگذر جانبی و میانی باعث شد تا هوای گرم شده از زیر سینی خشک‌کن خارج شده و به فضای بالایی توده حرکت کند و حجم فضای بالایی توده را هم گرم کند. گرم شدن فضای بالایی سینی منجر به افزایش مصرف انرژی می‌شود که در دمای 70°C بیشترین مصرف انرژی را دارد که با نتایج محققان در این زمینه مشابیهت دارد (Ismail, Beyribey, & Doymaz, 2016; Motevali et al., 2012).

$$Y = -1253x - 15.594 \quad (32)$$

$$Y = -1253x - 15.594 \quad (33)$$

تعیین انرژی مصرفی

با توجه به شکل 7 میزان انرژی مصرفی در دمای 70°C و سرعت 2ms^{-1} متر بر ثانیه بیشترین مقدار را دارد و کمترین مقدار مربوط به دمای 50°C و سرعت 1ms^{-1} می‌باشد. وجود مجاری



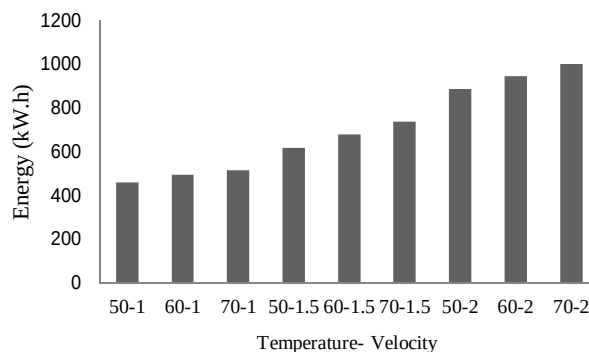
شکل 6- نمودارهای $\ln(D_{\text{eff}})$ نسبت به $1/T$

Fig. 6. Diagram of $\ln(D_{\text{eff}})$ relative to $1/T$

جدول 4- مقدار انرژی فعال‌سازی خشک شدن

Table 4- Activation energy values of drying

سرعت Velocity (ms^{-1})	شیب منحنی K	انرژی فعال‌سازی Ea(Jmol^{-1})
2	1253	10417.44
1.5	1253	10417.44
1	1253	10417.44



شکل 7- میزان مصرف انرژی در سطوح مختلف دما و سرعت

Fig. 7. Energy consumption at different levels of air temperature and velocity

آزمایش شد. نتایج نشان دادند که با افزایش دما مدت زمان خشک شدن کاهش یافته و تمام فرایند شدت خشک شدن در مرحله نزولی رخ داده است. فاکتورهای دما و برهمکنش سرعت و دما تاثیر

نتیجه‌گیری

دستگاه خشک‌کن ضایعات غذایی با موفقیت طراحی، ساخته و

معنی‌داری در خشک کردن داشتند. بیشترین شدت خشک شدن و کمترین زمان خشک شدن مربوط به دمای 70°C و سرعت 2ms⁻¹ می‌باشد. مصرف انرژی در دمای 50°C کمترین و در دمای 70°C بیشترین مقدار را دارد. مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت در دو دمای 50 و 60°C معادل 3/65×10⁻⁹ m²s⁻¹ و در دمای 70°C مقدار 4/56×10⁻⁹ m²s⁻¹ تعیین گردید و میزان انرژی فعال‌سازی برای توده ضایعات غذایی در سه سرعت مقدار ثابت 10417/44Jmol⁻¹ به‌دست آمد.

References

- Adzimah, K. S., & Seckley, E. (2009). Improvement on the design of a cabinet grain dryer. *American Journal of Engineering and Applied Science*, 2, 217-228. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2009.217.228>
- Al-Harashsheh, M., AL-Muhtaseb, A., & Magee, T. R. A. (2009). Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing*, 48, 524-531. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.06.010>
- Alibas, I. (2007). Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering*, 96, 495-502. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.12.011>
- Amiri Chayan, R., Khoshtaghaza, M. H., & Kianmehr, M. H. (2004). Design principle of experimental fluidized bed dryer for some agriculture products. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 5, 36-52. (in Persian).
- Arslan, D., & Ozcan, M. M. (2010). Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT-Food Science and Technology*, 43, 1121-1128. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.02.019>
- Ayadi, M., Mabrouk, S. B., Zouari, I., & Ahmed, B. (2014). Kinetic Study of the Convective Drying of Spearmint. *Journal of Saudi Society of Agriculture Sciences*, 13(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.04.004>
- Chaji, H., Ghasem zadeh, H., & Ranjbar, I. (2008). Effect of Pre- treatments Using Ethyl oleate, Hot & Warm Water on Drying Characteristics of Barberry. 5th National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Mashad. Iran. (in Persian).
- Ehiem, J. C. (2008). *Design and development of an indus-trial fruit and vegetable dryer*. Thesis report. University of Agriculture, Makurdi, Nigeria.
- Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of Eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.007>
- Ferreira, A. G., Gonçalves, L. M., & Miail, C. B. (2013). *Experimental analysis of industrial solid waste solar drying*. 22nd International Congress of Mechanical Engineering. Brazil.
- Gazor, H. R., Minaee, S., & Rostami, M. A. (2005). Influence of temperature and thickness on pistachio drying in batch dryers. *Journal of Agricultural Sciences*, 11, 81-93. (in Persian).
- Ghasemkhani, H., Rafiei, S., Kayhani, A., & Dalvand, M. B. (2018). Evaluation of drying apple slices using a rotary dryer equipped with a heat exchanger. *Journal of Agricultural Machinery Mechanical Research*, 7, 9-19. (in Persian).
- Ikem, I. A., Osim, A. D., Nyong, O. E., & Takim, S. A. (2016). Determination of loading capacity of a direct solar boiler dryer. *International Journal of Engineering and Technology*, 8, 1386-1396.
- İsmail, O., Beyribey, B., & Doymaz, I. (2016). Effect of drying methods on drying characteristics, Energy Consumption and Color of Nectarine. *Journal of Thermal Engineering Technical University Press*, 2, 801-806.
- Jo, J. H., Kim, S. S., Shin, J. W., Lee, Y. E., & Yoo, Y. S. (2017). Pyrolysis characteristics and kinetics of food wastes. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en10081191>.
- Kim, B. S., Kang, C. N., & Jeong, J. H. (2014). A study on a high efficiency dryer for food waste. *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 18, 153-158. <https://doi.org/10.9726/kspe.2014.18.6.153>.
- Lewis, M. J. (1990). *Physical Properties of Foods and Food Processing Systems*. Physical Properties of Foods and Food Processing Systems. Woodhead Publishing, U.K.
- Liu, Y., Peng, J., Kansha, Y., Ishizuka, M., Tsutsumi, A., Jia, D., Bi, X. T., Lim, C. J., & Sokhansanj, S. (2014). Novel fluidized bed dryer for biomass drying. *Fuel Processing Technology*, 122, 170-175. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.01.036>
- López, G. A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Vírveda, P. (2000). Thin-layer drying behavior of vegetable waste from wholesale market. *Drying Technology*, 18, 995-1006. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.01.036>
- Mazandarani, Z., Aghajani, N., Daraei Garmakhany, A., Bani Ardalani, M. J., & Nouri, M. (2017). Mathematical modeling of thin layer drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils: Various drying methods. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 19, 1527-1537.
- Montero, I., Miranda, M. T., Sepulveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., & S. Nogales. (2015). Solar dryer application for olive oil mill wastes. *Energies*, 8(12), 14049-14063. <https://doi.org/10.3390/en81212415>
- Motevali, A., Abbaszadeh, A., Minaei, M., Khoshtaghaza, M. H., & Ghobadian, B. (2012). Effective moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in thin-layer drying of JuJube (*Zizyphus JuJube* Mill). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 523-532.

23. Nijmeh, M. N., Ragab, A. S., Emish, M. S., & Jubran, B. A. (1998). Design and testing of solar dryers for processing food wastes. *Applied Thermal Engineering*, 18, 1337-1346. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00002-7)
24. Ogulata, R. T. (2004). Utilization of waste-heat recovery in textile drying. *Applied Energy*, 79, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.002>
25. Rostami Baroji, R., Seiedlou Heris, S. S., & Dehghannya, J. (2017). Mathematical simulation of heat and mass transfer in convectional drying of carrot, pretreated by ultrasound and microwave. *Journal of Agricultural Machinery*, 7, 97-113. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.38881>
26. Roustapour, O. R., Azimi, O., & Gazor, H. R. (2019). Computational fluid dynamics analysis in a corn air flow paddy dryer with two types of passing air flow of lateral and central patterns. *Journal of Biosystem Engineering*, 50, 115-128. (in Persian).
27. Roustapour, O. R., Maftoonazad, N., & Khaloahmadi, A. (2014). Study of drying kinetics and shrinkage of potato slices in a parallel flow dryer. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 12, 109-122. (in Persian).
28. Shin, H. S., & Youn, J. H. (2005). Conversion of food waste into hydrogen by thermophilic acidogenesis. *Biodegradation*, 16, 33-44. <https://doi.org/10.1007/s10531-004-0377-9>
29. Shirinbakhsh, M., & Amidpour, M. (2017). Design and optimization of solar- assisted conveyer-belt dryer for biomass. *Energy Equipment and Systems*, 5, 10-15. (in Persian).
30. Singh, P. R., & Heldman, D. R. (2009). *Introduction to Food Engineering*. Elsevier, USA.
31. Tun, M. M., & Juchelkova, D. (2019). Drying methods for municipal solid waste quality improvement in the developed and developing countries: A review. *Environmental Engineering Research*, 24(4), 529-542. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.327>.



Evaluation of a Chickpea Harvesting Header with Perforated Plate

A. Niazi¹, H. Golpira² , H. Samimi Akhijahani^{3*} 

1- Graduate student of Mechanics of Agricultural Machinery, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Assistant Professor of Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

3- Assistant Professor of Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69403.1028>

Received: 15-03-2021

Revised: 07-08-2021

Accepted: 01-09-2021

Available Online: 04-09-2021

How to cite this article:

Niazi, A., Golpira, H., & Samimi Akhijahani, H. (2022). Evaluation of a Chickpea Harvesting Header with Perforated Plate. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 481-495. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69403.1028>

Introduction

One of the biggest problems in growing legumes like peas is harvesting these types of crops. During the machine harvesting process the harvest loss is very high. Therefore, in most parts of Iran chickpea harvested by hand and this is very tedious. Based on the literature review there are different types of harvesting machines which designed, constructed and optimized by Miller *et al.*, 1990; Golpira, 2015; Shahbazi, 2011; Jalali and Abdi, 2014; Mahamodi, 2016. But using different varieties of chickpea in mountainous areas has limited the use of harvesting mechanisms. The purpose of this study is mechanization of the harvesting process of chickpea with low losses and suitable performance. Moreover the optimization process of lowering the weight of the header was carried out by modeling of software.

Materials and Methods

To reduce the amount of chickpea losses from the reel, a perforated plate with defined holes was installed in the header, where the separated chickpea pods fell behind the plate without returning to the farm. By using the plate in the header of the chickpea harvesting machine and by changing the harvesting height at the three levels of 10, 15 and 20 cm and the distance of the cutter at three levels of 3, 5 and 7 mm, the performance of the machine was evaluated. The experiments were carried out with *Caboli* variety cultivated in Kurdistan province, which is proper for mountainous areas without regular watering condition in three replications. The plants were placed in a fiber, wooden plate considering farm conditions. In addition, the header was modeled statically and dynamically under the influence of the external forces applied to the header using Ansys and Abaqus software. Based on the actual data, the validity of the applied model was determined and according to the verification results the optimization of the header was performed considering minimal weight (to reduce energy consumption).

Results and Discussion

The evaluation results of the performance of header showed that the effects of using perforated plate and the height of the header for harvesting on the chickpea harvesting and losses are significant at the level of 1% and 5%, respectively, and the interaction between perforated plate and the header height on the chickpea loss is significant at 5%. Using a perforated plate in the harvesting machine increases the amounts of chickpea collected from the farm increases. In this condition the chickpea pods separated from the plant and passed through the plate. With the separation of the stems, due to the proper wear that exists between the plate and the reel, the pods are properly separated and pass through the perforated plate. Moreover, the chickpea loss is higher for the system without perforated plate. The effect of the distance between the reel and header plate is affects the remaining chickpea on the plate. By increasing the distance from 5 mm to 7 mm the amount of harvested had a considerable effect. The best method of harvesting chickpeas is at the kinematic index of 1.5 with perforated plate, the harvesting height of 15 cm and the distance of 5 mm. According to modeling processes of the reel and the results of the static analysis, the minimum and maximum stress values were recorded about 3.31 MPa and 6.50 MPa (based on the von misses criteria), respectively, which is very small compared to the yield stress of the reel constructed with St-37. Also, the results of the dynamic analysis of the reel showed that the maximum von misses stress occurred with increasing the kinematic index. The maximum stress for kinematic index of 1, 1.5 and 2 was observed about 32.2, 40.1 and 52.72 MPa, respectively. The results of 3D model validation showed that the applied model with Abaqus software ($R^2 > 0.9264$) was able to predict the amount of stress in different parts of the reel.

Conclusion

In this study, the changes were made on the chickpea harvesting machine to get the proper performance and increasing machine efficiency. A perforated plate was used to prevent pea's losses. The best condition for the harvesting process is obtained with the harvesting height of 15 cm and the distance of 5 mm. By using 3D modeling of the reel weight was reduced about 10%.

Keywords: Loss, Modeling, Optimization, Perforated plate, Stress

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۴۹۵-۴۸۱

ارزیابی یک نوع چرخ‌فلک ماشین برداشت نخود با صفحه مشبک در دماغه

علی نیازی^۱، هیوا گل‌پیرا^۲، هادی صمیمی اخيجهانی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

چکیده

یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که در کشت بقولاتی مانند نخود وجود دارد، برداشت این محصولات با ریزش بسیار زیاد است. هدف از اجرای این پژوهش، برداشت مکانیزه نخود با تلفات کم و عملکرد مزرعه‌ای مناسب است. طراحی این ماشین به گونه‌ای است که همانند کمباین‌های متداول برداشت غلات قابلیت تنظیم موقعیت چرخ فلک نسبت به دماغه و تغییر ارتفاع را دارد. همچنین برای کاهش ریزش دانه ناشی از بازگشت محصول برداشت شده صفحه مشبکی به زیر چرخ فلک اضافه شد. در این تحقیق چرخ فلک برداشت نخود با هدف کاهش تلفات دانه مورد ارزیابی قرار گرفته و مدل سازی، تحلیل دینامیکی و استاتیکی چرخ فلک ماشین برداشت نخود انجام گرفته است. سامانه باز طراحی شده با تغییر عوامل تاثیرگذار شامل دماغه با صفحه مشبک و بدون صفحه مشبک، ارتفاع شانه برش نسبت به زمین در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متر و فاصله چرخ فلک از شانه در سه سطح ۳، ۵ و ۷ میلی متر در سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. نتایج آماری نشان داد، استفاده از صفحه مشبک تاثیر معنی داری در سطح یک درصد بر مقدار برداشت و ریزش داشته است اما در مورد نخود باقی مانده بر روی بوته این اثر در سطح ۵ درصد معنی دار شد. تاثیر ارتفاع دماغه از سطح زمین بر میزان برداشت در سطح ۵ درصد معنی دار بود. همچنین اثر متقابل ارتفاع برداشت و صفحه مشبک نیز بر میزان ریزش در سطح ۵ درصد معنی دار شد. بیشترین تاثیرگذاری بر نخود باقی مانده بر روی بوته در اثر فاصله بین چرخ فلک و دماغه به وجود آمد. علاوه بر آن برای بهینه سازی ابعادی اجزای چرخ و فلک از روش اجزای محدود سه بعدی با تحلیل تغییر شکل و شکست با معیار ون میسز (von-Mises) استفاده شد. به کمک مدل سازی رایانه‌ای و با توجه به تجزیه و تحلیل دینامیکی مدل جدیدی از چرخ فلک برای ماشین برداشت با هدف کاهش وزن، ارائه شد. در طرح ارائه شده با توجه به نیروی متقابل بین محصول و چرخ فلک ماشین برداشت نخود، میزان قابل توجهی از وزن چرخ فلک کاسته شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه سازی، تنش، ریزش، صفحه مشبک، مدل سازی

مقدمه

(Samineni, Siddique, Gaur, & Colmer, 2011). نخود منبع

اصلی پروتئین در کشورهای در حال توسعه است و نقش ویژه‌ای در تولید غذا را در این کشورها دارد (Anjum, 2016). با وجود این که ایران جزء بزرگ‌ترین کشورهای تولیدکننده نخود می باشد، اما همچنان برداشت آن با مشکل مواجه بوده و به صورت سنتی و با دست انجام می شود. علاوه بر آن برای مدیریت صحیح در برداشت نخود، کشاورز بایستی در تعیین زمان برداشت دقت کافی اعمال نماید (Konak, Carman, & Aydin, 2002). تلفات برداشت ماشین های برداشت در دو بخش دماغه و واحد کوبش اتفاق می افتد. واحد برش از دماغه تا حدود ۶۸ درصد از تلفات حین برداشت را به خود اختصاص می دهد (Ebrahimi-Nik, Khademolhosseini, Abbaspour-). Fard, Mahdini, & Alami-Saied, 2009). علاوه بر آن تاثیر سرعت پیشروی کمباین و سرعت دوران چرخ فلک نیز بایستی در تلفات دانه در زمان برداشت باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد

نخود با نام علمی سیسر آریتینوم (*Cicer Arietinum L.*) گیاهی است دولپه‌ای از خانواده بقولات که ارتفاع بوته‌ی آن در حدود ۳۰ سانتی متر است (Razavi, Zaerzadeh, Khafaji, & Pahlevani, 2010). این محصول به واسطه ارزش غذایی و پروتئین موجود در آن، تثبیت نیتروژن در زمین و درآمد آن برای کشاورزان بسیار مورد توجه است (Guler, Sait-Adak, & Ulkan, 2001).

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: h.samimi@uok.ac.ir)<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69403.1028>

عملکرد ماشین را افزایش می‌دهد. هیرای و همکاران (Hirai, Inoue, & Mori, 2004) به کمک سامانه‌ای نیروی وارده از سوی چرخ فلک کمباین برداشت غلات را که به ساقه محصول وارد می‌گردد، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها با آنالیز خمشی و پاسخ دینامیکی ساقه محصول، نیروهای افقی و عمودی را در دو حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده، بررسی نمودند. در حالت خمش ماکزیمم نیروی عکس‌العمل افقی هر بوته گندم ۳/۱ نیوتن و مقدار حداکثر آن در راستای عمودی ۰/۸ نیوتن به‌دست آمد. شبیه‌سازی (Shahbazi, 2011) با توسعه یک نوع سامانه ارزیابی، تأثیر صدمات ضربه‌ای که از دندان‌های چرخ‌فلک به ساقه نخود وارد می‌شود را بررسی نموده و نتایجی را در خصوص طراحی ماشین برداشت نخود ارائه کرد. گل‌پیرا و همکاران (Golpira, Tavakoli, & Baerdemaeker, 2013) بر اساس اصول غلاف چین‌ها نمونه‌ای نوین از ماشین برداشت نخود را ارائه نمود که در آن از مکانیزم دماغه مجهز به انگشتی‌های ثابت غلاف چین استفاده نموده بود. جلالی و عبدی (Jalali & Abdi, 2014) با بیان این‌که عملکرد مناسب مکانیزم برش از سرعت پیشروی، سرعت محیطی چرخ‌فلک، ارتفاع برش، رطوبت محصول و نوع محصول ناشی می‌شود، اثر شاخص سینماتیک و ارتفاع برش را بر افت دماغه کمباین مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین افت مربوط به بیش‌ترین شاخص سینماتیکی است. زارعی و عبدالله پور (Zareei & Abdollahpour, 2016) در تحقیق مشابه شبیه‌سازی سیستم کنترل فازی عصبی افت برای بهینه کردن تنظیمات هد کمباین غلات را انجام دادند. شاخص سینماتیکی، ارتفاع برش محصول، فاصله افقی و عمودی چرخ‌فلک از شانه‌برش عواملی بودند که برای بررسی انتخاب شدند. با بهینه‌سازی، مقادیر ۱/۲، ۱/۵ و ۲/۵ برای شاخص سینماتیکی چرخ‌فلک، ارتفاع برش محصول و مسافت افقی و عمودی چرخ‌فلک از شانه برش به‌دست آمد و تلفات کمباین به میزان قابل‌توجهی (۱۰۳ کیلوگرم در هکتار) کاهش یافت. محمودی (Mahmoudi, 2016) چرخ‌فلک مخصوص دماغه غلاف چین نخود را طراحی نمود که با پیشروی ماشین در مزرعه، انگشتی‌های ثابت غلاف چین در ارتفاع مماس با سطح زمین به داخل محصول ایستاده نفوذ می‌کرد. هم‌زمان با پیشروی ماشین پره‌های چرخ‌فلک غلاف‌چین که تحت فشار فنرهای پیچشی بودند، بوته نخود را به سمت شانه غلاف‌چین هدایت کرده و با اعمال فشار به بوته از لغزش محصول در شانه ممانعت به‌عمل می‌آمد. گل‌پیرا و گل‌پیرا (Golpira & Golpira, 2017) مدل‌سازی فرا ابتکاری برای بهینه‌سازی ماشین برداشت نخود انجام دادند که استفاده از آن باعث کاهش زمان، هزینه، آزمایش‌های مزرعه و تحلیل‌های آماری می‌شد. ترکیب الگوریتم ژنتیک با مدل فازی و الگوریتم محاسباتی ترکیبی ایجاد نمود که از طریق آن، بهترین اندازه

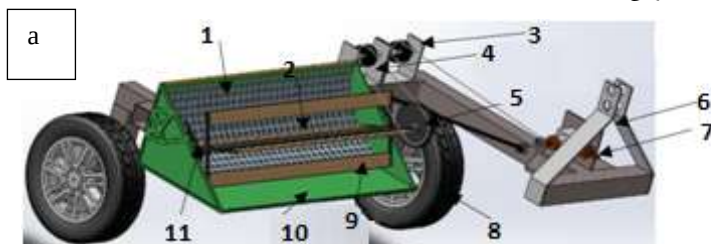
(Griffin, 1973). از طرف دیگر مشکلاتی از قبیل عدم یکنواختی در رسیدگی، ناهموار بودن زمین، کوتاه بودن بوته و خشک بودن بیش از حد آن هنگام برداشت، کشت گسترده محصول را محدود می‌سازد (Zobeiri, Rostampour, Rezvanivand Fanaei, & Nikbakht, 2020; Modares Motlagh, Rostampour, & Mardani, 2018; Singh, Gaur, Singh, & Chaturvedi, 2018). محققان تاکنون اقدامات زیادی برای ساخت ماشین‌برداشت نخود انجام داده‌اند، اما هنوز ماشینی که بتواند این محصول را با تلفات قابل‌قبول به‌خصوص در مناطق کوهستانی برداشت نماید ارائه نداده‌اند و در مناطق زیادی از کشور برداشت این محصول هنوز با دست انجام می‌گیرد. برداشت نخود به‌صورت دستی با کندن بوته از خاک همراه با ریشه انجام می‌شود که این نوع برداشت معایبی دارد (Golpira, Tavakoli, Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, 2009; Behrooz-lar & Huang, 2002; Modares Motlagh et al., 2018; Sidahmed & Jaber, 2004). ۱- با کندن بوته همراه با ریشه، نیتروژنی که می‌تواند توسط ریشه در خاک تثبیت شود، از دسترس خارج می‌شود. ۲- پس از جدا کردن دانه از کاه و کلش مواد باقی‌مانده به دلیل داشتن ازت زیاد در ریشه و همچنین خاک، برای تعلیف دام مناسب نیستند. ۳- هزینه برداشت به دلیل هزینه کارگری، بسیار بالا و طاقت‌فرساست؛ بنابراین چین استنباط می‌شود که روش سنتی کندن بوته از زمین روش مناسبی برای برداشت نخود نباشد. همان‌طور که اشاره شد، از آنجا که محصول نخود در مرحله رسیدگی و به هنگام برداشت مستعد ریزش می‌باشد، چالش عمده کشاورزان به حداقل رساندن تلفات حاصل از برداشت است. به‌طور غالب در ماشین‌های برداشت دانه برای هدایت محصول به سمت دستگاه برش از مکانیزم چرخ‌فلک استفاده می‌کنند. ساختار چرخ‌فلک متناسب با نوع و شرایط محصول و همچنین نوع دستگاه برداشت می‌تواند متفاوت باشد. اغلب چرخ‌فلک‌های به کار رفته در ماشین‌های برداشت از نوع پره‌ای و یا انگشتی‌دار است. در این نوع چرخ‌فلک‌ها سرعت دورانی و موقعیت قرارگیری چرخ فلک نسبت به سکوی برش، از عوامل قابل‌تغییر در چرخ‌فلک هستند. سرعت دورانی چرخ‌فلک با سرعت پیشروی ماشین برداشت رابطه مستقیم دارد. در بیشتر شرایط محصول، نسبت سرعت محیطی چرخ‌فلک به سرعت پیشروی کمباین بین ۱/۲۵ تا ۱/۵۰ متغیر است (Mansori-Rad, 2006; Dehghan-Hesar & Kalantari, 2019; Srivastava, Goering, Rohrbach, & Buckmaster, 2006; Golpira, 2015).

تحقیقات محدودی در زمینه طراحی و ساخت و حتی نحوه تغییر مکانیزم‌ها برای برداشت نخود انجام شده است. میلر و همکاران (Miller, Wright, Mailander, & Beard, 1990) یک نوع چرخ فلک با ساختار مثلی با زوایای یکسان به جای نوع ثابت را روی ماشین برداشت ارائه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این مکانیزم

محصول به طور قابل توجهی کاهش می یابد. با مطالعه تحقیقات پیشین این نوع مکانیزم برای محصولاتی نظیر گندم و جو به دلیل اتصال پایدار بخش بارده به ساقه امکان پذیر نیست. بنابراین در این تحقیق تأثیر متغیرهای ورودی آزمایش شامل صفحه مشبک، ارتفاع دماغه و فاصله افقی چرخ فلک نسبت به کف دماغه بر عملکرد سامانه (میزان افت و ریزش) انجام گرفته و یک ترکیب بهینه از پارامترها بر اساس بهترین کارکرد دستگاه ارائه شده است. علاوه بر آن، مدل سازی سامانه هم زمان با تغییر شاخص سینماتیکی با استفاده از نرم افزار Ansys برای حالت استاتیکی و Abaqus برای حالت دینامیکی انجام شده و بهینه ترین حالت با در نظر گرفتن میزان تنش و کرنش چرخ فلک و با هدف کاهش وزن دستگاه و تغییر در ابعاد چرخ فلک، معرفی شد. انتظار می رود استفاده از این سامانه تا حد زیادی بتواند به برداشت محصول با کمترین ریزش و بیشترین عملکرد کمک کند.

مواد و روش ها

برای انجام این پژوهش ماشین بردارنده پشت تراکتوری طراحی شده توسط گلپیرا و همکاران (Golpira et al., 2009) که قابلیت تنظیم ارتفاع را داشته و تنظیم ارتفاع چرخ فلک به گونه ای متناسب با ارتفاع ساقه ی محصول تغییر می نمود، مورد استفاده قرار گرفت. همان طور که اشاره شد یکی از مهم ترین مشکلاتی که بر سر راه برداشت نخود به خصوص در مناطق کوهستانی مانند کردستان وجود دارد، ریزش محصول است. در ماشین بردارنده طراحی شده این امر به طور واضح بیان شده است (Zandiye, 2016). صفحه مشبک مورد نظر بر روی شانه برش و در امتداد انحنای چرخ و فلک قرار داده شد. در سامانه قبلی با برخورد چرخ و فلک به بوته غلاف نخود از بوته جدا شده و به قسمت انتهایی مخزن دماغه حرکت می کرد. به دلیل سرعت زیاد چرخ فلک برای ضربه و سایش غلاف ها به بیرون از دماغه پرتاب می شدند. علاوه بر آن در برخی مواقع به دلیل رطوبت کم بوته ها در مزرعه، غلاف ها همراه با ساقه ها وارد دماغه شده و یا در اثر دوران چرخ فلک به صورت کامل از دماغه به سمت بیرون پرتاب می شوند.



شکل ۱- الف) شماتیک ماشین بردارنده نخود ۱. صفحه توری دار، ۲. محور میانی، ۳. جعبه دنده تغییر سرعت، ۴. مکانیزم تسمه و پولی، ۵. پولی و محور، ۶. مالیند، ۷. شفت تواندهی، ۸. چرخ های حامل، ۹. چرخ فلک، ۱۰. دماغه، ۱۱. بازوی تنظیم، ب) نحوه برداشت محصول برای آزمایش ها

Fig. 1. a) Schematic of Chickpea harvesting machine, 1. Perforated plate, 2. Middle axis, 3. Speed change gearbox, 4. Belt and pulley mechanism, 5. Pulley and axle, 6. Belt, 7. Power shaft, 8. Carrier wheels, 9. Reel, 10. Header, 11. Adjustment arm b) The harvesting process for the experiments

سکوی برش جهت توسعه ماشین برداشت نخود پیش بینی شد. مردانی (Mardani, 2016) مشکلات برداشت نخود را در ایران، فصل رشد کوتاه و تنش های خشکی وارده بر گیاه (که موجب خوابیدگی و افزایش حساسیت به ریزش می گردد)، بیان نموده است؛ او با بررسی رفتار و خصوصیات نخود، استفاده از دماغه های لخت کننده را گزینه مناسبی جهت برداشت محصول نخود پیشنهاد داده است. زندیه (Zandiyeh, 2016) در بررسی تلفات ماشین برداشت غلات بیان نمود که بیشترین میزان افت مربوط به دماغه است؛ او با کاهش تلفات دماغه و کاهش ریزش دانه اقدام به طراحی و پیاده سازی سامانه کنترل سرعت دورانی چرخ فلک به صورت حلقه بسته نمود. با استفاده از حسگر مافوق صوت تراکم محصول را اندازه گیری نموده و به دنبال آن سرعت دورانی چرخ فلک تنظیم گردید.

یکی دیگر از عواملی که بر افزایش توان مورد نیاز در برداشت محصول و حتی میزان ریزش محصول تأثیر می گذارد، سنگین بودن وزن دستگاه است که این امر موجب محدود شدن میزان قدرت عمل سامانه، پرش محصول و ارتعاشات نامتعارف در هنگام برداشت می گردد (Tieppo, Romanelli, Milan, Sorensen, & Bochtis, 2019). در مناطق کوهستانی مانند کردستان به دلیل محدودیت های آبی که در چند سال اخیر به وجود آمده است، نخود به طور عمده به صورت دیم کشت می شود. بنابراین کشت رقم پاکوتاه در این منطقه به دلیل مقاومت به کم آبی بیشتر از گونه های دیگر در اولویت قرار دارد. این عامل باعث شده است که استفاده از مکانیزم های مشابه برای برداشت محدود گردد. همان طور که اشاره شد یکی از مشکلات مهم در برداشت نخود، ریزش محصول است. در این تحقیق با استفاده از افزودن یک صفحه مشبک به دماغه ماشین بردارنده نخود، سعی در کاهش میزان ریزش و افزایش بهره وری سامانه خواهد شد. در این حالت غلاف نخود با جدا شدن از ساقه و با حرکت چرخ فلک از سوراخ های صفحه عبور کرده و به سمت عقب دماغه منتقل می شود. علاوه بر آن ساقه محصول که غلاف ها به آن متصل هستند، با سایش پره های چرخ فلک از ساقه جدا شده و احتمال پرتاب یا ریزش

$$\lambda = \frac{r n \pi}{30 V_f} \quad (۱)$$

که در آن r شعاع چرخ فلک، n سرعت دوران چرخ فلک و V_f سرعت انتقالی چرخ فلک یا سرعت پیشروی تراکتور است. برای ارزیابی ماشین، شاخص سینماتیکی در سطح پیشنهاد شده $۱/۵$ با سرعت $۲/۵$ کیلومتر بر ساعت (Zandiye, 2016)، ارتفاع شانه برش نسبت به زمین در سه سطح ۱۰ ، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و فاصله چرخ فلک از شانه در سه سطح ۳ ، ۵ و ۷ میلی‌متر در دو حالت با صفحه مشبک و بدون صفحه مشبک، در سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. سطوح انتخاب شده برای ارتفاع برداشت بر اساس میانگین بیشترین و کمترین ارتفاع قرارگیری غلاف نخود کابلی از زمین در نظر گرفته شد. همچنین خصوصیات هندسی غلاف نخود نیز مبنای تعیین سطوح فاصله عمودی از کف دماغه لحاظ گردید. آزمون برداشت در شرایط رسیدگی کامل محصول نخود با رطوبت حداکثر ۱۴ درصد انجام گرفت. ارزیابی‌ها شامل تعیین میزان ریزش، غلاف‌های باقی‌مانده روی بوته و برداشت محصول با استفاده از آزمایش فاکتوریل بر مبنای طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد.

محاسبات برداشت بر مبنای شمارش تعداد غلاف‌های نخود صورت گرفت. به عبارت دیگر تعداد غلاف‌هایی که داخل سینی سکوی برش قرار می‌گرفت به‌عنوان محصول برداشت‌شده در نظر گرفته شد. غلاف‌هایی که از بوته جدا شده اما داخل سینی قرار نگرفتند، به‌عنوان محصول تلف‌شده در محاسبات وارد شدند. در نهایت تعداد غلاف‌هایی که روی بوته نخود باقی مانده‌اند به‌عنوان محصول مانده لحاظ گردید. این تلفات در مزرعه یک تلفات واقعی و مؤثر است و با تلفات ناشی از ریزش دانه در زمان کندن بوته از زمین، جمع بسته شده است. تلفات در این سامانه به دو بخش تقسیم می‌گردد؛ بخش اول مربوط به تلفات غلاف‌های جامانده بر روی ساقه و بخش دوم غلاف‌های نخود که برداشت شده اما به دماغه منتقل نشده و به هر دلیلی ریزش کرده‌اند. به این ترتیب میزان درصد تلفات کل، تلفات غلاف‌های باقی‌مانده روی بوته و تلفات غلاف‌های افتاده بر روی زمین به‌ترتیب از روابط (۲)، (۳) و (۴) محاسبه گردید (Golpira et al., 2013):

$$H(\%) = \frac{p_c}{p_r + p_f + p_c} \times 100 \quad (۲)$$

$$L_r(\%) = \frac{p_r}{p_r + p_f + p_c} \times 100 \quad (۳)$$

$$L_f(\%) = \frac{p_f}{p_r + p_f + p_c} \times 100 \quad (۴)$$

که در آن H ، درصد برداشت محصول، L_r درصد تلفات مربوط به غلاف‌های باقی‌مانده بر روی بوته (%)، L_f درصد تلفات مربوط به غلاف‌های افتاده بر روی زمین (%، p_c تعداد غلاف‌های برداشت شده

بر این اساس برای کاهش ریزش و بهبود عملکرد سامانه از یک صفحه مشبک استفاده شد. در این حالت غلاف یا ساقه جدا شده از بوته فرصت زیادی برای ساییده شدن و قرار گرفتن در دماغه را داشته و با احتمال پایینی به بیرون انتقال می‌یابد. قسمت‌های مختلف ماشین بردارنده نخود در شکل ۱-الف نشان داده شده است. برای تنظیم فاصله عمودی چرخ فلک از کف دماغه در دو طرف چرخ فلک دو بخش تلسکوپی در نظر گرفته شده است که با حرکت چرخ فلک به سمت بالا و پایین این فاصله قابل تنظیم است. همچنین ارتفاع دماغه نیز با تنظیم‌کننده‌های متصل شده به چرخ‌های حامل امکان‌پذیر بود.

ارزیابی آزمایشگاهی

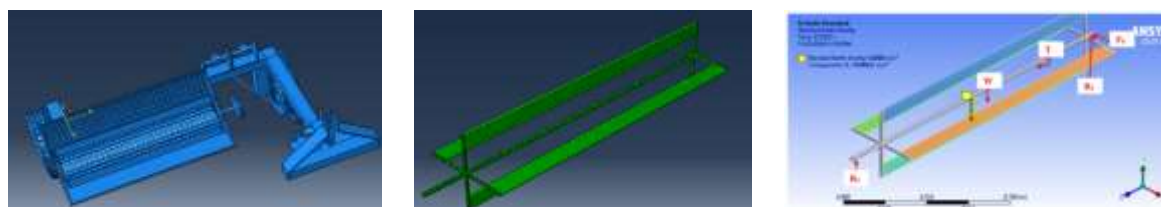
ماشین بردارنده نخود طراحی شده، تحت شرایط کاری تعریف‌شده در محیط کارگاه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه کردستان مورد ارزیابی قرار گرفت. از مزرعه تحقیقاتی کشاورزی دانشگاه کردستان واقع در روستای دوشان از توابع شهرستان سنندج ۵۰۰ بوته نخود به‌طور تصادفی از مزرعه‌ای انتخاب شدند. رقم نخود کشت‌شده کابلی با رطوبت ۱۴ درصد و عملکرد ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بود. به منظور ایجاد شرایط مزرعه‌ای در کارگاه، بوته‌های انتخاب‌شده روی یک نئوپان قرار داده شدند. نحوه قرارگیری بوته‌ها بر روی صفحه مشابه الگوی رویش بوته‌ها در مزرعه بود (شکل ۱-ب). بوته‌ها با استفاده از مخلوط چسب زیپر (Zipper, ZC02M, Tabriz, Iran) بر روی صفحه ثابت می‌شدند طوری که می‌توانست همان نیروی کششی مربوط به خاک که به ریشه وارد می‌شد ($۵۳/۲ \pm ۰/۵$ کیلوگرم نیرو) را تأمین نموده و بوته به حالت ایستاده بدون تمایل به طرفین روی صفحه قرار گیرد. برای این کار از نیروسنج FD-564 با دقت یک درصد استفاده گردید. برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر چرخ فلک و پره‌های آن از گشتاورسنج Luron, 8800-Q با دقت $۰/۱$ کیلوگرم سانتی‌متر استفاده شد که قابلیت اتصال به رایانه را داشته و با توجه به نمودارهای ترسیمی، بیشترین مقدار مبنای ارزیابی با نرم‌افزار قرار داده شد. به‌منظور تأمین شاخص سینماتیکی در حین برداشت، نئوپان حاوی بوته‌های نخود به‌وسیله تراکتور در سرعت‌های مشخص به چرخ و فلک ماشین برداشت تغذیه شد و هم‌زمان عملیات برداشت نخود انجام گرفت. مسیر حرکت پره‌های چرخ فلک نسبت به جهت پیشروی ماشین برداشت نخود و شعاع دوران چرخ فلک، منحنی سیکلوئیدی را تشکیل می‌دهند (Baruah & Panesar, 2005). برای توصیف رابطه بین سرعت پیشروی ماشین و سرعت دورانی از اصطلاحی به نام شاخص سینماتیکی (λ) استفاده می‌گردد که عبارت است از نسبت سرعت خطی چرخ فلک به سرعت پیشروی ماشین و با استفاده از رابطه (۱) به‌دست می‌آید (Hanna & Quick, 2007):

پارامتر بررسی شد: ۱- ابعاد پره یا ضخامت پره ۲- سطح مقطع اتصال پره به میله وسط ۳- سطح مقطع میله وسط. مدل سازی با در نظر گرفتن عوامل محیطی شامل سرعت پیشروی، سرعت دورانی و نیروهای وارد شده از بوته ها انجام پذیرفت. به دلیل نیروهای مضاعفی که بر سامانه وارد می شود تمرکز بیشتر روی تحلیل دینامیکی سامانه بود. هرچند برای اطمینان، تحلیل استاتیکی نیز صورت پذیرفت. تحلیل استاتیکی چرخ فلک با استفاده از نرم افزار انسیس (Ansys-v19) و تحلیل دینامیکی از نرم افزار آباکوس (Abaqus-v18) انجام شد. در هر کدام از نرم افزارهای اشاره شده از روش اجزای محدود سه بعدی استفاده شد. برای پره ها مش هگزاهدرال به میانگین ۵ میلی متری و برای میله چرخ فلک مش هرمی میانگین ۴ میلی متر انتخاب شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. شتاب گرانش در همه تحلیل ها 9.81 m.s^{-2} در نظر گرفته شد. محل های اتصال با قیدهای ال-ام و با قید tie به هم درگیر و متصل شدند. خواص فیزیکی و مکانیکی مواد استفاده شده در چرخ فلک در جدول ۱ برای استفاده در تحلیل های نرم افزاری لیست شده است. هم چنین در شکل ۲ برآیند کل نیروهای حجمی (وزن) تمام اجزای چرخ فلک در شکل با W نشان داده شده است. این نیرو توسط دو نیروی عکس العمل R_1 و R_2 در یاتاقان های نگه دارنده محور تحمل می شوند. در شرایط کاری چرخ فلک، گشتاور ورودی T_0 (برحسب نیوتون متر) از طریق پولی به محور چرخ فلک اعمال می گردد و هم چنین نیروی کشش F_b ناشی از کشش تسمه و عکس العمل کشش تسمه در یاتاقان R_x بر محور چرخ فلک وارد می شوند.

توسط دماغه ماشین نخود، p_f تعداد غلاف های باقی مانده روی بوته، p_f تعداد غلاف های افتاده بر روی زمین می باشد. قبل از انجام آزمایش های برداشت در کارگاه ابتدا متغیرهای مستقل مانند سامانه با و بدون صفحه مشبک، ارتفاع و فاصله افقی چرخ فلک از شانه برش تنظیم شدند. برای تعیین دور محور تواندهی و دور محور چرخ فلک از یک دورسنگ دیجیتال (P2795-PeackTech, Taiwan) با دقت 0.1° دور بر دقیقه و صحت ۵ درصد استفاده شد. در این بخش با تنظیم گاز تراکتور، دو پارامتر سرعت پیشروی و سرعت محور تواندهی که ارتباط مستقیم با سرعت محیطی چرخ فلک دارد تنظیم می شد. به منظور تعیین سرعت پیشروی تراکتور مسافت ۳۰ متر علامت گذاری شد. سپس در دنده های مختلف با تغییر دور موتور از طریق گاز دستی تراکتور سرعت پیشروی مورد نظر تنظیم شد.

مدل سازی (تحلیل استاتیکی و دینامیکی)

یکی از مواردی که بر میزان مصرف انرژی، قدرت مانورپذیری و میزان ریزش محصول در هنگام برداشت تأثیر می گذارد، وزن سامانه برداشت است. افزایش وزن دستگاه نه تنها باعث افزایش نیروی مالیندی (انرژی مصرفی) می گردد، بلکه باعث کاهش قابل محسوس عملکرد بردارنده و مصرف بیشتر سوخت می شود. در این تحقیق مدل سازی چرخ فلک با هدف تعیین تغییر شکل بیشینه پره ها و کاهش وزن انجام گرفت. تغییر شکل زیاد پره ها باعث آسیب به سامانه یا نخود برداشت شده می شود. میزان تغییرات کرنش و تنش تحت اثر سرعت دورانی چرخ فلک و سرعت پیشروی با توجه به تغییر در سه



شکل ۲- مش بندی چرخ فلک و نیروهای وارد شده به آن با در نظر گرفتن نیروهای درونی و خارجی

Fig. 2. Meshing of reel and the forces applied to it considering internal and external forces

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی میله و پره های چرخ فلک

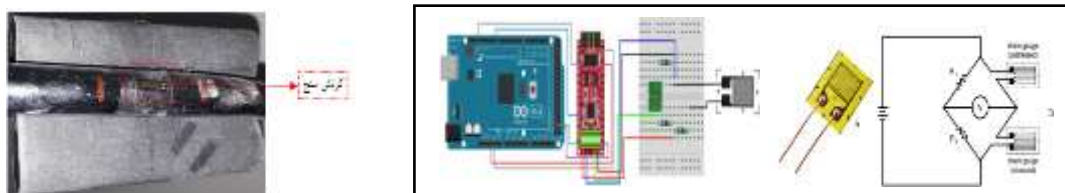
Table 1- Physical and mechanical properties of rod and paddles of reel

جنس مواد	نسبت پواسون	چگالی (kg.m^{-3})	مدول الاستیسیته (MPa)
Material type	Poisson's ratio	Density	Elasticity modulus
فولاد	0.3	7830	205
Steel			
چوب	0.27	1000	0.7
Wood			

ضریب طراحی با استفاده از رابطه (۵) با تقسیم تنش طراحی σ_d بر تنش محاسباتی σ_c به‌دست آمد (Shigley, 2011):

$$SF = \frac{\sigma_d}{\sigma_c} \quad (5)$$

برای پی بردن به دقت مدل‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار بایستی درستی نتایج به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور از یک مورد و چند کرنش‌سنج که در محل‌های مورد نظر روی چرخ‌فلک نصب می‌شدند، استفاده گردید. شماتیک کرنش‌سنج‌ها و طریقه نصب آن روی قطعه در شکل ۳ نشان داده شده است. میزان تنش وارد شده در قسمت‌های مختلف شامل محور وسط و میله‌های اتصال بودند. نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار با نتایج به‌دست آمده از آزمایش کرنش‌سنج مورد مقایسه قرار گرفته و دقت شبیه‌سازی حاصل شد.



شکل ۳- شماتیک مدار استفاده شده برای صحت‌سنجی و کرنش‌سنج قرار گرفته روی قطعه برای اندازه‌گیری میزان تنش
Fig. 3. The schematic of circuit and strain gages to measure the stress of the part

نتایج و بحث

مشیک حداقل به میزان ۴/۵ درصد باعث کاهش ریزش می‌گردد. ارتفاع بردارنده نیز در سطح ۵ درصد بر ریزش دستگاه بردارنده تاثیر می‌گذارد. اما در این حالت نیز فاصله چرخ‌فلک از کف دماغه بر میزان برداشت معنی‌دار نمی‌باشد. اثر متقابل متغیرهای صفحه مشبک و ارتفاع بردارنده بر میزان ریزش در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. اما اثرات دوگانه صفحه مشبک با فاصله چرخ‌فلک و ارتفاع بردارنده با فاصله و اثر سه‌گانه بر میزان ریزش محصول معنی‌دار نیست. نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرها نشان داد که وجود صفحه مشبک بر میزان نخود باقی‌مانده بر روی بوته در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. اثر فاصله چرخ‌فلک از کف بردارنده نیز در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. به عبارت دیگر تغییر این فاصله تاثیر زیادی بر میزان بر محصول باقی‌مانده به دلیل کنده شدن غلاف از بوته دارد. اثر چندگانه بر محصول باقی‌مانده بر روی بوته نخود در هیچ کدام از سطوح یک و ۵ درصد معنی‌دار نیست.

در این بخش از معیار ون میسز (von-Mises) برای تحلیل شکست در مجموعه استفاده شد. ویژگی‌های نرم‌افزار کمک می‌کند تا بتوان از یک طرف شرایط بحرانی را مورد بررسی قرار داد و از سوی دیگر آن را بهینه نمود. مدل طراحی شده تحت شرایط بحرانی (بیشترین تعداد بوته درگیر ۲۷۳/۵ نیوتن، بیشترین گشتاور پیچشی ۹۷۴/۴ کیلوگرم-سانتی‌متر، بالاترین سرعت دورانی ۲۹۴/۴ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲/۵ کیلومتر بر ساعت) قرار گرفته و در نهایت بهترین مدل با حداقل هزینه و بالاترین راندمان عمل ارائه می‌شود. در تحلیل سامانه از تنش طراحی (حداکثر تنش) که می‌تواند یک جسم تحمل کند تا از تنش تسلیم عبور نکند) استفاده شد. برای فولاد St 37، مدول الاستیسیته ۲۰۵ گیگاپاسکال، تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال در محاسبات لحاظ شد. در بهینه‌سازی وزنی معیار ضریب اطمینان ۳/۲ در نظر گرفته شد که معیار مناسبی برای طراحی است.

در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اثرات پارامترهای مختلف چرخ‌فلک بر مقدار نخود برداشت شده، نشان داده شده است. میزان برداشت محصول با استفاده از سامانه بردارنده نخود در یک آزمایش فاکتوریل ۳×۳ با طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار بررسی شد. بررسی نتایج نشان داد که وجود صفحه مشبک در سامانه تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد در برداشت محصول داشت. همچنین تغییرات ارتفاع دماغه بر میزان برداشت محصول در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. اثر متغیر دیگر یعنی فاصله چرخ‌فلک از شانه برش به تنهایی معنی‌دار نبوده است. اثر متقابل دوگانه و سه‌گانه متغیرهای اشاره بر میزان برداشت محصول نیز معنی‌دار نبود. به عبارت دیگر با تغییرات همزمان متغیرهای اشاره شده میزان برداشت محصول تغییر محسوسی نداشت. علاوه بر آن در جدول ۲ اثر وجود یا عدم وجود صفحه مشبک بر ریزش نخود در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. وجود صفحه

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثرات پارامترهای مختلف چرخ فلک بر مقدار نخود برداشت شده، باقی مانده روی بوته و ریزش یافته

Table 2- The results of analysis variance of the effects of different parameters of the header on the amount of harvested chickpea, chickpea loss and residual chickpea on the plant

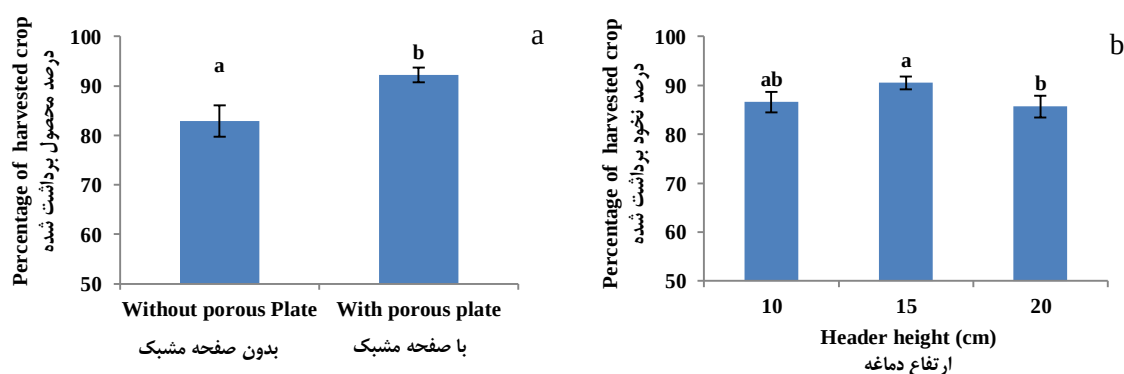
منابع تغییرات		درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-value
Source of variances		DF	Sum of squares	Mean squares	
نخود برداشت شده Harvested Chickpea	صفحه مشبک Perforated plate	1	0.0417	0.0417	129.53**
	ارتفاع دماغه Header height	2	0.00601	0.00301	9.34*
	فاصله چرخ فلک Reel distance	2	0.0048	0.00024	0.75
	صفحه مشبک × ارتفاع دماغه Header height×Perforated plate	2	0.355	0.00177	5.51
	صفحه مشبک × فاصله چرخ فلک Reel distance×Perforated plate	2	0.0098	0.00049	1.52
	ارتفاع دماغه × فاصله چرخ فلک Reel distance×Header height	4	0.0015	0.00004	0.12
	صفحه مشبک × ارتفاع دماغه × فاصله افقی چرخ فلک Reel distance× Header height×Perforated plate	4	0.0053	0.0025	1.12
	Error خطا	27	0.0101	-	-
	Total مجموع	44	0.43421	-	-
	مقدار ریزش نخود Chickpea Loss	صفحه مشبک Perforated plate	1	0.02452	0.02452
ارتفاع دماغه Header height		2	0.00098	0.00049	10.8*
فاصله چرخ فلک Reel distance		2	0.0016	0.00008	1.75
صفحه مشبک × ارتفاع دماغه Header height×Perforated plate		2	0.00093	0.00046	10.28*
صفحه مشبک × فاصله چرخ فلک Reel distance×Perforated plate		2	0.00008	0.00004	0.9
ارتفاع دماغه × فاصله چرخ فلک Reel distance×Header height		4	0.00064	0.00016	3.52
صفحه مشبک × ارتفاع دماغه × فاصله چرخ فلک Perforated plate× Header height× Reel distance		4	0.00722	0.0007	0.152
Error خطا		27	0.0016	-	-
Total مجموع		44	0.03757	-	-
نخود مانده روی بوته Residual Chickpea on the Plant		صفحه مشبک Perforated plate	1	0.00169	0.00169
	ارتفاع دماغه Header height	2	0.00075	0.00038	3.85
	فاصله چرخ فلک Reel distance	2	0.00502	0.00251	25.77**
	صفحه مشبک × ارتفاع دماغه Header height×Perforated plate	2	0.00056	0.00028	2.88
	صفحه مشبک × فاصله چرخ فلک Reel distance×Perforated plate	2	0.00049	0.00024	2.51
	ارتفاع دماغه × فاصله چرخ فلک Reel distance×Header height	4	0.00129	0.00032	3.32
	صفحه مشبک × ارتفاع دماغه × فاصله چرخ فلک Reel distance× Header height×Perforated plate	4	0.0013	0.002	1.952
	Error خطا	27	0.0012	-	-
	Total مجموع	44	0.0124	-	-

** بسیار معنی دار (در سطح ۱٪)؛ *: Significant at level 1%؛ * معنی دار (در سطح ۵٪)؛ * Significant at level 5%

در هر دو حالت امکان بازگشت غلاف یا ساقه به مزرعه تا حد زیادی کاهش می‌یابد. این میزان برداشت برای حالت با صفحه مشبک به صورت میانگین ۹۲/۲۵ درصد بود. از طرف دیگر با افزایش ارتفاع دماغه بردارنده از ۱۰ سانتی‌متر به ۱۵ سانتی‌متر میزان برداشت افزایشی شده و سپس در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. این روند افزایشی و کاهشی شاید به این دلیل باشد که با در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر حجم بیشتری از ساقه وارد دماغه شده و امکان جدایش به دلیل انباشت زیاد بوته نخود کاهش یافته و احتمال بازگشت یا پرتاب بوته به بیرون از دماغه افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر به دلیل پاکوتاه بودن و دیمی بودن واریته، غلاف‌ها بدون برداشته شدن در مزرعه باقی‌مانده و از دسترس خارج می‌گردد. در تحقیقات مشابه نیز موارد اشاره شده گزارش شده است (Golpira et al., 2013; Zareei & Abdollahpour, 2013).

در شکل‌های ۴ تا ۶ مقایسه میانگین اثرات صفحه مشبک، ارتفاع دماغه و فاصله چرخ فلک از دماغه بر میزان برداشت، ریزش و مقدار نخود باقی‌مانده بر روی بوته نشان داده شده است که جداگانه در مورد هر شکل توضیحاتی ارائه می‌گردد.

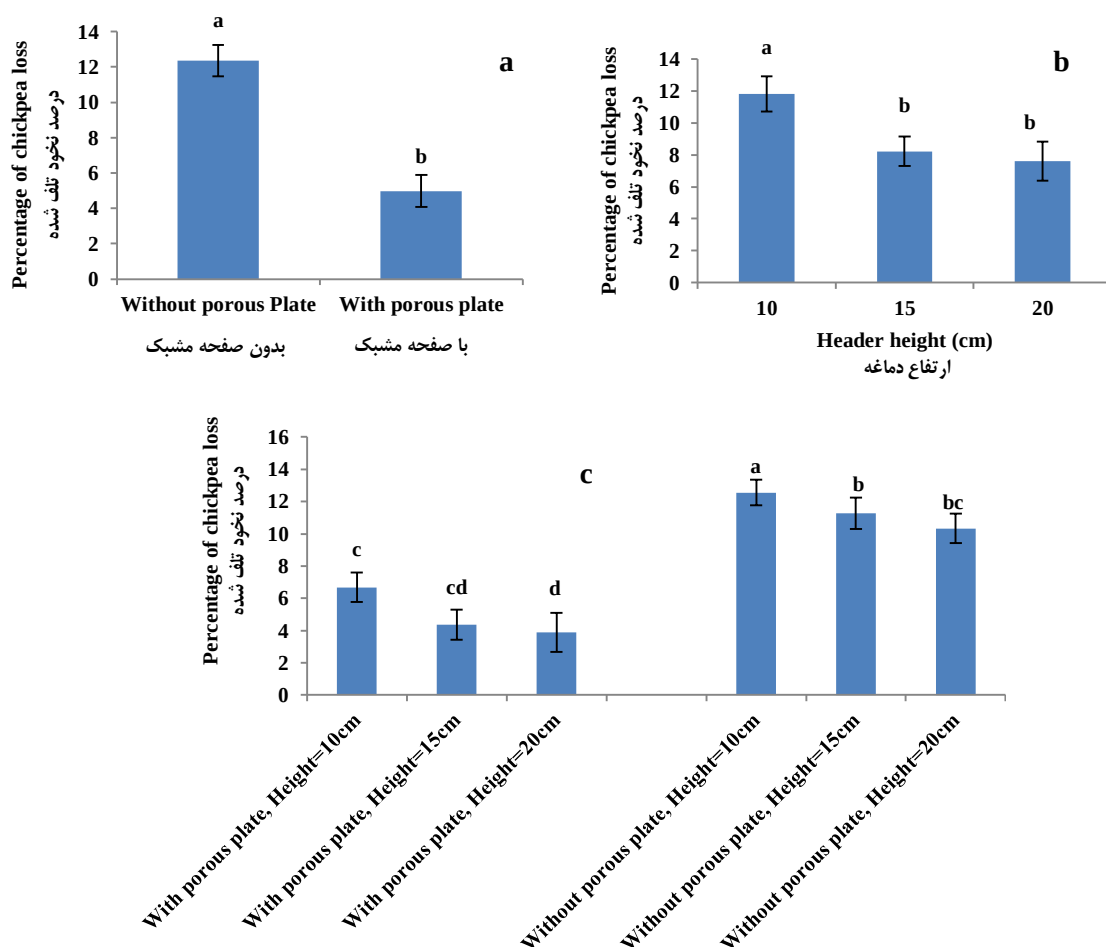
اثرات وجود و عدم وجود صفحه مشبک و ارتفاع دماغه از سطح زمین بر شاخص‌های برداشت در شاخص سینماتیک ۱/۵ نشان داد که میزان محصول برداشت شده در این حالت با صفحه مشبک بیشتر از حالتی است که صفحه مشبک موجود نیست. همان طور که اشاره شد این اثر معنی‌دار و به عبارتی تأثیر زیادی دارد. در این حالت با جدایش غلاف‌ها از بوته مستقیماً غلاف به صورت احتمالی در یکی از سوراخ‌های صفحه جای گرفته و در قسمت پشت صفحه مشبک جمع‌آوری شده و از آنجا خارج می‌شود. علاوه بر آن حتی با جدایش ساقه‌ها به دلیل سایش مناسبی که بین صفحه و پره چرخ فلک وجود دارد غلاف‌ها به خوبی جدا شده و از شبکه توری مانند عبور می‌کنند.



شکل ۴- مقایسه میانگین (a) اثرات وجود یا عدم وجود صفحه مشبک و (b) ارتفاع دماغه بر درصد محصول برداشت شده
Fig. 4. Comparison of the mean effects of a) the perforated plate and b) header height on the percentage of harvested crop

۲۰ سانتی‌متر چون ساقه کمتری نسبت به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر وارد سامانه می‌شود، بنابراین میزان ریزش کاهش می‌یابد. میزان تغییرات درصد ریزش بین ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر معنی‌دار نیست. در مطالعه دیگر، نتیجه مشابه گزارش برای حالت دیگری از ماشین برداشت نخود ارائه شده است که با افزایش ارتفاع برداشت میزان ریزش افزایش می‌یابد (Golpira et al., 2013).

در شکل ۵ مقایسه میانگین اثرات صفحه مشبک و ارتفاع دماغه بر پارامترهای برداشت در شاخص سینماتیک ۱/۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، مقدار نخود ریزش شده و صفحه مشبک ارتباط مستقیم با هم دارند. به طوری که در تیمارهایی که صفحه مشبک در سامانه وجود ندارد، مقدار ریزش محصول بیشینه است. بیشترین مقدار آن در حالت بدون صفحه مشبک در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد (۱۲/۵۸ درصد). در حالت بدون شبکه با ارتفاع

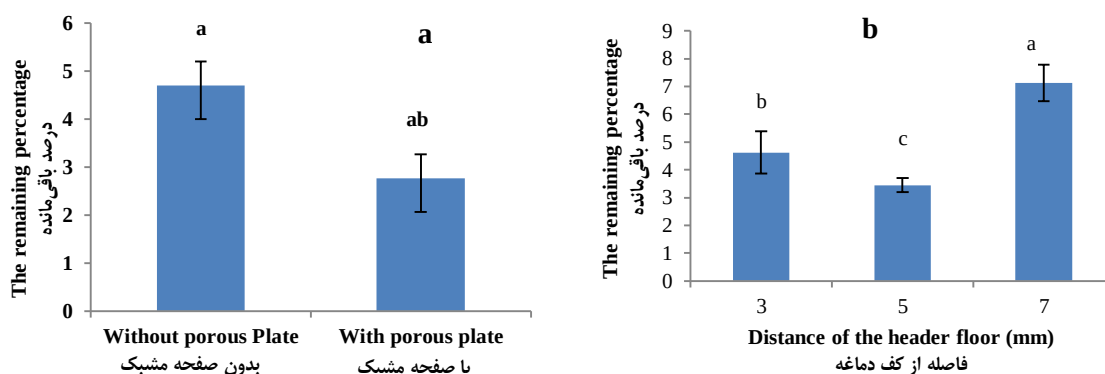


شکل ۵- مقایسه میانگین اثرات (a) وجود یا عدم وجود صفحه مشبک و (b) ارتفاع دماغه و (c) اثر متقابل آن‌ها بر متغیرهای بر درصد ریزش محصول

Fig. 5. Comparison of the mean effects of a) perforated plate, b) header height and c) the interactions on the percentage of chickpea loss

غلاف به راحتی از زیر چرخ فلک رها شده و اگر چنانچه شکستگی رخ ندهد بر روی بوته باقی می ماند. از طرف دیگر با فاصله ۳ میلی متر احتمال شکستگی محصول نخود دور از انتظار نخواهد بود. بنابراین با توجه به مقادیر برداشت، ریزش و باقی مانده محصول روی بوته می توان چنین اظهار داشت که بهترین ترکیب برای برداشت با این سامانه، استفاده از صفحه مشبک در ارتفاع برداشت ۱۵ سانتی متر و فاصله بین چرخ فلک و دماغه به اندازه ۵ میلی متر اتفاق می افتد. در این حالت میزان برداشت، ریزش و باقی مانده روی غلاف ۹۴/۶۱ درصد، ۳/۶۱ درصد و ۱/۷۸ درصد می باشد.

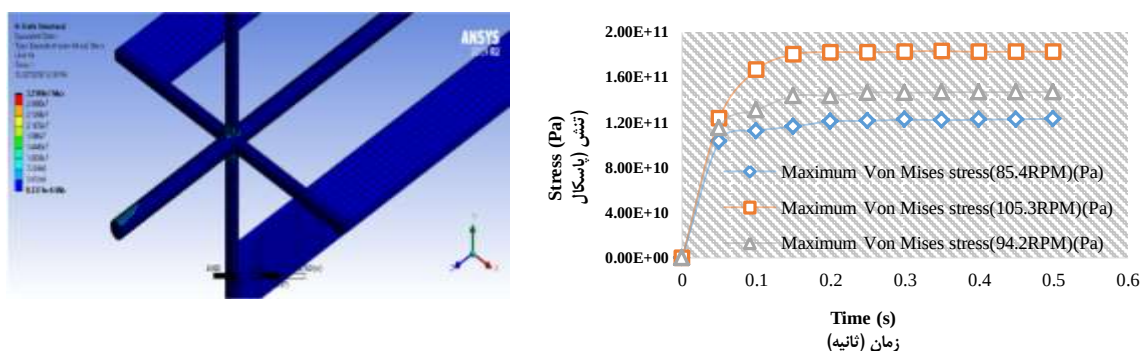
در شکل ۶ (الف و ب) مقایسه میانگین اثرات صفحه مشبک و فاصله چرخ فلک از کف دماغه بردارنده در شاخص سینماتیک ۱/۵ نشان داده شده است که اثر هر کدام از موارد اشاره شده بر محصول باقی مانده بر روی بوته به ترتیب در سطح ۵ و یک درصد معنی دار است. با قرار دادن صفحه مشبک در سامانه، به دلیل وجود سایش در هنگام برداشت، به خصوص برای بوته های با ارتفاع بیشتر از ۱۵ سانتی متر، ساقه بر روی صفحه مشبک خوابانده شده و با برخورد چرخ فلک با ساقه قسمت اعظمی از غلاف ها کنده می شوند. همچنین میزان محصول باقی مانده بر روی بوته با افزایش فاصله از کف دماغه برداشت، افزایش می یابد. اما اختلاف بین دو فاصله ۳ و ۵ میلی متر معنی دار نمی باشد. بیشترین میزان محصول باقی مانده در فاصله ۷ میلی متر، اتفاق می افتد و مقدار آن ۷/۱۲ درصد بود. در این فاصله



شکل ۶ - مقایسه میانگین اثرات (a) صفحه مشبک و (b) فاصله از کف دماغه بر درصد محصول باقی‌مانده بر روی بوته
Fig. 6. Comparison of the mean effects of the a) perforated plate and b) distance of the header floor on the percentage of chickpea remaining on the plant

برخوردار است. در منابع دیگر نیز برای حالت استاتیکی ماشین‌ها، مقادیر ضریب اطمینان بیشتر از ۲ به‌عنوان نقطه امن در نظر گرفته شده است (Srivastava et al., 2006). مقدار بیشینه تنش ایجاد شده در چرخ فلک در محل اتصال به دماغه به دلیل وزن آن اتفاق می‌افتد. همچنین در شکل ۷ نمودارهای همگرایی در مقدار تنش بیشینه ایجادشده در چرخ فلک به ازای مقادیر مختلف شاخص سینماتیک نشان داده شده است. پاسخ‌های تنش بیشینه در بازه زمانی ۰/۵ ثانیه همگرا شدند.

در این قسمت نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل تنش در چرخ فلک ماشین برداشت نخود مورد بحث قرار می‌گیرد. ابتدا نتایج تحلیل استاتیکی و سپس نتایج تحلیل دینامیکی ارائه می‌گردد. در شکل ۷ نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار Ansys برای تحلیل استاتیکی چرخ فلک نشان داده شده است. مقدار کمینه تنش ۳/۳۱ و بیشینه تنش ۶/۵۰ مگاپاسکال بود که مقدار بیشینه تنش در مقایسه با تنش تسلیم دماغه خیلی کوچک است. لذا ضریب اطمینان دماغه تحت بارگذاری استاتیکی بسیار بالا بوده و دماغه از استحکام کافی



شکل ۷ - همگرایی در تنش ماکزیمم بر اساس معیار ون میسز در مقادیر مختلف سرعت دورانی چرخ فلک و کانتورهای تنش حاصل از تحلیل استاتیکی چرخ فلک

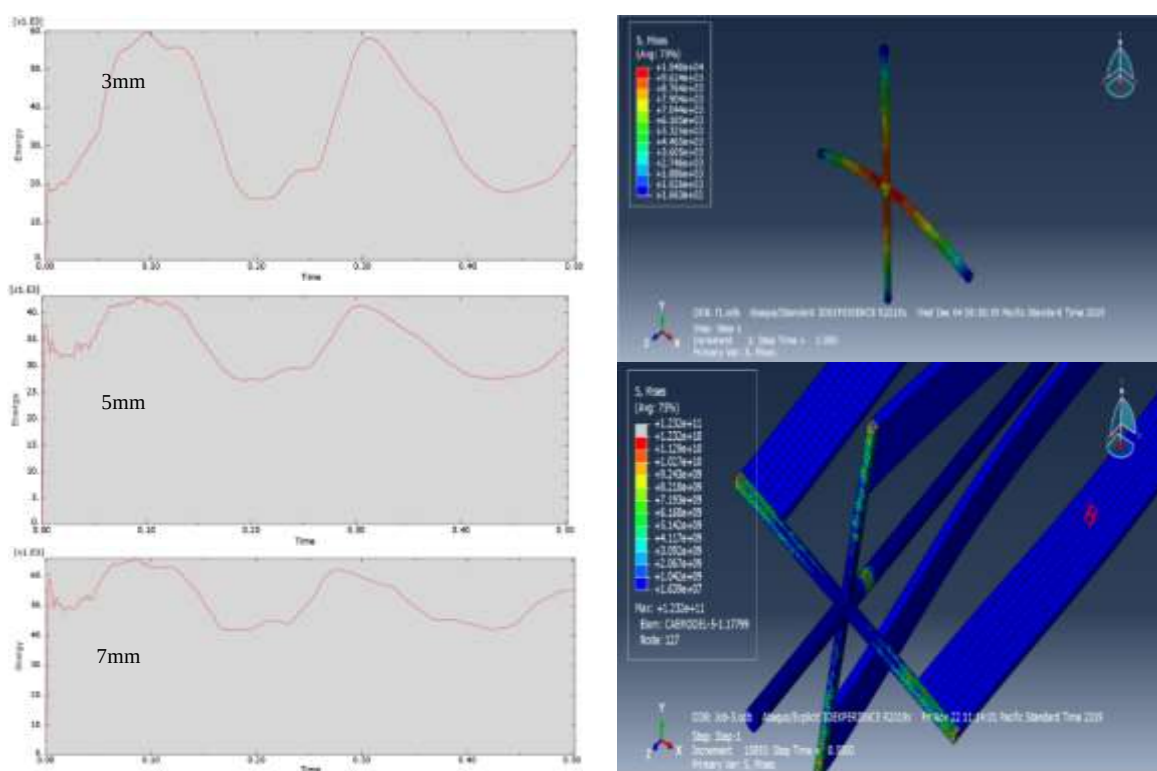
Fig. 7. Convergence in maximum stress based on Von Mises criterion in the rotational speed of the reel and stress contours obtained from the static analysis the reel

که مقدار بیشینه در فاصله عمودی ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر به‌ترتیب برابر با ۳۲/۲، ۴۰/۱ و ۵۲/۷ مگاپاسکال مشاهده شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با کاهش فاصله عمودی، نیروی اعمالی به پره‌ها افزایش یافته، میزان تنش ایجاد شده در چرخ فلک نیز افزایش می‌یابد. بنابراین فرآیند بهینه‌سازی تا حدی انجام شد که کم‌ترین میزان تنش

در شکل ۸ تغییرات تنش بر پایه معیار ون میسز و کرنش در چرخ فلک و اجزای آن با تغییر سرعت دورانی اعمال شده بر آن نشان داده شده است. کمترین میزان کرنش و تنش با رنگ آبی و بیشترین آن با رنگ قرمز مشخص شده است. بیشینه تنش ون میسز ایجادشده در چرخ فلک با افزایش شاخص سینماتیک افزایش یافت. به‌طوری

قاب چرخ فلک مشاهده شد لذا به طور جداگانه قاب چرخ فلک تحلیل شد. بیشینه تنش برشی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است بیشینه تنش که بر قاب وارد می شود ۱۰/۴۸ مگا پاسکال است که مقدار آن نسبت به تنش تسلیم قاب خیلی کمتر است. با توجه به نتایج مدل سازی و آنالیز دینامیکی چرخ فلک با تغییر سرعت دورانی و حرکت، قطر میله وسط از ۱۸ به ۲۵ میلی متر تغییر یافت اما ابعاد پره تغییر محسوسی نکرد. علاوه بر آن ضخامت پره ها از ۱۸ به ۱۳ میلی متر و ابعاد میله های اتصال دهنده پره ها به شفت میانی از سطح مقطع ۲۰ در ۲۰ میلی متر مربع به ۱۲ در ۱۴ میلی متر مربع و به صورت تصحیح شده ۱۰ در ۲۰ میلی متر مربع تغییر یافت.

و کرنش در آن ایجاد گردد. بیشترین میزان تنش ون میسر مربوط به قسمت اتصال پره ها و قاب نگه دارنده پره ها بود؛ به عبارت دیگر قاب نگه دارنده به دلیل اعمال نیرو از طرف پره ها همواره در معرض بیشینه تنش برشی قرار دارد. تنش برشی در محل تماس پره های چرخ فلک ۲۲/۷ مگا پاسکال می باشد. کرنش ایجاد شده به ازای مقادیر بیشینه تنش برشی در محل وسط پره ها و مقدار آن برابر با ۰/۳۰۴٪ مشاهده شد. آنالیز دینامیکی پره های چرخ فلک نشان داد که بیشترین تغییر طول مربوط به لبه های پره ی چرخ فلک است که مقدار آن در انتهای خارجی بیشتر است و بیشترین جابه جایی یا کش آمدگی را دارد. این امر به دلیل نیروی گریز از مرکز و نیروی وارد از سمت بوته ها به پره های چرخ فلک بود. با توجه به این که بیشینه تنش برشی در محل



شکل ۸- توزیع تنش برشی و خمشی در میله ها و پره های چرخ فلک و تغییرات انرژی جنبشی در چرخ فلک در ۱/۵ دور گردش چرخ فلک در شاخص سینماتیک ۱/۵ برای فاصله عمودی ۳، ۵ و ۷ میلی متر

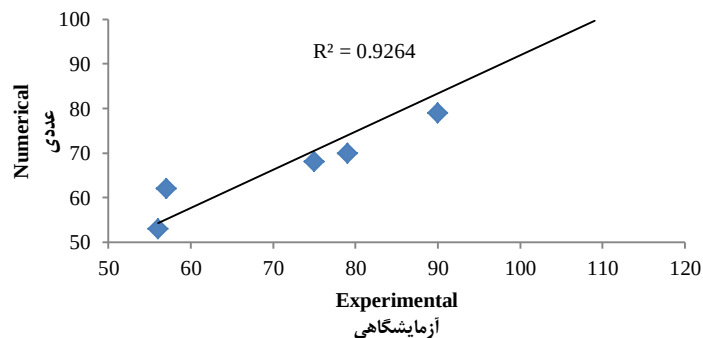
Fig. 8. Distribution of shear and bending stress in the rods and blades of the reel and variations of kinetic energy in the reel in 1.5 rounds of rotation via kinematic index of 1.5 for vertical distance of 3, 5 and 7 mm

شده در آنالیز یک قطعه که با نرم افزار صورت گرفته مطابقت دارد (Li, Chen, Zhang, & Tong, 2013). لازم به ذکر است خطای به وجود آمده در نرم افزار آباکوس شاید به دلیل ایده آل در نظر گرفتن ویژگی های فیزیکی و مکانیکی مصالح استفاده شده در سامانه باشد. ویژگی های محیطی نیز از دیگر عواملی است که می تواند باعث به وجود آمدن خطا در نتایج آزمایشگاهی باشد. علاوه بر آن با ارزیابی

نتیجه حاصل از اعتبارسنجی مدل سه بعدی (با استفاده از کرنش سنج ها) در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که مدل سازی انجام شده با نرم افزار آباکوس به خوبی ($R^2 > 0.9264$) توانسته است میزان تنش در قسمت های مختلف چرخ فلک را پیش بینی کند؛ بنابراین نتایج به دست آمده برای تنش و بهینه سازی با قطعیت بالای ۹۲ درصد اعتبار دارند که با مقادیر اشاره

یابد. تاثیر عامل اشاره شده بایستی به صورت عملی نیز در مزرعه مورد بررسی قرار گیرد.

های انجام شده و با توجه به میزان کاهش وزن سامانه و مقاومت غلتشی، توان مورد نیاز برای کشش سامانه به اندازه حداقل ۲/۷۶ اسب بخار کاسته می‌شود. انتظار می‌رود میزان مانورپذیری نیز بهبود



شکل ۹- میزان همبستگی داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های عددی حاصل از نرم‌افزار آباکوس

Fig. 9. The correlation between experimental and numerical data obtained from Abaqus software

نتیجه‌گیری

فاصله بین چرخ‌فلک و کف دماغه به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار بودند. با کم شدن فاصله گیرایی بین محصول و چرخ‌فلک افزایش یافته و احتمال باقی‌مانده محصول بر روی بوته به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. بهینه‌ترین حالت برای برداشت نخود با سامانه با صفحه مشبک، در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و فاصله ۵ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج مدل‌سازی دینامیکی چرخ‌فلک، قطر میله وسط از ۱۸ به ۲۵ میلی‌متر تغییر یافت. علاوه بر آن، ضخامت پره‌ها از ۱۸ به ۱۳ میلی‌متر و ابعاد سطح مقطع میله‌های اتصال‌دهنده پره‌ها به شفت میانی از ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر مربع به ۱۲ در ۱۴ میلی‌متر مربع و به صورت تصحیح شده ۱۰ در ۲۰ میلی‌متر مربع تغییر پیدا نمود. پیشنهاد می‌شود برای بهبود کارایی سامانه تغییری در اندازه و تعداد سوراخ‌های صفحه و زاویه قرارگیری آن صورت گیرد.

در این تحقیق برای عملکرد مناسب و افزایش کارایی سامانه، تغییراتی روی ماشین برداشت نخود شامل ساختار و وزن سامانه انجام شد. نتایج آماری نشان داد تاثیر پارامترهای مستقل صفحه مشبک، ارتفاع برداشت بر میزان درصد برداشت محصول به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار است. با توجه به نتایج آنالیز واریانس و نمودارهای مقایسه میانگین‌ها بیشترین مقدار برداشت محصول در حالت با صفحه مشبک و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد. همچنین تاثیر صفحه مشبک و ارتفاع برداشت به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار شدند. اثر متقابل صفحه مشبک و ارتفاع بردارنده نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. با افزودن صفحه مشبک به دلیل سایش مناسب بین چرخ‌فلک و صفحه، میزان ریزش در مزرعه کاهش یافت. در مورد محصول باقی‌مانده بر روی بوته نیز صفحه مشبک و

References

1. Anjum, N. A. (2016). Book Review: *Legumes under environmental stress: yield, Improvement and adaptations*. Frontiers in Plant Science. Wiley and Sons.
2. Baruah, D. C., & Panesar, B. S. (2005). Energy requirement model for a combine harvester, part I: Development of component models. *Biosystems Engineering*, 90(1), 9-25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.08.017>
3. Behrooz-Lar, M., & Huang, B. K. (2002). Design and development of chickpea combine. *Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*, 33(1): 35-38.
4. Dehghan-Hesar, H., & Kalantari, D. (2019). Design and Evaluation of Two New Biomimetic Blades for Reducing the Shear Energy Required for Cutting Herbal Plants. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(2), 265-278. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.69843>
5. Ebrahimi-Nik, M. A., Khademolhosseini, N., Abbaspour-Fard, M. H., Mahdini, A., & Alami-Saied, K. (2009). Optimum utilisation of low-capacity combine harvesters in high-yielding wheat farms using multi-criteria decision making. *Biosystems Engineering*, 103(3), 382-388. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.009>
6. Golpira, H., Tavakoli, T., Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, S. (2009). Mechanical properties of chickpea to design of harvesting machines. *Agricultural Science*, 19 (2), 23-31.
7. Golpira, H., Tavakoli, T., & Baerdemaeker, J. D. (2013). Design and development of a chickpea stripper

- harvester. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(4), 929-934. <http://doi.org/10.5424/sjar/2013114-3393>
8. Golpira, H. (2015). Redesign and evaluation of chickpea harvester. *Journal of Biosystems Engineering*, 40(2), 102-109.
9. Golpira, H., & Golpira, H. (2017). Soft simulator for redesigning of a chickpea harvester header. *Computers and Electronics in Agriculture*, 135: 252-259. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.018>
10. Griffin, G. A. (1973). *Fundamentals of machine operation: combine harvesting*. John Deere Service Publications.
11. Guler, M., Sait-Adak, M., & Ulkan, H. (2001). Determining relationships among yield and some yield components using path coefficient analysis in chickpea. *European Journal of Agronomy*, 14(2), 161-166. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00086-1)
12. Hanna, H. M., & Quick, G. R. (2007). *Grain harvesting machinery design*. Handbook of farm, dairy and food machinery (Kutz M, edn). William Andrew Inc, Delmar, NY: 93-111.
13. Hirai, Y., Inoue, E., & Mori, K. (2004). Application of a quasi-static stalk bending analysis to the dynamic response of rice and wheat stalks gathered by a combine harvester reel. *Biosystems Engineering*, 88(3), 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.010>
14. Jalali, A., & Abdi, R. (2014). The effect of ground speed, reel rotational speed and reel height in harvester losses. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 5(2), 221-231.
15. Konak, M., Carman, K., & Aydin, C. (2002). Physical properties of chickpea seeds. *Biosystems Engineering*, 82(1), 73-78. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0053>
16. Li, M., Chen, D., Zhang, S., & Tong, J. (2013). Biomimetic design of a stubble-cutting disc using Finite Element Analysis. *Journal of Bionic Engineering*, 10(1): 118-127. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(13\)60206-1](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60206-1)
17. Mahmoudi, K. (2016). *Design, development and evaluation of a chickpea stripper header*. Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanadaj, Iran. (in Persian).
18. Mansori-Rad, D. (2006). *Tractors and agricultural machinery* (Volume II). Bu-Ali Sina University Press.
19. Mardani, K. (2016). *Design, manufacturing and evaluation of a chickpea harvesting machine*. Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. (in Persian).
20. Miller, M. D., Wright, M. E., Mailander, M. P., & Beard, J. (1990). A two-link harvester reel. *Applied Engineering in Agriculture*, 6(2), 131-137.
21. Modares Motlagh, A., Rostampour, V., & Mardani, K. (2018). Design, fabrication and evaluation of a short-legged chickpea harvest machine. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 49, 83-94. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.236196.664962>
22. Razavi, S. M. A., Zaerzadeh, E., Khafaji, N., & Pahlevani, M. (2010). Some physical properties of seeds and splits of Desi chickpea (Kaka var). *Iran Journal Pulses Research*, 1(1): 77-83. <https://doi.org/10.22067/ijpr.v1i1.6357>
23. Samineni, S., Siddique, K. H. M., Gaur, P. M., & Colmer, T. D. (2011). Salt sensitivity of the vegetative and reproductive stages in chickpea (*Cicer arietinum* L.): Podding is a particularly sensitive stage. *Environmental and Experimental Botany*, 71(2), 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.12.014>
24. Shahbazi, F. (2011). Impact damage to chickpea seeds as affected moisture content and impact velocity. *Applied Engineering in Agriculture*, 27(5), 771-775. <http://doi.org/10.13031/2013.39557>
25. Shigley, J. E. (2011). *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw-Hill.
26. Sidahmed, M., & Jaber, N. (2004). The design and testing of a cutter and feeder mechanism for the mechanical harvesting of lentils. *Biosystems Engineering*, 88, 295-304. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.002>
27. Singh, U., Gaur, P., Singh, G., & Chaturvedi, S. J. F. M. F. P. (2018). *Mechanical Harvesting of Chickpea: Agronomic Interventions*. 196.
28. Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., & Buckmaster, D. R. (2006). Engineering principles of agricultural machines. *Engineering Principles of Agricultural Machinery*, 3, 325-402. <https://doi.org/10.13031/epam.2013>
29. Tieppo, R. C., Romanelli, T. L., Milan, M., Sorensen, C. A. G., & Bochtis, D. (2019). Modeling cost and energy demand in agricultural machinery fleets for soybean and maize cultivated using a no-tillage system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 282-292. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.032>
30. Zandiyeh, S. 2016. *Design, development and evaluation of an automatic system to control the reel speed of the grain combine harvester*. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanadaj, Iran. (in Persian).
31. Zareei, S., & Abdollahpour, Sh. (2016). Modeling the optimal factors affecting combine harvester header losses. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(2), 60-65.
32. Zobeiri, M., Rostampour, V., Rezvanivand Fanaei, A., & Nikbakht, A. M. (2020). Experimental and numerical investigation of deviation blade effect on sedimentation chamber performance in chickpea harvesting machine. *Iranian Biosystems Engineering*, 51, 329-339. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.276317.665166>



Energy Flow Simulation of the Uneven Span Glass Greenhouse with Special Structure using Computational Fluid Dynamics (CFD)

F. Motazedian¹, M. Taki^{2*}, R. Farhadi³, M. Rahmati- Joneidabad⁴

1- MSc Student, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

2- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

3- Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

4- Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(*- Corresponding Author Email: mtaki@asnruk.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70400.1038>

Received: 13-05-2021

Revised: 04-07-2021

Accepted: 13-07-2021

Available Online: 13-07-2021

How to cite this article:

Motazedian, F., Taki, M., Farhadi, R., & Rahmati- Joneidabad, M. (2022). Energy Flow Simulation of the Semi-double Glass Greenhouse with Special Structure using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 497-513. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.70400.1038>

Introduction

Greenhouse cultivation is the popular intensive kind of crop production with a yield per cultivated unit area more than 10 times higher compared to field crops. Greenhouse production requires the use of large amounts of energy, water, and pesticides and it usually generates huge quantities of wastes to be disposed of it. Investment, labor, and energy costs per unit area are much higher in the greenhouse industry than in any other agricultural sectors. Sustainable greenhouse systems, socially supportive, commercially competitive, and environmentally sound, depend on cultivation techniques, equipment management, and constructive materials that aim to reduce agrochemicals, energy and water consumption as well as waste generation. The management of the greenhouse environment is depending on temperature manipulation. Temperature manipulation is critical to influencing plant growth, quality, and morphology and so is a major strategy in the environmental modification of crops. Heterogeneous indoor microclimate of a greenhouse has long become a matter of concern in many studies. It is believed to be unfavorable for crop growth, which damages crop activity, particularly transpiration and photosynthesis, one of the major causes of non-uniform production and quality. Since early and conventional methods are not sufficient to evaluate microclimate variables inside a greenhouse, Computational Fluid Dynamics (CFD) approach was applied for better and more accurate results. CFD is an effective numerical analysis technique to predict the distribution of the climatic variables inside cultivation facilities. Numerous studies have focused on the internal temperature, humidity, solar radiation, and airflow inside multiple cultivation facilities. For example, the CFD method was used to simulate natural ventilation for agricultural buildings and improve crop production systems. The CFD simulation and evaluation models could be applied for evaluation of the inside situation and temperature in greenhouses. Thermal and water vapor transfer is influenced by the openings of greenhouses in the CFD simulation. The CFD model was developed to predict the distribution of temperature, water vapor, and CO₂ occurring in a Venlo-type semi-closed glass greenhouse equipped with air conditioners. Based on the above literature, this research aims to evaluate the energy flow and modeling of an un-even semi-buried greenhouse using external and internal variables and numerical solutions by the CFD method.

Materials and Methods

In this study, Computational Fluid Dynamic (CFD) solution was applied to evaluate the inside environment of a semi-double glass greenhouse with an east-west location. This greenhouse has a special structure that is used in very hot or very cold areas due to its depth of more than one meter below the ground. The greenhouse has an area of 38m² and an air volume of 78.8m³. The temperature and humidity data were collected from inside and outside the greenhouse by temperature sensors (SHT 11 model made by CMOS USA). Irradiation data were collected inside the greenhouse, on level ground, by the TES132 radiometer.

Results and Discussion

In this study, the CFD method was used for a model solution with ANSYS Fluent version 2020R2 software. To evaluate the predictive capability of the model and its optimization, the comparison between actual (y_a) and predicted values (y_p) was used. Three criteria of RMSE, MAPE, and R^2 were also used to evaluate the accuracy of the final model. The results showed that the dynamic model can accurately estimate the temperature of the air inside the greenhouse at a height of 1 m ($R^2 = 0.987$, MAPE = 2.17%) and 2 m ($R^2 = 0.987$, MAPE = 2.28%) from the floor. The results of energy flow showed that this greenhouse transfers 6779.4 kJ of accumulated thermal energy to the ground during the experiment.

Conclusion

In the present study, the computational fluid dynamics method was used to simulate the internal conditions of an un-even semi-buried greenhouse with external and internal variables including temperature and solar radiation. The results showed that this greenhouse structure is able to transfer part of the increase in temperature caused by sunlight to the soil depth (104.214 kJm^{-2} heat through the floor, 178.443 kJm^{-2} through the north wall and 113.757 kJm^{-2} through the south wall). By increasing the thermal conductivity of the inner surface of the greenhouse, the heat flux to the depth of the soil can be increased.

Keywords: Dynamic model, Energy storage, Heat transfer, Semi-buried greenhouse

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۱۳-۴۹۷

شبیه‌سازی جریان انرژی گلخانه نیمه‌دو طرفه شیشه‌ای با ساختار ویژه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

فرخ معتمدیان^۱، مرتضی تکی^{۲*}، روح اله فرهادی^۳، مصطفی رحمتی جنیدآباد^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲

چکیده

این تحقیق، به شبیه‌سازی جریان انرژی یک گلخانه نیمه‌مدفون نیمه‌دو طرفه با استفاده از متغیرهای بیرونی و داخلی و حل عددی به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌پردازد. در این تحقیق، داده‌های دما، رطوبت و تابش به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شد و سپس از CFD جهت بررسی توزیع انرژی و تغییرات دما در دو ارتفاع ۱ و ۲ متری از سطح زمین استفاده گردید. گلخانه مورد بررسی، به صورت یک گلخانه بسته در نظر گرفته شد و با توجه به روابط تجربی-ریاضی موجود در منابع، میزان دریافت، تلفات و خالص جذب شده انرژی در گلخانه محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش CFD با ۳۲۶۰۳۰ المان چهار وجهی (tetrahedral) قادر است دمای هوای داخل گلخانه را با دقت مناسب در ارتفاع ۱ متری ($R^2=0/987$)، $MAPE=2/17$ درصد و ۲ متری از کف ($MAPE=2/28$ ، $R^2=0/987$) تخمین بزند. بررسی جریان انرژی نشان داد که این گلخانه، $6779/4$ کیلوژول انرژی حرارتی انباشته ناشی از پرتوهای تابش را در مدت زمان آزمایش به زمین منتقل می‌کند و نسبت به سازه‌های روی سطح زمین، به طور متوسط حدود ۴۰٪ تابش کم‌تری دریافت می‌کند. نتایج کلی این تحقیق و بررسی روند تغییرات دما در کف و دیواره‌ها نشان داد که در مناطق گرم کشور، زمین به عنوان منبع خوبی برای دریافت گرمای انباشته موجود در محیط گلخانه است و هرچه پوشش سطح داخلی گلخانه رسانایی گرمایی بیشتری داشته باشد، شار حرارتی به سمت عمق خاک بیش‌تر است.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، ذخیره انرژی، گلخانه نیمه‌مدفون، مدل دینامیکی

مقدمه

به دلیل امکان افزایش زمان بهره‌برداری ۱۲ ماهه از زمین به جای یک فصل زراعی و همچنین امکان کنترل بهتر عوامل اقلیمی مورد نیاز گیاه و رفع محدودیت‌ها، شرایط بهبود عملکرد و کیفیت تولیدات کشاورزی را به نحو مؤثری داراست، مشروط بر این که ساختار گلخانه واقعاً بتوان استفاده از این پتانسیل را داشته باشد (Ahamed, Guo, & Tanino, 2019). با این حال هزینه بالای مصرف انرژی در گلخانه‌ها از بزرگ‌ترین چالش‌های مدیریت گلخانه به حساب می‌آید. در مناطق سردسیر، هزینه گرمایش در گلخانه بعد از هزینه نیروی کار مهم‌ترین بخش هزینه مصرفی گلخانه به حساب می‌آید. حدود ۶۵ تا ۸۵٪ از مجموع انرژی مصرف شده در گلخانه صرف گرم کردن آن می‌شود. این میزان به نسبت مصرف انرژی الکتریکی و حمل‌ونقل بسیار زیاد به نظر می‌رسد (Pakari & Ghani, 2019). در مناطق گرمسیر نیز بیشترین مصرف انرژی سهم کاهش دمای گلخانه است (Ghani et al., 2019). یکی دیگر از دلایل اصلی بالا بودن مصرف انرژی در گلخانه‌های ایران، پوشش و ساختار نامناسب و غیرعلمی در انواع گلخانه‌های مرسوم است (Taki, Rohani, & Rahmati-Joneidabad, 2018). بر همین اساس ابتدایی‌ترین اصول مهندسی در ساخت گلخانه‌های کشاورزی معمولاً مبتنی بر مدل‌سازی اولیه

استفاده از محیط کنترل شده در کشاورزی مانند آنچه در گلخانه اتفاق می‌افتد می‌تواند به تولید ۱۰ تا ۲۰ برابری نسبت به شرایط معمولی (کشت در مزرعه) منجر شود (Hamdani, Taki, Rahnama, Rohani, & Rahmati-joneidabad, 2020). گلخانه

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
- ۳- استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
- ۴- استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران

(Email: mtaki@asnrukh.ac.ir)

*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70400.1038>

فرآیند انتقال حرارت و جرم می‌باشد که متأسفانه در این راستا تحقیقات بسیار اندکی انجام گرفته است (Wang et al., 2017). کنترل محیطی بر میزان تولید محصولات کشاورزی و کیفیت آن تأثیر دارد، به‌طوری‌که بازده محصول تولیدی به تنظیم شرایط داخلی گلخانه مانند رطوبت، دما و دی‌اکسید کربن موجود در هوا وابسته است (Zhang, You, Tian, & Li, 2019). نتایج یک تحقیق نشان داد که می‌توان تا ۷۰٪ از هدر رفت انرژی را به‌وسیله به‌سازی و طراحی مناسب گلخانه‌ها جلوگیری کرد (Taki et al., 2018). به‌واسطه این که پیش‌بینی شرایط محیطی داخل گلخانه نقش حیاتی در افزایش عملکرد و انرژی مصرفی درون گلخانه دارد (مخصوصاً در مناطق سرد و گرم)، بسیار مهم به نظر می‌رسد و این امر مستلزم شناخت تغییرات لحظه‌ای درون گلخانه‌ی متأثر از آب‌وهوای بیرون است (Saberian & Sajadie, 2019). یکی از بهترین و دقیق‌ترین راه‌های بررسی این موضوع، موازنه انرژی و جریان داخل گلخانه است. پیچیدگی‌های مدل با توجه به تنوع عوامل مؤثر (انرژی خورشیدی، تبادل حرارت بیرون و درون، قابلیت ذخیره‌سازی گرمای درون اجسام و موقعیت قرارگیری) و تأثیر آن‌ها، شبیه‌سازی را از نظر محققین در دو طیف (مدل‌های ریاضی و مدل جعبه سیاه) قرار داده است (Ahmed et al., 2019). در این راستا تحقیقات متعددی در انواع گلخانه‌ها صورت گرفته است. در تحقیقی، مدلی شبه پایا به‌منظور پیش‌بینی درجه حرارت خاک و هوای داخلی گلخانه‌ای در عراق معرفی و بررسی شد (Joudie & Farhan, 2015). داده‌ها در این تحقیق به کمک حسگرهای نصب شده درون و بیرون گلخانه برداشت و ثبت شدند. مؤلفه‌های اصلی مورد بررسی، دمای هوای داخل و کف گلخانه بود. نتیجه بررسی نشان از تطابق خوب مدل با داده‌های تجربی داشت؛ به‌طوری‌که میزان خطای مطلق کمتر از ۱۰٪ گزارش شد. در پژوهشی دیگر، با طراحی یک مدل حرارتی شبه‌پایا به پیش‌بینی نیاز حرارتی یک گلخانه مرسوم در فصل سرد سال پرداخته شد (Ahmed et al., 2019). این سامانه بر مبنای ورودی انرژی و جرم از محیط پیرامون گلخانه و خواص فیزیکی و حرارتی گیاه موجود در گلخانه طراحی شده بود و با ثبت لحظه‌ای ورودی‌ها به بررسی تمام پارامترهای حرارتی تأثیرگذار بر شرایط داخل گلخانه می‌پرداخت. نتایج نشان داد که بیشترین میزان گرمای ازدست‌رفته در فصل سرد سال ناشی از جریان رسانش و جابه‌جایی بوده و بیشترین تأثیر تبخیر و تعرق مربوط به فصل تابستان است. یافته‌های این تحقیق نشان داد که با کنترل شرایط محیطی، سیستم قادر است بین ۱۳ تا ۵۶٪ از نیاز حرارتی سیستم را کاهش دهد. در تحقیق دیگری، روابط عمومی انتقال حرارت به منظور شبیه‌سازی شرایط داخلی گلخانه‌ای گنبدی شکل در کشور عربستان ارائه شد (Abdel Ghany & Helal, 2019).

(2011). در این تحقیق گلخانه‌ای پلاستیکی به مساحت ۳۴ مترمربع ساخته و فرآیند انتقال حرارت بین گیاه، پوشش گلخانه، خاک و هوای داخل گلخانه شبیه‌سازی شد. همچنین نرخ تبخیر و تعرق گیاه به‌صورت یک عدد ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که اگر شاخص سطح برگ برای گیاه گوجه‌فرنگی کمتر از ۱/۵ باشد، میزان خطای مدل حدود ۱/۷٪ خواهد بود و اگر شاخص سطح برگ بیشتر از ۵ باشد، خطا تا حدود ۰/۷٪ کاهش خواهد یافت و از کل تابش خورشیدی ورودی به گلخانه، حدود ۱۰٪ آن صرف تبخیر و تعرق گیاه شده بود. در تحقیقی مشابه، شبیه‌سازی رفتار گلخانه تونلی شکل در یک روز آفتابی در کشور یونان مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش دو حالت کلی در نظر گرفته شد. در حالت اول، عمل شبیه‌سازی با فرض ثابت بودن دمای محیط بیرون انجام گرفت و در حالت دوم دمای خارج گلخانه متغیر فرض شد. نتایج نشان داد که مهم‌ترین پدیده در بررسی فرآیند انتقال حرارت داخل این گلخانه، همرفت است. نتایج کلی نشان داد که متغیر بودن دمای خروجی باعث نزدیک شدن مقادیر شبیه‌سازی با داده‌های تجربی می‌شود (Fidaros, Baxeavanou, Bartzanas, & Kittas, 2010). در تحقیق دیگری به مقایسه دقت CFD و شبکه‌ای عصبی مصنوعی در پیش‌بینی دمای خروجی یک جمع‌کننده صفحه تخت خورشیدی پرداخته شد (Nadi, Abdanan Mehdizadeh, & Nourani, 2016). نتایج کلی این تحقیق نشان داد که پیش‌بینی‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی به لحاظ آماری نسبت به CFD از دقت بالاتری برخوردار است ولی قادر به برون‌یابی و بررسی شرایط خارج از حالت آموزش دیده نیست. در پژوهشی دیگر، مدل‌های ریاضی (رگرسیون چندگانه و روابط انتقال حرارت) و هوش مصنوعی جریان انرژی یک گلخانه نیمه‌خورشیدی در شهرستان تبریز مورد بررسی قرار گرفت (Taki, Ajabshirchi, Ranjbar, Rohani, & Matloobi, 2016a). نتایج نشان داد که اگرچه مدل هوش مصنوعی از دقت بسیار بالایی در پیش‌گویی شرایط دمایی داخل برخوردار است اما مدل‌سازی ریاضی قادر است پیش‌بینی دقیقی از انرژی‌های انباشته و هدر رفته و حجم جابه‌جایی هوای درون گلخانه ارائه دهد و به حدس دقیقی از دما، رطوبت و دیگر پارامترهای داخلی گلخانه برسد. در تحقیق دیگری، از مدل‌های ریاضی به منظور انتخاب بهترین نوع ساختار گلخانه از نظر دریافت انرژی و تلفات حرارتی استفاده شد. نتایج حاکی از همبستگی بالا ($R^2=0.9$) بین داده‌های مدل دینامیک سیالات محاسباتی با مقادیر واقعی بود (Ghasemi Mobtaker, 2019). در تحقیق دیگری (Ajabshirchi, Ranjbar, & Matloobi, 2019) فرآیند تهویه و سرمایش یک گلخانه و جانمایی محل قرارگرفتن فن‌ها، دریچه‌ها و پدها روی سازه گلخانه توسط CFD شبیه‌سازی شد (Moghaddam, Ozlati, Zarei, Momeni, & Azadshahraki, 2019).

است. داده‌های دما و رطوبت از داخل و بیرون گلخانه مورد نظر توسط حسگرهای دما (مدل SHT 11 ساخت شرکت CMOS آمریکا) و داده‌های تابش در داخل گلخانه، در یک سطح تراز شده زمین، توسط تابش سنج مدل TES132 برداشت شد. این نوع تابش سنج قادر است داده‌های تابش در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر برداشت کند. داده‌های سرعت جریان هوا از ایستگاه هواشناسی واقع در دانشگاه استخراج گردید. داده‌برداری از ۱۸ تا ۲۱ آذرماه سال ۱۳۹۹ در چهار روز متوالی و به مدت ۸ ساعت یعنی همزمان با طلوع و غروب خورشید انجام گرفت.

نحوه چیدمان حسگرهای دما به نحوی بود که دو حسگر در کف (یکی در وسط دیواره شرقی و دیگری در وسط دیواره غربی) قرار گرفتند و دما و رطوبت کف گلخانه را ثبت می‌کردند. دو حسگر در دیواره جنوبی نصب شدند که یکی در ارتفاع یک متر از کف گلخانه روی قسمت مدفون دیواره و دیگری در ارتفاع دو متری روی جداره شیشه‌ای دیواره نصب شد و به‌منظور اجتناب از تأثیر تابش مستقیم بر دمای ثبت شده حسگر، پوشش سایه‌بانی روی آن قرار داده شد. دو حسگر دما روی دیوار شمالی نصب شدند که مانند حسگرهای نصب شده بر دیوار جنوبی یکی در ارتفاع یک متری، دما و رطوبت بخش مدفون دیوار را ثبت می‌کرد و دیگری در ارتفاع دو متری دمای دیوار شیشه‌ای شمالی را ثبت می‌کرد. همچنین، داخل گلخانه نیز یک حسگر در ارتفاع یک متری از کف گلخانه با فاصله دو متری از دیوار شمالی و دیگری در ارتفاع دو متری از کف و با فاصله ۲/۴ متری از دیوار جنوبی نصب شد. ثبت دمای بیرون نیز توسط یک حسگر SHT11 انجام گرفت. تمامی حسگرهای نصب شده به‌صورت بی‌سیم، داده‌های دما و رطوبت را در بازه زمانی ده ثانیه‌ای ضبط و ارسال می‌کردند. شکل ۱-الف، نمای بیرونی گلخانه مورد نظر و شکل ۱-ب، محل نصب سنسورهای دما را نشان می‌دهند.

شبیه‌سازی

به منظور بررسی چگونگی توزیع دما و جریان هوا داخل گلخانه از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. این روش مبتنی بر حل معادلات پیوستگی (رابطه ۱)، اندازه حرکت (رابطه ۲) و انرژی (رابطه ۳) به شرح زیر است (Saberian & Sajadiye, 2019):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla (\tau_{eff}) + \rho \vec{f} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{V}(\rho E + P)] \\ = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j \right. \\ \left. + (\tau_{eff} \vec{V}_j) \right] + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

(2021). نتایج این تحقیق نشان داد که به کمک CFD می‌توان محل مناسب دریچه‌های یک گلخانه را باتوجه به موقعیت جغرافیایی منطقه در جهت بهبود گردش هوا و کاهش مصرف انرژی، مشخص نمود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با کنترل بهینه دما، رطوبت، آبیاری، انرژی و هزینه مصرفی، هدف جامعه محققین کشاورزی که دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی است، دست‌یافتنی است (Taki et al., 2018; Ahmed et al., 2019; Bolandnazar, Sadrnia, Rohani, & Taki, 2019; Taki, Ajabshirchi, Ranjbar, Rohani, & Matloobi, 2016b). بنابراین با طرح مدل‌هایی از گلخانه که بتواند موارد بالا را شبیه‌سازی کند به‌ویژه در زمینه مصرف انرژی، می‌توان گلخانه را محیطی قابل تفسیر و پیش‌بینی توصیف کرد. به بیان دیگر شناخت رفتار حرارتی عناصر داخلی و بیرونی گلخانه، پیش‌بینی میزان مصرف انرژی را راحت‌تر می‌کند. یکی از سازه‌هایی که به‌صورت خاص در شرایط آب و هوایی گرم یا سرد ساخته می‌شود، سازه‌های شیشه‌ای مدفون در خاک هستند. در مورد این نوع سازه‌ها و میزان تبدلات انرژی بین محیط بیرون و داخل آن‌ها تحقیقاتی بسیار اندک و بیشتر به‌صورت معرفی صورت گرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی جریان انرژی در یکی از این نوع سازه‌های واقع شده در محل دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان است. در این تحقیق، حل عددی CFD به منظور بررسی جریان انرژی داخل گلخانه و مشخص کردن سهم هدررفت تمام عناصر داخلی گلخانه به‌کار رفته است. در این راستا از سنسورهای نور، دما و رطوبت به‌منظور برآورد مقادیر دقیق هریک از ورودهای مدل استفاده شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به راحتی گرایان دما در نقاط مختلف گلخانه را مشخص کند و در آینده به منظور هوشمند کردن گلخانه‌ها و برآورد میزان تلفات انرژی در نقاط مختلف گلخانه مورد استفاده قرار گیرد.

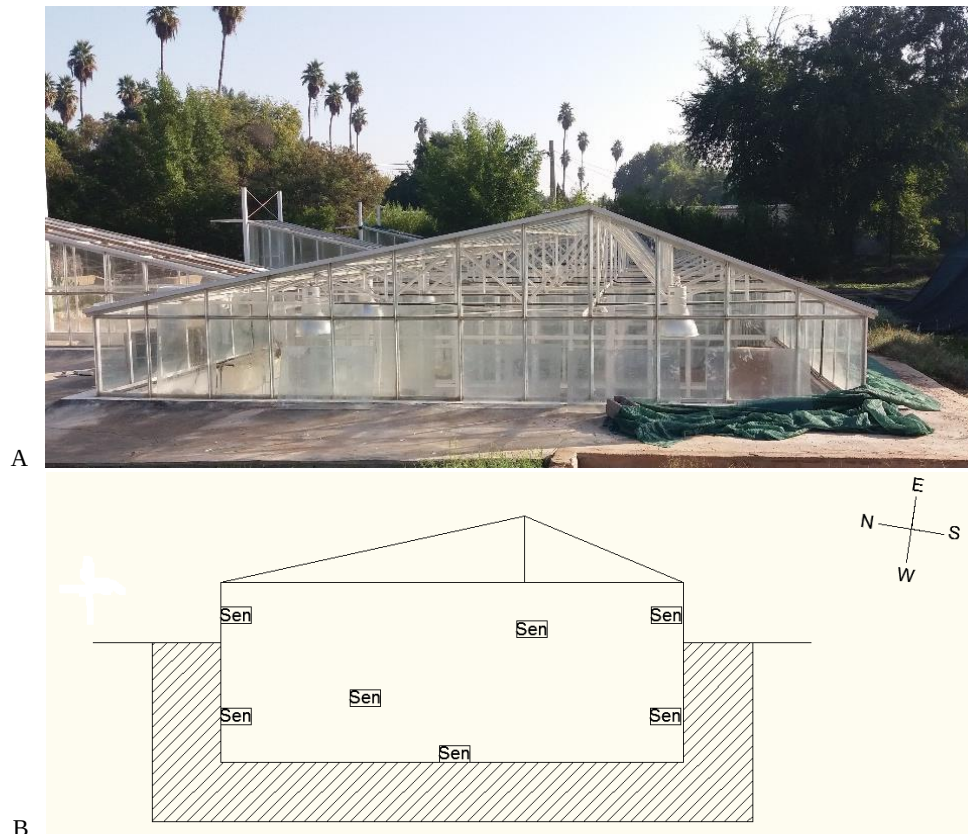
مواد و روش‌ها

محل تحقیق، نوع گلخانه و نحوه داده‌برداری

این تحقیق به منظور شبیه‌سازی شرایط داخلی یک گلخانه نیمه-دوطرفه شیشه‌ای با جهت قرارگیری شرقی-غربی با توجه به شرایط آب و هوایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان واقع در شهر ملائانی در ۳۵ کیلومتری شمال اهواز انجام شد. گلخانه مورد بررسی، دارای ساختاری ویژه است که به دلیل قرارگیری در عمق بیش از یک متری سطح زمین در مناطق بسیار گرم یا بسیار سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار این گلخانه به‌منظور کاهش تابش خورشید به داخل گلخانه و کمک گرفتن از دیواره‌ها در جهت جذب انرژی انباشته است و به‌صورت مدفون در عمق ۱/۸ متری سطح زمین قرار دارد. گلخانه مورد نظر دارای مساحت ۳۸ مترمربع و حجم هوای ۸۷/۸ مترمکعب است. ابعاد گلخانه در جدول ۱ آورده شده

که در آن‌ها، ρ میزان چگالی هوا ($kg.m^{-3}$)، v سرعت جریان هوا (ms^{-1})، t زمان (s)، P فشار (pa)، τ_{eff} تنش برشی مؤثر ($N.m^{-2}$)، f شتاب‌های مربوط به نیروهای حجمی (ms^{-2})، u بردار سرعت در مختصات کارتزین (ms^{-1})، E انرژی جریان

که در آن‌ها، ρ میزان چگالی هوا ($kg.m^{-3}$)، v سرعت جریان هوا (ms^{-1})، t زمان (s)، P فشار (pa)، τ_{eff} تنش برشی مؤثر ($N.m^{-2}$)، f شتاب‌های مربوط به نیروهای حجمی (ms^{-2})، u بردار سرعت در مختصات کارتزین (ms^{-1})، E انرژی جریان



شکل ۱- نمای بیرونی گلخانه و محل سنسورهای دما (A و B)

Fig.1. Exterior view of the greenhouse and the location of temperature sensors

جدول ۱- مشخصات گلخانه مورد مطالعه

Table 1- Specifications of the studied greenhouse

مشخصات Specifications	مقدار Value
عرض Width	7.06 m
طول Length	5.40 m
ارتفاع دیوار مدفون در خاک height of the wall buried in the ground	1.80 m
ارتفاع جدار شیشه‌ای The height of the glass wall	0.90 m
فاصله سقف گلخانه از کف در بلندترین نقطه The distance of the greenhouse ceiling from the floor at the highest point	3.70 m
مساحت Area	38 m ²
حجم Volume	87.8 m ³

مطلق درصد خطا (MAPE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده (R^2) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_a - y_p)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_a - y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_a - \bar{y}_a)^2} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_a - y_p}{y_a} \right| \times 100 \quad (8)$$

که در آن، y_p و y_a به ترتیب مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مدل و $\bar{y}_p$ و $\bar{y}_a$ به ترتیب مقادیر میانگین آن‌ها هستند. بهترین عملکرد مدل‌ها، زمانی به دست می‌آید که معیارهای خطا شامل (MAPE و RMSE) حداقل و معیار عملکردی R^2 حداکثر و نزدیک به یک باشد. علاوه بر این موارد، برای ارزیابی توافق بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده از خط رگرسیونی ($y_a = a + by_p$) بین آن‌ها نیز استفاده شد. بر اساس این معیار، بهترین حالت زمانی است که شیب خط نزدیک به یک ($b \approx 1$) و عرض از مبدأ ($a \approx 0$) آن نیز نزدیک به صفر باشد (Taki et al., 2018).

نتایج و بحث

مهم‌ترین مؤلفه تأثیرگذار بر دینامیک گلخانه مورد مطالعه، پرتوهای تابش خورشید است. وجود گلخانه در عمق خاک میزان پرتوهای تابش شده به داخل محیط را کاهش خواهد داد. در بهترین حالت تابش (موقع ظهر) که خورشید در بالاترین حالت خود در آسمان قرار دارد، ۱۴ متر مربع از کف گلخانه و دیوار جنوبی همواره از دریافت پرتو مستقیم خورشید محروم می‌باشد. بنابراین میزان پرتوهای ورودی به داخل گلخانه به نسبت زمانی که گلخانه بر روی زمین قرار دارد نزدیک به ۴۰٪ کمتر است. همچنین زمانی که گلخانه روی سطح زمین قرار دارد دمای بخش بیرونی دیوارها، دمای محیط است که در مناطق گرم و مخصوصاً طول روز از دمای درون خاک و یا دیوارهای مدفون بیشتر است و همین مسأله باعث می‌شود که یا شار جریان حرارت به سمت بیرون گلخانه کاهش یابد و یا تغییر شار به سمت داخل در مواقعی که دمای داخل کمتر از دمای محیط است را داشته باشیم.

بنابراین اولین پارامتری را که باید بررسی کرد میزان افزایش

شبیه‌سازی به صورت گذرا از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۶:۳۰ برای ۲۰ آذر ۱۳۹۹ با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent نسخه 2020 R2 صورت گرفت. در این تحقیق، گام زمانی ۱۰ دقیقه، الگوریتم simple برای کوپلینگ معادلات سرعت و فشار، حلگر بر مبنای فشار و ۳۲۶۰۳۰ المان چهار وجهی (tetrahedral) در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی به صورت گذرا از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۶:۳۰ برای ۲۰ آذر ۱۳۹۹ با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent نسخه 2020 R2 صورت گرفت. گام زمانی ۱۰ دقیقه، الگوریتم simple در حلگر و ۳۲۶۰۳۰ المان چهار وجهی (tetrahedral) استفاده شد. همچنین استقلال از شبکه برای نشان دادن عدم وابسته بودن نتایج شبیه‌سازی به شبکه بررسی شد که در بخش نتایج به آن پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان هوا داخل گلخانه از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شد (Santolini et al., 2018). شرایط مرزی در بخش‌های مختلف گلخانه عبارتند از: ۱. تبادل حرارت دیوارهای شمالی، جنوبی، شرقی و غربی با خاک، ۲. تبادل حرارت کف گلخانه با زمین ۳. تبادل حرارت هدایتی از سقف و همرفت اطراف گلخانه با بیرون به واسطه وزش باد و در نهایت تابش خورشید. برای مورد اول و دوم از قانون فوریه (رابطه ۴) استفاده شد (Bergman, Incropera, Lavine, & Dewitt, 2011):

$$q'' = k \frac{\Delta T}{L} \quad (4)$$

که در آن q'' شار حرارتی (Wm^{-2})، k ضریب انتقال حرارت هدایت (WmK^{-1})، T دما (K) و L طول (m) است. مقدار ضریب انتقال حرارت هدایت برای خاک به طور متوسط ۰/۵۲۵ وات بر مترمربع درجه کلوین در نظر گرفته شد (Abu-Hamdeh & Reeder, 2000). دمای دیوارها با حسگر در طول آزمایش اندازه‌گیری شدند. همچنین دمای متوسط خاک از سطح زمین تا عمق یک متری ۱۷/۴۲ و دمای عمق یک متری زمین ۲۱/۸ درجه سلسیوس اعمال شد. با داشتن تفاوت دما می‌توان مقدار شار حرارتی از کف و دیوارها را به دست آورد.

برای تعیین مقدار ضریب انتقال حرارت همرفتی (بر حسب $Wm^{-2}K^{-1}$) از رابطه (۵) استفاده شد (Roy, Boulard, Kittas, & Wang, 2002):

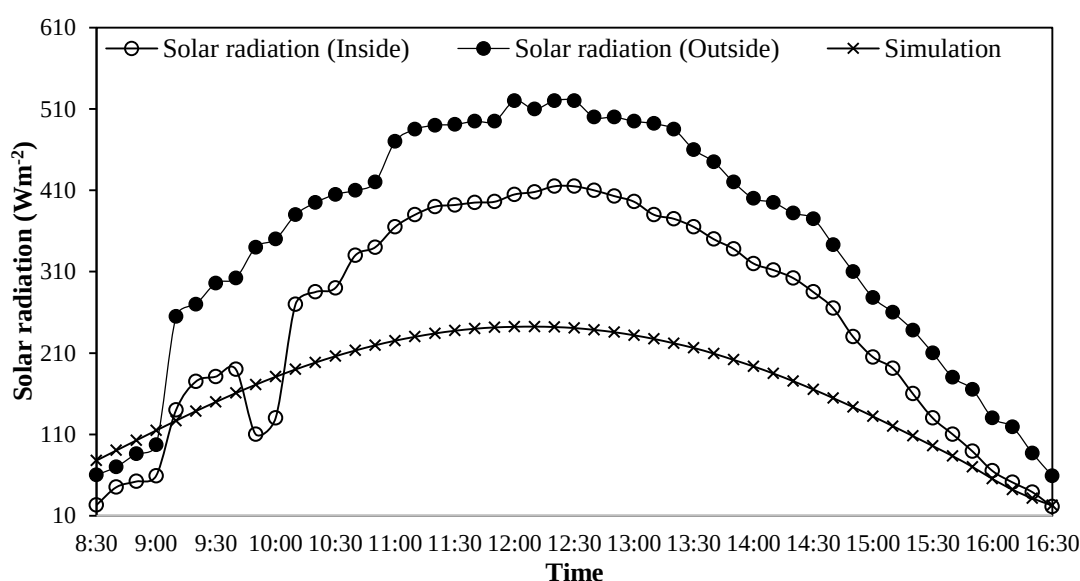
$$2.8 + 1.2V \quad (5)$$

در این معادله سرعت جریان باد (ms^{-1}) است.

در نهایت چگونگی توزیع دمای داخل گلخانه با استفاده از شبیه‌سازی، محاسبه شد و مقادیر آن در دو نقطه: یکی در ارتفاع ۱ متری و دیگری در ارتفاع ۲ متری با اندازه‌گیری‌های واقعی مقایسه گردید. برای ارزیابی توانمندی مدل و مقایسه نتایج آن با مقادیر واقعی برداشت شده توسط حسگرها، از شاخص‌های عملکردی میانگین

سطح رویی گلخانه منطقی به نظر می‌رسد. مقدار تابش به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده در کف، کمتر است زیرا در شبیه‌سازی، میانگین تابش در کل کف محاسبه شده که شامل بخش‌های آفتاب‌گیر و همچنین بخش‌های سایه است درحالی که مقدار تابش اندازه‌گیری شده داخل، میانگین چند نقطه آفتاب‌گیر می‌باشد. مقایسه نتایج تابش روی سطح افق با تابش کف گلخانه که سایه‌اندازی نیز در آن لحاظ شده است، نشان می‌دهد میزان تابش در کف به صورت میانگین ۴۶/۷ درصد کمتر است. این مطلب برای مناطق گرمسیر بسیار مهم است و باعث صرفه‌جویی مصرف برق به‌منظور کاهش دمای داخل گلخانه در فصل گرم سال می‌شود.

انرژی ناشی از تابش و بررسی تأثیر آن بر روابط و پارامترهای مؤثر داخل گلخانه خواهد بود. شکل ۲، میزان تابش خورشید در بیرون و داخل گلخانه موردنظر همراه با نتیجه شبیه‌سازی تابش خورشید در کف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، میزان تابش تا ساعت ۱۰ صبح به‌واسطه وجود درختان در شرق گلخانه و سایه‌اندازی آن‌ها، کم است و مقدار شبیه‌سازی تا ساعت ۹ صبح از مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر می‌باشد. طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده، تفاوت بین میزان شدت تابش بیرون و داخل گلخانه با توجه به درصد جذب، انتقال و انعکاس پرتوهای خورشیدی توسط سطح شفاف سقف گلخانه و انعکاس بخشی توسط سازه و همچنین جذب توسط ذرات گرد و خاک



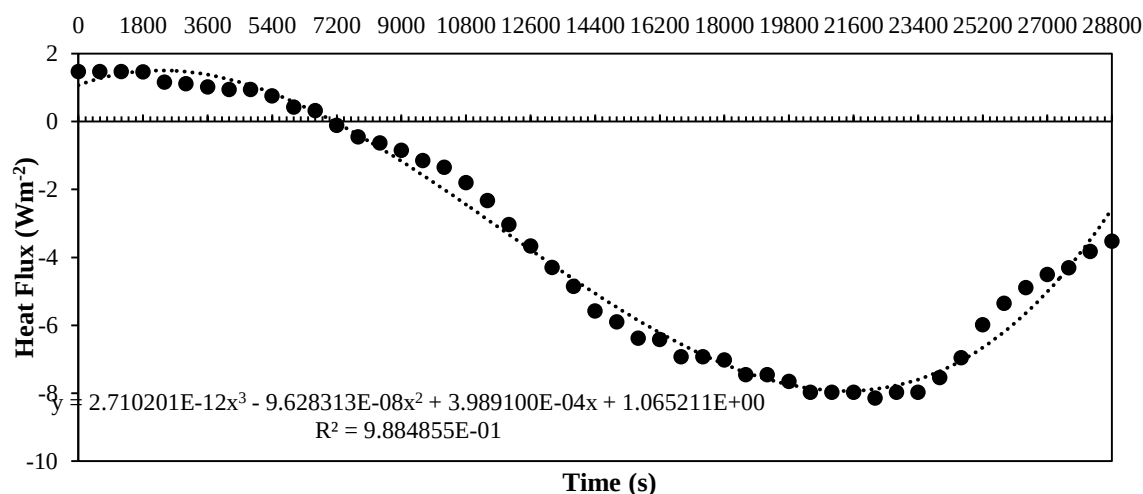
شکل ۲- تابش خورشیدی روی سطح زمین، کف گلخانه و شبیه‌سازی شده مربوط به ۲۰ آذر ۱۳۹۹

Fig.2. Solar radiation on the ground, greenhouse floor and simulated related to 10.12.202

بخش قابل‌توجهی از انرژی انباشته درون گلخانه را به کمک این سیستم که خود نوعی از سیستم سرمایش غیرفعال به حساب می‌آید، در عمق خاک مستهلک کرد.

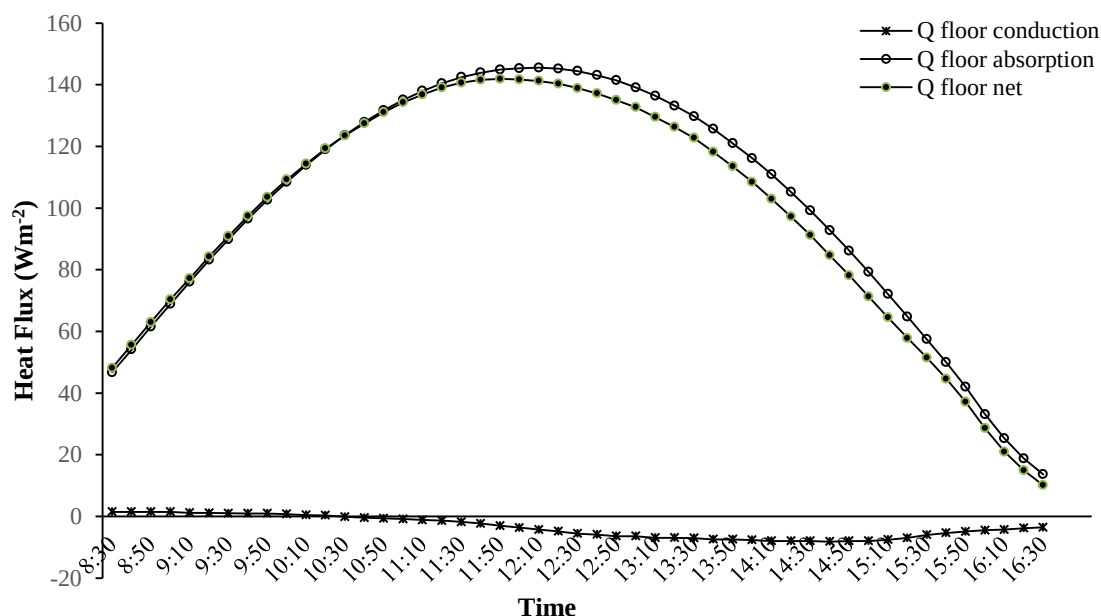
باید این مسأله را هم در نظر داشت که چون همواره بخشی از مساحت کف گلخانه از دریافت پرتوهای تابش مستقیم محروم است، به‌عنوان منبع دریافت گرما عمل کرده و همراه با دیواره جنوبی منبع خوبی برای مستهلک کردن گرمای انباشته به حساب می‌آیند. جهت حرکت جریان هدایت حرارتی کف گلخانه پس از ساعت ۱۰:۳۰ که هم‌دمایی کف و عمق خاک اتفاق می‌افتد به سمت قسمت سایه گلخانه هدایت پیدا می‌کند. این مسأله در مدت زمان تابش خورشید به کف گلخانه باعث حرکت جریان انرژی به سمت دیوار جنوبی می‌گردد.

شار حرارتی کف گلخانه تا زمانی که دمای محیط داخل کمتر از دمای عمق خاک باشد به سمت داخل گلخانه خواهد بود و پس از دریافت انرژی حرارتی ناشی از تابش و بالا رفتن دمای کف، جهت شار حرارتی به سمت عمق خاک تغییر خواهد کرد و بخش دیگر آن سبب افزایش دمای محیط داخل خواهد شد. تناسب رفتار حرارتی در گلخانه مورد آزمایش با انتظارات تئوری مطابقت دارد. همان‌طور که نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد، شار حرارتی از عمق خاک به سمت داخل تا ساعت ۱۰:۳۰ صبح (معادل ۷۲۰۰ ثانیه در نمودار) (زمان هم‌دمای شدن کف گلخانه و عمق خاک) از سمت عمق خاک به داخل گلخانه و پس از آن جهت جریان حرارتی برعکس است. این مسأله در مناطق گرم که با مشکل انباشتگی انرژی حرارتی در داخل گلخانه روبه‌رو هستند، یک مزیت به حساب می‌آید و با افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی (انتخاب مصالح مناسب با ضریب انتقال حرارت بالا) می‌توان



شکل ۳- شار حرارت هدایت تبادل شده در کف گلخانه

Fig.3. Conducted heat flux on the floor of the greenhouse



شکل ۴- میزان شار حرارتی تبادل شده در کف گلخانه، تابش جذب‌شده خورشید و تفاوت آن‌ها

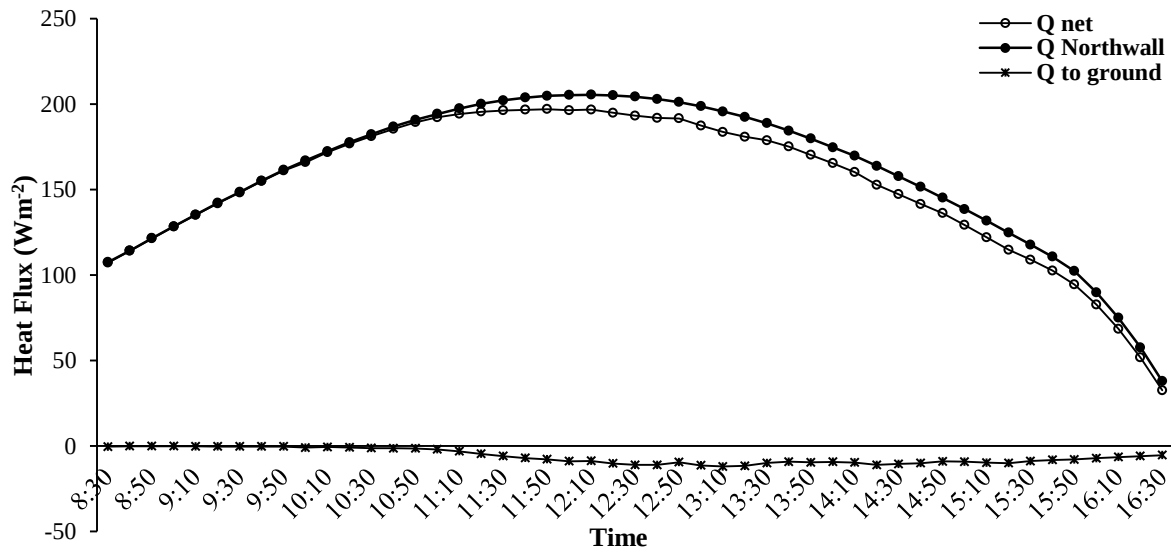
Fig.4. Heat flux exchanged in the greenhouse floor, the absorbed radiation and their differences

داخل گلخانه را هم افزایش می‌دهد که از آن گریزی نیست. تنها راه کاهش جریان حرارت ورودی به محیط، افزایش سرعت انتقال حرارت به سمت عمق خاک تا حد ممکن و کاهش ورود پرتوهای گرمازا به داخل گلخانه می‌باشد. تغییرات دما در دیواره شمالی و جنوبی و همچنین ساختار وجودی آن (نصب گلخانه در عمق خاک) از آن منبع مناسبی جهت جذب انرژی انباشته داخل گلخانه ساخته است. این مسأله در مورد دیواره شمالی به‌واسطه دریافت بیشتر انرژی عینیت بیشتری دارد زیرا مطابق شکل‌های ۵ و ۶، بیشترین

شکل ۴، میزان شار ناشی از تابش خورشید در کف گلخانه و همچنین میزان شار حرارتی تبادل شده با عمق خاک را نمایش می‌دهد. شار حرارتی جریان هدایت به سمت عمق در مقایسه با شار جریان همرفت و تابش بسیار ناچیز می‌باشد که موجب افزایش دما بیش از توان تحمل گیاه خواهد بود. بیشترین میزان شار حرارتی به سمت عمق خاک مربوط به ساعت ۱۴:۴۰ (۲۲۲۰۰ ثانیه) می‌باشد که بیشترین تفاوت دما بین عمق خاک و کف گلخانه را دارا است. در عین حال افزایش دمای کف، جهت جریان انرژی به سمت محیط

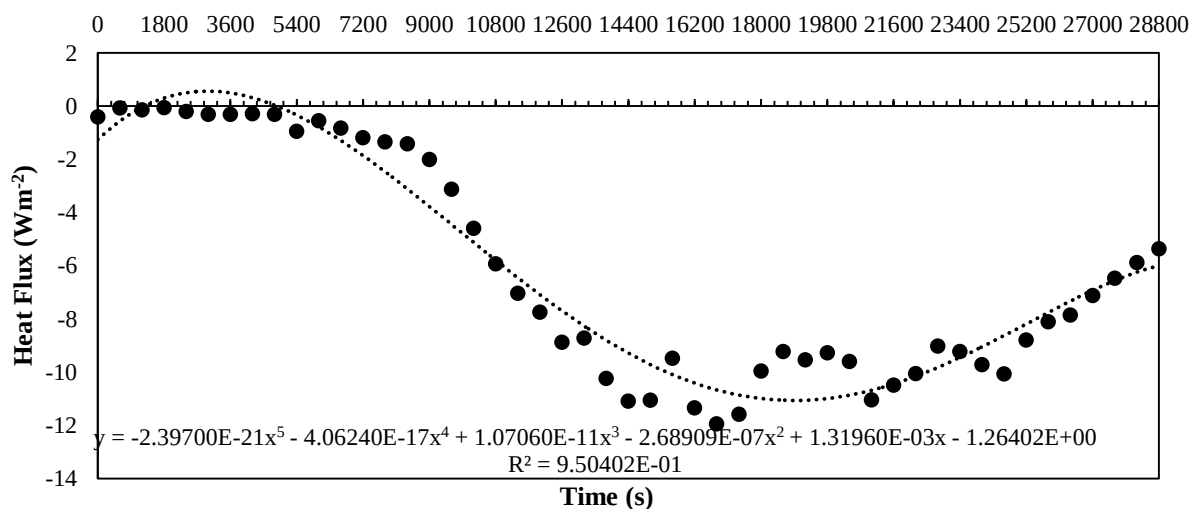
شکل ۷، در ساعت‌های ۱۲:۵۰ تا ۱۵:۱۰ برابر با ۵/۵۵ وات بر مترمربع است.

میزان دریافت شار در دیواره شمالی در ساعت ۱۳:۱۰ برابر با ۱۱/۹۵ وات بر مترمربع است که ناشی از بالاترین حد اختلاف دما در دیواره شمالی است؛ در حالی که در دیوار جنوبی بیشترین دریافت شار مطابق



شکل ۵- شار حرارتی دیوار شمالی ناشی از تابش خورشید، شار تبادل شده با خاک و تفاوت آن‌ها

Fig.5. The heat flux of the north wall caused by sunlight, heat exchanged with the soil and their differences



شکل ۶- شار حرارتی تبادل شده در دیواره شمالی

Fig.6. Heat flux exchanged in the north wall

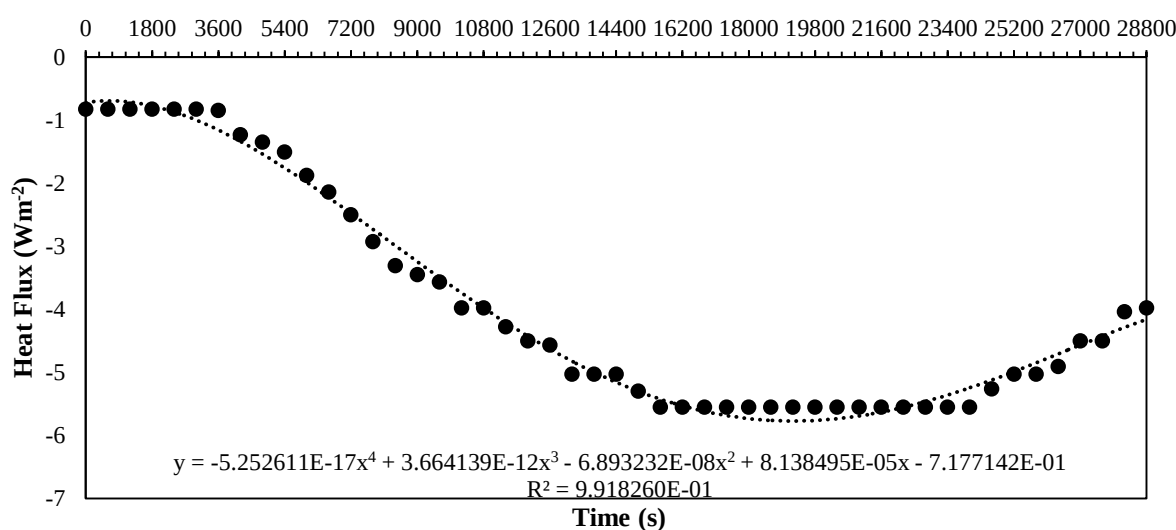
تابش غیرمستقیم محیط است. بیشترین شار حرارتی ناشی از تابش در کف مربوط به ساعت ۱۲:۲۰ ظهر و برابر با ۱۴۵/۴۸ وات بر مترمربع است اما بیشترین میزان شار حرارتی به سمت عمق خاک مربوط به ساعت ۱۴:۵۰ می‌باشد (۸/۱۵ وات بر مترمربع) که سبب ایجاد بیشترین تفاوت دما بین عمق خاک و کف گلخانه (۱۵/۵۲ درجه

باید خاطر نشان کرد که عمده‌ترین عامل تغییرات شار حرارت هدایت، مربوط به اختلاف دما در دو سوی یک جسم می‌باشد. دیواره جنوبی به واسطه عدم دریافت پرتوهای تابشی از ثبات دمایی بیشتری در مقایسه با دیگر نواحی گلخانه برخوردار است و تغییرات آن تنها ناشی از تغییرات دمای هوای مجاور از طریق همرفت و کمی هم

بنابراین زمانی که دمای داخل گلخانه بیش از ۲۸ درجه سلسیوس باشد، انرژی منتقل شده از کف و دیوار شمالی به هوا به‌عنوان انرژی انباشته و مضر داخل گلخانه به حساب می‌آید.

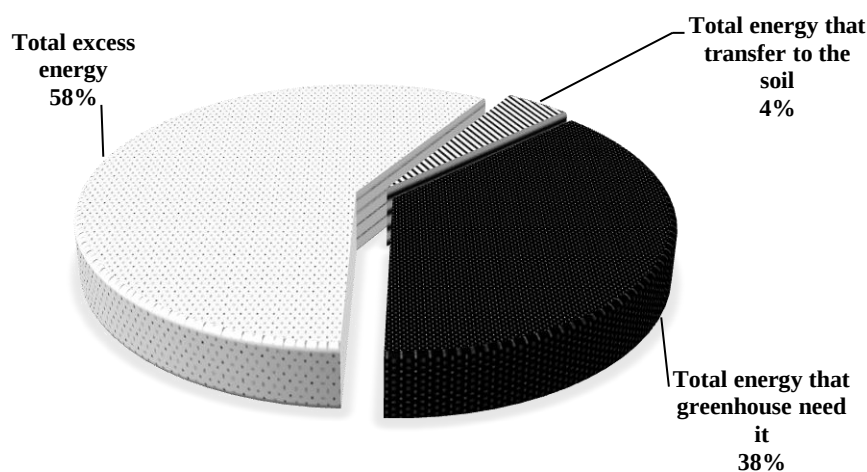
شکل ۸، سهم هر بخش از انرژی ایجادشده در گلخانه را مشخص کرده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، بیشترین سهم مربوط به تولید انرژی انباشته مضر ۹۱۹۸۹/۷ کیلوژول (۵۸٪) و کمترین مربوط به انرژی حرارتی منتقل شده در کف است (۶۷۷۹/۴ کیلوژول معادل ۴ درصد کل انرژی) است. نتایج این شکل، ضرورت مستهلک کردن انرژی انباشته تا رسیدن به دمای مطلوب گیاه را به‌خوبی نشان می‌دهد.

سلسیوس) شده است. این تفاوت مربوط به مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا دمای کف با توجه به افزایش تابش خورشید، افزایش یابد. در عین حال افزایش دمای کف، میزان جریان انرژی به سمت محیط داخل گلخانه را هم افزایش می‌دهد که از آن گریزی نیست. تنها راه کاهش جریان حرارت ورودی به محیط، افزایش سرعت انتقال حرارت به سمت عمق خاک تا حد ممکن و کاهش ورود پرتوهای گرمازا به داخل گلخانه می‌باشد. از آنجا که آستانه تحمل دمایی گیاه بین ۱۰ تا ۲۸ درجه سلسیوس است مقدار انرژی ورودی به گلخانه تا زمانی که به این دامنه دمایی برسد قابل قبول است و بیشتر از آن باعث کاهش تولید و آسیب به گیاه می‌گردد (Dayioğlu & Silileli, 2015).



شکل ۷- شار حرارتی تبادل شده در دیواره جنوبی

Fig.7. Heat flux exchanged in the south wall



شکل ۸- کل انرژی تولیدی از تابش نور خورشید در گلخانه

Fig.8. Total energy produced by sunlight in the greenhouse

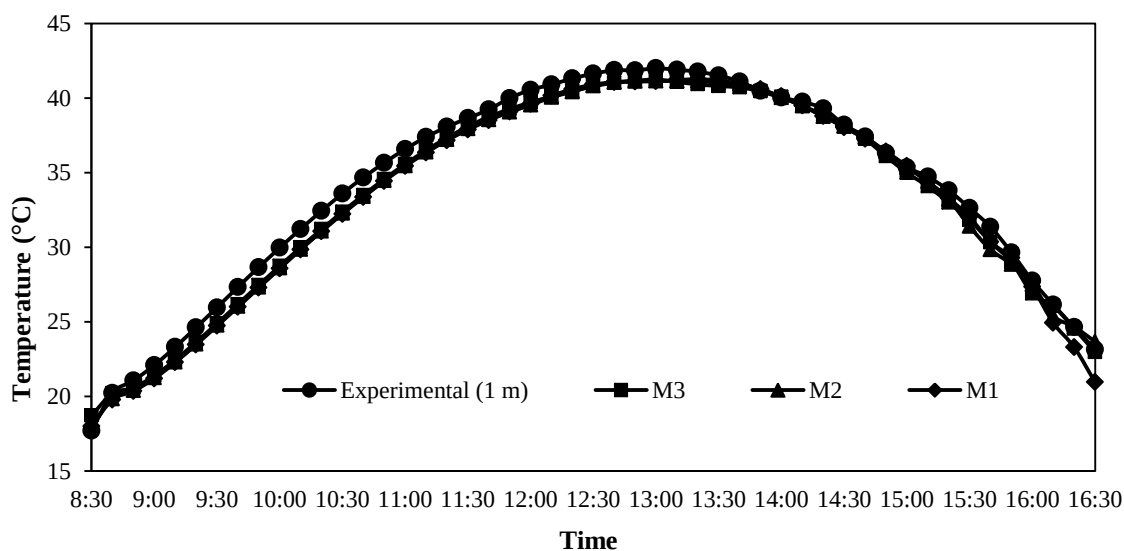
ارتفاع یک متری گزارش شدند (Jiao et al., 2020). در گزارش دیگری نیز میانگین ریشه مربعات خطا روش CFD مورد استفاده در گلخانه پلاستیکی گنبدی شکل، ۰/۹۱ درجه سلسیوس ثبت شد (Munar & Aldana, 2019) که همگی حکایت از نزدیکی نتایج ارزیابی این مطالعه با تحقیقات محققین ذکر شده دارد.

همان‌طور که شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند، بیش‌ترین دما در ارتفاع یک متری مربوط به ساعت ۱۳:۰۰ و برابر با ۴۱/۹۸ درجه سلسیوس است که بیشتر از تحمل گیاه می‌باشد. این مسأله در مورد ارتفاع دو متری هم صادق است.

مهم‌ترین مورد قابل‌توجه شکل‌های ۹ و ۱۰ این است که از ساعت ۱۰:۳۰ نیاز به هدایت گرما از داخل گلخانه به بیرون تا ساعت ۱۵:۳۰ وجود دارد. این در حالی است که زمان آزمایش در فصل سرد سال قرار داشت و در بقیه فصل‌های سال شدت پرتوهای تابش بیش‌تر بوده و نیاز انرژی سرمایش قاعداً بیش‌تر خواهد شد. یعنی این گلخانه در بهترین حالت در مواقع تابش مداوم خورشید نیاز به خارج کردن حداقل ۹۱۹۹۰ کیلوژول انرژی از درون خود دارد. به بیان دیگر می‌توان گفت که با اتخاذ روشی باید مانع از ورود این مقدار گرما از طریق تابش به داخل گلخانه شد. روند تغییرات دما و جریان هوا در مقطع افقی و ارتفاع یک متری و در مقطع عمودی در ساعات مختلف روز در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.

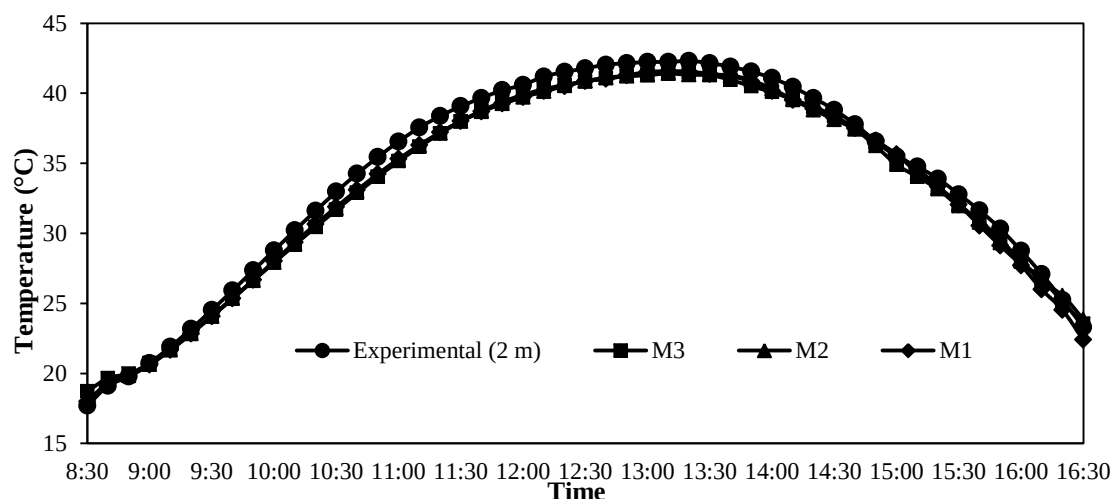
نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری توسط حسگرهای دما در ارتفاع ۱ و ۲ متری سطح گلخانه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های مذکور می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی به‌خوبی در هر دو ارتفاع توانسته است دمای هوای داخل گلخانه را تخمین بزند. در این شکل‌ها به‌ترتیب M1، M2 و M3 متناظر با ۱۳۵۱۰۴، ۱۸۳۲۶۳ و ۳۲۶۰۳۰ المان چهار وجهی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با تغییر تعداد المان‌ها، نتایج چندان تغییر نمی‌کنند که مبین استقلال نتایج از شبکه است. لذا ارائه نتایج بر مبنای ۳۲۶۰۳۰ المان صورت گرفت که در بین بقیه تعداد المان‌ها از خطای کمتری برخوردار بود.

جدول ۲ شاخص‌های عملکردی برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مقادیر واقعی اندازه‌گیری دما در ارتفاع ۱ و ۲ متری برای حالت M3 را نشان می‌دهد که حاکی از سازگاری و دقت خوب شبیه‌سازی کامپیوتری است. در تحقیقی بر روی گلخانه شیشه‌ای ونلو در دانشگاه هامبولت شهر برلین با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی فلوئنت، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE= ۱/۶۱) درجه کلون در مقاطع عمودی گزارش شد (Dayioğlu & Silleli, 2019). در پژوهش دیگری، که در گلخانه خورشیدی در دانشگاه کشاورزی مانگولیا چین با پوشش دولایه فیلم پلی‌اتیلن و با کمک نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی صورت گرفت، میانگین ریشه مربعات خطا معادل ۰/۵۱ درجه سلسیوس در



شکل ۹- مقایسه نتایج اندازه‌گیری واقعی و شبیه‌سازی دمای داخل گلخانه در ارتفاع یک متری با المان‌های مختلف (M1، M2 و M3 متناظر با ۱۳۵۱۰۴، ۱۸۳۲۶۳ و ۳۲۶۰۳۰ المان است)

Fig.9. Comparison of recorded and simulated temperature data at a height of one meter with different meshes (M1=135104, M2=183263, M3=326030)



شکل ۱۰- مقایسه نتایج اندازه‌گیری واقعی و شبیه‌سازی دمای داخل گلخانه در ارتفاع دو متری با المان‌های مختلف (M1, M2 و M3 متناظر با ۱۳۵۱۰۴، ۱۸۳۲۶۳ و ۳۲۶۰۳۰ المان است)

Fig.10. Comparison of recorded and simulated temperature data at a height of two meter with different meshes (M1=135104, M2=183263, M3=326030)

جدول ۲- شاخص‌های میانگین مطلق درصد خطا (MAPE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) در تخمین دمای داخل گلخانه در ارتفاع‌های ۱ و ۲ متری با ۳۲۶۰۳۰ المان

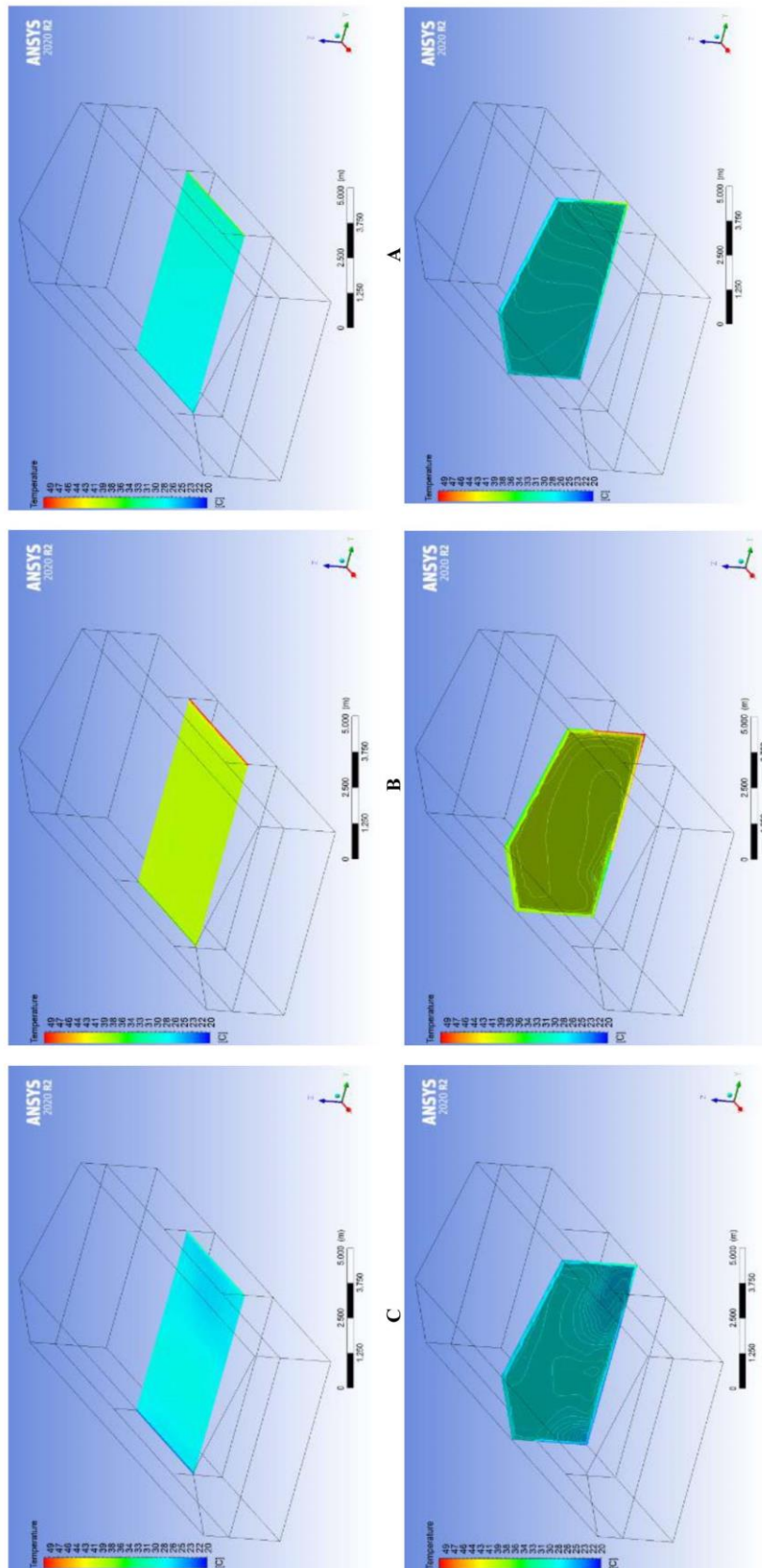
Table 2- Performance indices; Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Root Mean Square Error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) for temperature prediction in 1 and 2 heights with 326030 meshes

ارتفاع داده‌برداری Height of data record	MAPE (%)	RSME (°C)	R^2
۱ متری 1m	2.17	0.789	0.987
۲ متری 2m	2.28	0.852	0.987

محبوس بود و ورودی و خروجی جریان هوا وجود نداشت، بنابراین تنها عامل حرکت هوا داخل گلخانه، افزایش دمای هوای مجاور سطوح و در نتیجه تغییر چگالی و وقوع پدیده شناوری است که در پی آن تعادل دمایی در حجم کنترل (گلخانه) حاصل می‌شود. چنانکه در مقطع افقی ارتفاع یک متری گلخانه مشاهده می‌شود، بیش‌ترین تغییرات بردار سرعت جریان هوا مربوط به نواحی نزدیک به دیواره‌های شمالی و جنوبی می‌باشد. علت این پدیده تغییرات چگالی ناشی از تغییرات دمایی در این نواحی است که همراه با تغییرات دمای المان هوای نزدیک به دیواره‌ها، تغییر در میزان چگالی رخ داده و به تبع آن جابه‌جایی هوا از ناحیه پرچگالی به سمت ناحیه کم‌چگالی رخ می‌دهد که این امر باعث ایجاد جریان پرسرعت در نواحی با گرادیان دمایی بالا می‌گردد. طبق نتایج شکل ۱۲ از رفتار جریان هوا در مقطع عمودی می‌توان دریافت که بیشترین سرعت مربوط به نواحی است که تفاوت دمایی بیش‌تری با المان نزدیک خود داشته‌اند (نزدیک به کف، دیواره‌ها و سقف).

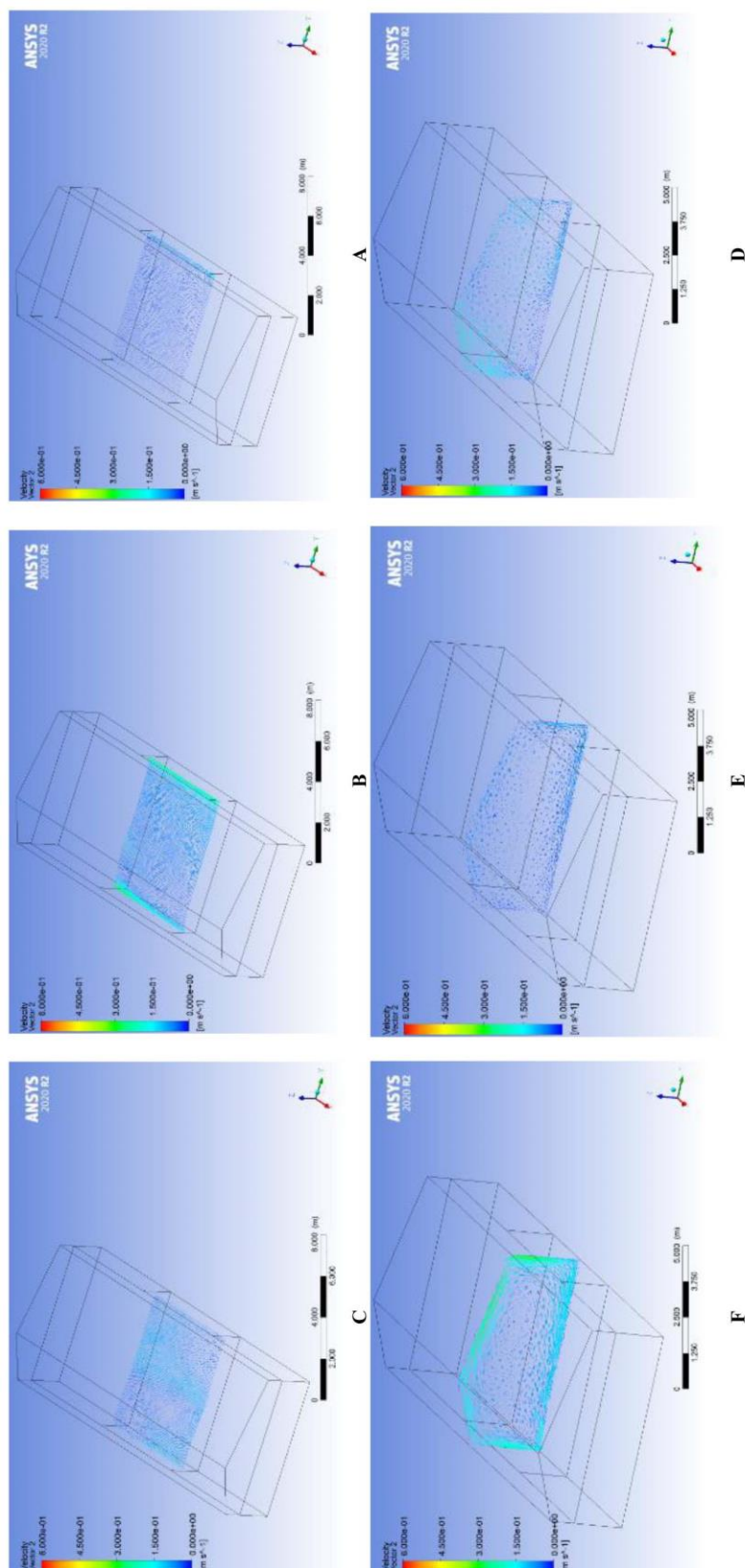
همچنان که انتظار می‌رفت، بیش‌ترین دما مربوط به نواحی نزدیک به دیواره شمالی است که از ساعت ۱۰ صبح تا پایان زمان آزمایش همواره در معرض تابش خورشید قرار دارد. وجود جریان همرفتی هوای بیرون گلخانه با سقف، دمای پایین نواحی نزدیک به سقف را توجیه می‌کند. کم‌ترین دما در ارتفاع یک‌متری مربوط به نواحی نزدیک به دیواره جنوبی است. در ساعت ۱۲، بیش‌ترین دما در نزدیکی دیواره شمالی رخ می‌دهد، در حالی که با گذشت زمان و رسیدن به ساعت ۱۶، محدوده نزدیک به دیواره شمالی خنک‌تر از نواحی مرکزی گلخانه است. تصویر دمایی ساعت ۱۲ مقطع عمودی و افقی حاکی از نامناسب بودن گلخانه برای رشد گیاه است.

همچنان که نتایج شکل ۱۱ تغییرات دمایی در مقطع عمودی را نشان می‌دهد، تراکم خطوط هم‌دما در دیواره‌های مرزی بیش‌تر است و نواحی نزدیک به مرکز گلخانه یکنواختی بیش‌تری از نظر دما و چگالی تجربه می‌کنند. میزان این تغییرات در نزدیکی دیواره جنوبی با گذشت زمان بیش‌تر می‌شود که وجود سایه در این محل را توجیه می‌کند. از آنجایی که هوای داخل گلخانه حین انجام آزمایش



شکل ۱۱- تغییرات دما در مقطع افقی و ارتفاع یک متری از کف گلخانه در ساعت‌های مختلف (A: ساعت ۱۰:۰۰ ساعت ۱۲:۰۰ ساعت ۱۶:۰۰ و تغییرات دما در مقطع عمودی گلخانه در ساعت‌های مختلف (D: ساعت ۱۰:۰۰ ساعت ۱۲:۰۰ ساعت ۱۶:۰۰)

Fig.11. Temperature changes in the horizontal section and a height of one meter from the greenhouse floor at different hours (A: 10:00 am; B: 12:00; C: 16:00 pm) and temperature changes in the vertical section at different hours (A: 10:00 am; B: 12:00; C: 16:00 pm).



شکل ۱۲- جریان هوا در مقطع افقی و ارتفاع یک متری در ساعات مختلف (A: ۱۰:۰۰ صبح، B: ۱۲:۰۰ ظهر، C: ۱۶:۰۰ عصر) و همچنین جریان هوا در مقطع عمودی در ساعات مختلف (D: ۱۰:۰۰ صبح، E: ۱۲:۰۰ ظهر، F: ۱۶:۰۰ عصر)

Fig.12. Air flow in horizontal section and a height of one meter from the greenhouse floor at different hours (A: 10:00 am; B: 12:00; C: 16:00 pm) and air flow in horizontal section at different hours (A: 10:00 am; B: 12:00; C: 16:00 pm)

شامل دما و شدت تابش خورشید، استفاده شد. نتایج نشان داد که گلخانه مدفون در زمین قادر است بخشی از افزایش دمای ناشی از تابش خورشید را به عمق خاک منتقل کند. گلخانه موجود ۱۰۴/۲۱۴ کیلوژول بر مترمربع حرارت را از طریق کف، ۱۷۸/۴۳۳ کیلوژول بر مترمربع از طریق دیواره شمالی و ۱۱۳/۷۵۷ کیلوژول بر مترمربع از طریق دیواره جنوبی در مدت زمان انجام آزمایش به زمین منتقل کرد. اگرچه این میزان در برابر انرژی تولید شده توسط پرتوهای تابش ناچیز به نظر می‌رسد (۴٪)، ولی باید در نظر داشت که در صورت وجود گلخانه بر سطح زمین، میزان پرتوهای تابش ورودی افزایش می‌یابد (با حذف دیواره شمالی و جنوبی و در معرض خورشید قرار گرفتن کل گلخانه)، دیواره شمالی و جنوبی حذف می‌گردد (مخزن دریافت گرمای انباشته) و سطح منبع دریافت پرتوهای تابشی افزایش می‌یابد (در وضعیت موجود منبع دریافت پرتوهای تابش برابر با ۳۳/۷۲ مترمربع است. یعنی سطح دیوار شمالی ۹/۷۲ مترمربع) به اضافه بخش آفتاب‌گیر کف (۲۴ مترمربع) در حالی که در حالت وجود گلخانه بر سطح زمین، مساحت منبع دریافت پرتوهای تابش برابر با ۳۸ مترمربع می‌شود. با بررسی و افزایش ضریب انتقال حرارت دیواره و کف گلخانه (انتخاب مصالح با ضریب انتقال حرارت بالا) و استفاده از سیستم جریان همرفت در پشت دیواره‌ها می‌توان این مقدار را افزایش داد. با توجه به وجود دمای نزدیک به ۴۰ درجه سلسیوس در اواخر فصل پاییز در داخل گلخانه در این منطقه، می‌توان گفت که این گلخانه بدون سیستم سرمایش کارآمد، مناسب تولید گیاه نیست. همچنین با انتخاب پوشش مناسب و شیب سقف متناسب با تابش خورشید، می‌توان ورود پرتوهای تابشی را تا حدودی کاهش داد. تطابق یافته‌ها و شبیه‌سازی مدل دمایی در ارتفاع یک متری و دو متری نشان داد که شبیه‌سازی به کمک CFD قادر است به درستی و با دقت مناسبی شرایط دمایی داخل گلخانه را در ارتفاع مورد نیاز، تخمین بزند و می‌تواند در تحقیقات کاربردی به منظور انتخاب بهینه سازه و مصالح گلخانه با توجه به شرایط آب و هوایی و همچنین به منظور هوشمندسازی گلخانه‌ها در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

از آنجا که کف و دیواره شمالی مهم‌ترین عامل تغییرات دمایی محیط داخل به حساب می‌آید، مشاهده می‌شود که در این نواحی در ساعت ۱۲ بیشترین جریان هوا و به تبع آن بیشترین تبادل حرارت رخ داده است. بیشترین تغییرات جریان هوا در مقطع افقی، ساعت ۱۲ مربوط به دیواره‌های شمالی و جنوبی است. هرچه به سمت غروب آفتاب نزدیک می‌شویم، جریان هوا بیشتر در مرکز گلخانه سرعت پیدا می‌کند. همچنان که در تصاویر مشاهده می‌شود، تغییرات جریان در مقطع افقی سیال کم بوده و در نتیجه یکنواختی قابل‌توجهی در سرعت، چگالی و دما در مقاطع افقی مشاهده می‌شود و تنها تبادل حرارتی بین سیال و دیواره‌ها جریان پرسرعت در کناره‌ها را سبب می‌شود. البته میزان لزجت هوا در شدت سرعت هوا و دیواره‌ها هم مؤثر است (Holman, 2010). این افزایش سرعت سبب افزایش تبادل حرارت بین سیال و دیواره می‌گردد و تا زمانی که این شیب به سمت دیواره باشد، در مناطق گرم مانند خوزستان به‌عنوان مزیت تلقی می‌شود. در تحقیقی روند انتقال حرارت در حجم داخلی گلخانه خورشیدی در دانشگاه کشاورزی مانگولیا چین با پوشش فیلم دو لایه را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بررسی شد و بر کارا بودن این روش محاسبه در پیش‌بینی شرایط دمایی و رطوبت موجود در گلخانه صحه گذاشته شد (Jiao et al., 2020). پژوهشگران دیگری نیز از این روش به منظور بررسی شرایط داخلی گلخانه‌ها از جمله تأثیر سیستم تهویه از سقف در گلخانه‌های تجاری یا تأثیر انرژی تابش خورشید بر محیط داخل گلخانه استفاده کردند و مؤثر بودن این روش محاسباتی در پیش‌بینی محیط داخل گلخانه را تأیید کردند (Munar & Aldana, 2019; Saberian & Sajadieh, 2019).

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از روش دینامیک سیالات محاسباتی به منظور شبیه‌سازی شرایط داخلی یک گلخانه مدفون در خاک با سقف نامتقارن شیشه‌ای با استفاده از متغیرهای بیرونی و داخلی گلخانه

References

1. Abdel Ghany, A. M., & Helal, I. M. (2011). Solar energy utilization by a greenhouse: general relations. *Renewable Energy*, 36, 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.020>.
2. Abu-Hamdeh, N. H., & Reeder, R. C. (2000). Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1285-1290. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x>.
3. Ahamed, S., Guo, H., & Tanino, K. 2019. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, 178, 9-33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017>.
4. Bergman, T. L., Incropera, F. P., Lavine, A. S., & Dewitt, D. P. (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons. Amsterdam.
5. Bolandnazar, E., Sadrnia, H., Rohani, A., & Taki, M. (2019). Prediction of Temperature in a Greenhouse Covered with Polyethylene Plastic Using Artificial Neural Networks, Case Study: Jiroft Region. *Iranian Journal of*

- Biosystem Engineering*, 51(1), 125-137. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.291077.665235>.
6. Dayioğlu, M. A., & Silleli, H. H. (2015). Performance analysis of a greenhouse fan-pad cooling system: gradients of horizontal temperature and relative humidity. *Journal of Agricultural Science*, 21, 132-143. <https://doi.org/10.15832/TBD.25721>.
7. Fidaros, D. K., Baxevanou, C. A., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2010). Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renewable Energy*, 35, 1380-1386. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.013>.
8. Ghani, S., Bakochristou, F., ElBialy, E. M., Gamaledin, A. A., Rashwan, S. M. A., Abdelhalim, M. M., & Ismail, S. M. (2019). Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments– A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12, 48-70. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.09.004>.
9. Ghasemi Mobtaker, H., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., & Matloobi, M. (2019). Simulation of thermal performance of solar greenhouse in north-west of Iran: An experimental validation. *Renewable Energy*, 135, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.003>.
10. Hamdani, M., Taki, M., Rahnama, M., Rohani, A., & Rahmati-joneidabad, M. (2020). Prediction the inside Variables of Even-span Glass Greenhouse with Special Structure by Artificial Neural Network (MLP-RBF) Models. *Journal of Agricultural Machinery*, 10(2), 213-227. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.72346>
11. Holman, J. P. (2010). Heat Transfer. Eighth ed. McGraw-Hill Science, New York.
12. Jiao, W., Qi, L., Lijun, G., Kunyu, L., Shi, R., & Ta, N. (2020). Computational Fluid Dynamics-Based Simulation of Crop Canopy Temperature and Humidity in Double-Film Solar Greenhouse. *Journal of Sensors*, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2020/8874468>.
13. Joudi, K., & Farhan, A. (2015). A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse. *Energy Conversion and Management*, 91, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.052>.
14. Moghaddam, J. J., Ozlati, S., Zarei, Gh., Momeni, D., & Azadshahraki, F. (2021). Ventilation and Cooling Modeling and Lyout of Fans, Pads and Vents of an Octagonal Greenhouse. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 247-262. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.82130>.
15. Munar, E., & Aldana, C. (2019). CFD Simulation of the Increase of the Roof Ventilation Area in a Traditional Colombian Greenhouse: Effect on Air Flow Patterns and Thermal Behavior. *International Journal of Heat and Technology*, 7(3), 881-892. <http://doi.org/10.18280/ijht.370326>
16. Nadi, F., Abdanan Mehdizadeh, S., & Nourani Zonouz, O. (2016). Comparing between predicted output temperature of flat-plate solar collector and experimental results: computational fluid dynamics and artificial neural network. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1), 298-311. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.59698>.
17. Pakari, A., & Ghani, S. (2019). Evaluation of a novel greenhouse design for reduced cooling loads during the hot season in subtropical regions. *Solar Energy*, 181, 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.006>.
18. Roy, J. C., Boulard, T., Kittas, C., & Wang, S. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*, 83, 1-20. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0107>.
19. Saberian, A., & Sajadiye, S. M. (2019). The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation. *Renewable Energy*, 138, 722-737. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.108>.
20. Santolini, E., Pulvirenti, B., Benni, S., Barbaresi, L., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2018). Numerical study of wind-driven natural ventilation in a greenhouse with screens. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.027>.
21. Taki, M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., Rohani, A., & Matloobi, M. (2016a). Heat transfer and MLP neural network models to predict inside environment variables and energy lost in a semi-solar greenhouse. *Energy and Buildings*, 110, 314-29. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.010>.
22. Taki, M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., Rohani, A., & Matloobi, M. (2016b). Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure. *Information Processing in Agriculture*, 3, 157-174. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.06.002>.
23. Taki, M., Rohani, A., & Rahmati-Joneidabad, M. (2018). Solar thermal simulation and applications in greenhouse. *Information Processing in Agriculture*, 5, 83-113. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.10.003>.
24. Wang, J., Li, S., Guo, S., Ma, C., Wang, J., & Sun, J. (2017). Analysis of heat transfer properties of hollow block wall filled by different materials in solar greenhouse. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 10, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.07.003>.
25. Zhang, X., You, S., Tian, Y., & Li, J. (2019). Comparison of plastic film, biodegradable paper and bio-based film mulching for summer tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality. *Sciatica Horticulture*, 249, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.037>.



Monitoring Rice Land Changes Using GIS and RS

A. Mesri¹, F. Rahimi-Ajdadi^{2*} , I. Bagheri²

1- M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

(Corresponding Author Email: rahimi_a@guilan.ac.ir)<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69174.1025>

Received: 28-02-2021

Revised: 17-06-2021

Accepted: 30-06-2021

Available Online: 03-07-2021

How to cite this article:Mesri, A., Rahimi-Ajdadi, F., & Bagheri, I. (2022). Monitoring Rice Land Changes Using GIS and RS. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4): 515-527. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69174.1025>

Introduction

Rice is the fourth most consumed grain worldwide. In recent years, monitoring the area under rice cultivation; as a strategic crop in Gilan province has become more important because of the uncontrolled migration of residents of the southern provinces to it. Remote sensing is one of the practical tools to study the trend of changes in the area under cultivation of agricultural and horticultural products on a large scale and in a short time. This technique can help policymakers to make true and timely decisions. The aim of this study is to estimate the area under rice cultivation in Kiashahr county of Gilan province.

Materials and Methods

The images of the TM sensor of Landsat 5 satellite and the OLI sensor of Landsat 8 satellite were used to prepare land use maps. First, geometric and atmospheric corrections were made to the images. Then, supervised classification using the maximum likelihood algorithm was used to prepare land use maps for each year. Seven main classes/land covers, based on the available data of the area were determined: rice-land, semi-dense forest, sparse forest, built-up area (towns and other urbanized areas), waterbody, sandy area and other areas. Then, the area of each land use was calculated by GIS, and their changes were compared.

Results and Discussion

Overall accuracy and kappa coefficient of classification were 98.45% and 0.98 for 2000, 97.59% and 0.97 for 2010, and 98.72% and 0.98 for 2020, respectively. According to the results, rice land area decreased by 4.42% from 2000 to 2010. It also had a decrease of 2.64% between 2010 and 2020. In total, rice lands decreased by 6.94% between 2000 and 2020, so its area has decreased to 10311.69 hectares. This downward trend can be due to the conversion of rice land to the built-up area. The area of semi-dense forest decreased by 47.48% between 2000 and 2010, but its downward trend decreased to 26.36% between 2010 and 2020. In total, semi-dense forest area decreases by 61.32%, equal to 682.25 hectares over a period of 20 years. This is due to the uncontrolled cutting of trees and the change of land use from semi-dense forests to sparse forests and built-up areas. Also, during this period, built-up areas and sparse forests have grown by 67.94% and 18.73%, respectively. But, semi-dense forests, water bodies and sandy areas have decreased by 61.32%, 4.91% and 61.48%, respectively.

Conclusion

The reduction rate in the area of rice land and semi-dense forest classes between 2010 and 2020 was lower than the ten-year period before, which can be attributed to the adoption of restrictive laws and more inspections by relevant organizations. However, the downward trends in these land uses have continued over the past decade. Meanwhile, the increase of 67.94% of built-up lands indicates that the lost lands in the forest and rice land classes have been converted into the built-up area. The rate of land-use change in the built-up class has the highest rate among the studied classes. This result indicates the need for serious attention to land-use change in the rural area more than before. Another point is that there was a growth in sparse forests between 2000 and 2010, and then a reverse trend was observed between 2010 and 2020, which shows that in a period of 10 years, deforestation has taken place, and in 10 years later, the lands from these destructions have been converted to the built-up area. As a result, serious attention to natural resource organizations is necessary. It is considered that there was a deliberate destruction of forests over time with the aim of personal profit.

Keywords: Land use, Maximum likelihood, Sparse forest, Supervised classification

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۱۵-۵۲۷

پایش سطح زیرکشت برنج با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک سنجش از دور

آرش مصری^۱، فاطمه رحیمی اجدادی^{۲*}، ایرج باقری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

چکیده

سنجش از دور، یکی از ابزارهای کارآمد برای بررسی روند تغییرات سطح زیرکشت محصولات کشاورزی و باغی در سطوح وسیع و زمان کوتاه است. سیاست‌گذاران با آگاهی از این اطلاعات، می‌توانند تصمیمات صحیح و به‌موقعی داشته باشند. مطالعه‌ی حاضر، با هدف تخمین سطح زیرکشت شالیزارهای برنج در بخش کیشهر استان گیلان انجام شد. از تصاویر سنجنده TM ماهواره لندست ۵ و سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ به‌منظور تهیه نقشه‌های کاربری اراضی استفاده شد. ابتدا، تصحیح هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر صورت گرفت. سپس، با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال، نقشه‌های کاربری اراضی منطقه با هفت کاربری شامل اراضی برنج، جنگل نیمه‌انبوه، جنگل تنک، مناطق مسکونی، مناطق آبی، پهنه‌های ماسه‌ای و سایر اراضی تهیه شد. در ادامه، مساحت هر یک از کاربری‌ها محاسبه شد و روند تغییرات، مورد مقایسه قرار گرفت. دقت کلی و ضریب کاپای طبقه‌بندی به‌ترتیب معادل ۹۸/۴۵٪ و ۹۸/۹۸٪ و ۹۸/۷۲٪ و ۹۸/۰۷٪ و ۹۸/۰۷٪ برای سال ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به‌دست آمد. نتایج نشان داد که اراضی برنج در یک بازه ۲۰ ساله، با کاهش ۶/۹۴ درصدی همراه بوده، به‌طوری‌که مساحت آن از ۱۱۰۸۰/۶۶ هکتار در سال ۲۰۰۰ به ۱۰۳۱۱/۶۹ هکتار در سال ۲۰۲۰ رسیده است. همچنین، در این مدت مناطق مسکونی و جنگل‌های تنک به‌میزان ۶۷/۹۴ و ۱۸/۷۳ درصد رشد کرده‌اند، اما جنگل‌های نیمه‌انبوه، مناطق آبی و پهنه‌های ماسه‌ای به‌ترتیب ۶۱/۳۲، ۴/۹۱ و ۶۱/۴۸ درصد کاهش داشتند. با توجه به نتایج، توجه جدی به تغییر کاربری اراضی برنج و تخریب جنگل‌ها ضروری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حداکثر احتمال، جنگل تنک، طبقه‌بندی نظارت‌شده، کاربری اراضی

مقدمه

با ۳۸/۵ درصد، گیلان با ۳۱/۹ درصد و گلستان با ۹/۹ درصد قرار دارد. همچنین خوزستان با ۹/۲ درصد و فارس با ۳/۹ درصد در رده‌های بعدی قرار دارند (Izaddoost, Samizadeh, Rabiei, & Abdollahi, 2013). زندگی روستاییان و معیشت آن‌ها، به‌ویژه در نواحی شمالی کشور به کشاورزی وابسته است. استفاده بهینه از زمین‌های زراعی، بذره‌ای اصلاح شده، ماشین‌آلات، سیلوها، انبارها و غیره نیازمند مدیریت صحیح و دقیق مسئولان کشوری و استانی است. سیاست‌گذاران، با در اختیار داشتن سطح زیرکشت محصولات می‌توانند خدمات و تجهیزات را منطبق با داشته‌های موجود ارائه کنند. همچنین این اطلاعات پتانسیل واقعی نواحی کشاورزی را مشخص کرده و از تغییرات کاربری آن جلوگیری خواهد کرد (Ziaeeian, Firouzabadi, Sayad Bidhendi, & Eskandari Noudeh, 2009). با توجه به روند رو به رشد جمعیت و افزایش تغییرات کاربری اراضی در بخش کشاورزی، نیاز به اطلاعات دقیق و به‌روز از سطح زیرکشت محصولات، میزان عملکرد محصول در واحد سطح و بررسی تغییرات آن‌ها جهت مدیریت صحیح منابع اجتناب‌ناپذیر است. به‌دست‌آوردن این اطلاعات با استفاده از روش‌های سنتی، زمان زیادی می‌برد و صرفه اقتصادی ندارد (Prasad, Singh, Tare, & Kafatos, 2007; Shen et al., 2009). در ایران، معمولاً تعیین

برنج چهارمین غله پرمصرف جهان و غذای بیشتر از نصف مردم به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه است (Darvishzadeh, Matkan, & Eskandari, 2011; FAO, 2019; Torbick, Chowdhury, Salas, & Qi, 2017). همچنین این محصول یک سوم از کل سطح زیر کشت جهانی غلات را در برداشته که حدود ۳۵ تا ۶۵ درصد کالری مصرفی ۲/۷ میلیارد نفر را تامین می‌کند (Kazemi Posht Mousavi, Pirdashti, Bahmanyar, & Nasiri, 2007). بیشتر از ۹۰ درصد محصول برنج جهان به‌دلیل آب و هوای گرم و مرطوب (عرض جغرافیایی ۵۵ درجه شمالی تا ۳۶ درجه جنوبی) در قاره آسیا تولید می‌شود (Ajith, Geethalakshmi, Ragunath, Pazhanivelan, & Panneerselvam, 2017). سطح زیر کشت برنج در ایران، حدود ۴۳۷۲۳۱ هکتار است (FAO, 2019) که بیشتر این اراضی در استان‌های شمالی، شامل استان‌های مازندران

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: rahimi_a@guilan.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69174.1025>

به ترتیب با اختلاف ۱۶/۸ و ۱۴/۲ درصدی می‌تواند مساحت محصولات مختلف را تخمین بزند (Alipour, Aghkhani, & Abasspour-Fard, & Sepehr, 2014). در پژوهشی دیگر به منظور برآورد سطح زیرکشت باغات از داده‌های IRS-P6 استفاده شد. طبقه‌بندی داده‌ها با الگوریتم‌های مختلف و به دو صورت هفت کلاسه (طبقات کاربری اراضی) و دو کلاسه (باغ و غیر باغ) انجام شد. نتایج نشان داد که الگوریتم حداکثر احتمال در طبقه‌بندی به صورت هفت کلاسه و دو کلاسه دارای بیشترین صحت کلی^۳ و ضریب کاپا^۴ بودند (Younesi, Ahmadi Sani, & Sharafi, 2019). در تحقیقی رابطه رگرسیونی بین چندین شاخص پوشش گیاهی (NDVI^۵، SAVI^۶، DVI^۷ و RVI^۸) استخراج شده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و عملکرد برنج در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ ارزیابی شد. مقایسه مدل‌های تولیدی نشان از برتری شاخص NDVI داشت (Yaghouiti, Pazira, Amiri, & Masihabadi, 2018). تصاویر چند زمانه ماهواره لندست ETM⁺ به منظور تعیین سطح زیرکشت و سن گیاه برنج در منطقه بالی اندونزی استفاده شد. برای این منظور شاخص جدیدی به نام RGVI^۹ توسعه داده شد (Nuarsa, Nishio, & Hongo, 2010). در پژوهش دیگری نتیجه شد که از بین شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص RGVI بیشترین همبستگی را با عملکرد برنج داشته و با آن می‌توان عملکرد شالیزارهای برنج طی ۳۰ تا ۶۰ روز قبل از برداشت را پیش‌بینی کرد (Paul, Saha, & Hembram, 2020). تحقیقی به منظور شناسایی محصولات با استفاده از تصاویر ماهواره SPOT 5 انجام گرفت. در این تحقیق از پنج روش طبقه‌بندی برای شناسایی انواع محصولات استفاده شد. نتایج نشان داد که دو روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال و ماشین‌های پشتیبان بردار^{۱۰} از دیگر روش‌های مطالعه شده بهتر هستند (Yang, Everitt, & Murden, 2011). در تحقیقی دیگر از تصاویر TM ماهواره لندست به منظور طبقه‌بندی کاربری اراضی استفاده شد. در این تحقیق از روش‌های نظارت‌نشده و سیزده مورد از روش‌های نظارت‌شده برای طبقه‌بندی استفاده شد. نتایج نشان داد زمانی که نمونه آموزشی به تعداد مناسب انتخاب شود، اکثر الگوریتم‌ها عملکرد خوبی دارند اما زمانی که تعداد نمونه‌های آموزشی کاهش می‌یابد، اختلاف دقت میان الگوریتم‌ها افزایش می‌یابد (Li, Wang, Wang, Hu, & Gong, 2014). در پژوهشی از داده‌های چند زمانه سنجنده

سطح زیرکشت محصولات با سه روش کارشناسی، فهرست‌برداری و استفاده از فناوری‌های جدید انجام می‌گیرد. تخمین سطح زیرکشت در روش کارشناسی دارای دقت بسیار اندکی است و نمی‌توان از نتایج آن در تصمیم‌گیری‌های مهم کشور استفاده کرد. در روش برآورد از طریق فهرست‌برداری، هرچند سطح زیرکشت محصول تخمین زده می‌شود، اما پراکندگی آن را نشان نمی‌دهد. همچنین در این روش هزینه نیروی انسانی بسیار بالا خواهد بود. سومین روش، استفاده از فناوری‌های نوینی چون سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی است (Ziaieian Firouzabadi et al., 2009). این روش دارای محاسن فراوان بوده که در روش‌های سنتی قبلی وجود ندارد. علاوه بر مزایای زیاد ذکرشده، این فناوری، نیل به اهداف مدیریت پایدار یعنی هزینه و زمان کمتر تهیه اطلاعات را نیز برآورده می‌سازد (Khatami, Mountrakis, & Stehman, 2016; Weiss, Jacob, & Duveiller, 2020). در دهه‌های گذشته استفاده از سنجش از دور در بخش کشاورزی افزایش یافته و اکنون سنجش از دور به ابزاری موثر و پرکاربرد برای نقشه برداری از محصولات تبدیل شده است (Atzberger, 2013; Chauhan, Darvishzadeh, Boschetti, Pepe, & Nelson, 2019). تعیین عملکرد محصولات، تمایز میان محصولات، تخمین سطح زیر کشت و مدل‌سازی میزان رشد محصول، از جمله کاربردهای سنجش از دور در بخش کشاورزی هستند (Mondal et al., 2014; Singha, Dong, Zhang, & Xiao, 2019). در ادامه به برخی از نتایج مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و تعیین سطح زیرکشت محصولات کشاورزی پرداخته شده است.

در پژوهشی از تصاویر سنجنده AVHRR ماهواره NOAA به‌منظور طبقه‌بندی محصول برنج و برآورد سطح زیرکشت آن در استان گیلان استفاده شد. برای این منظور از روش طبقه‌بندی چند زمانه متکی بر استخراج روزانه NDVI بیشینه به منظور حذف ابر استفاده شد. نتایج نشان از دقت ۹۱/۹۶ درصدی سطح زیرکشت محاسبه شده در مقایسه با نقشه مرجع دارد (Ansari Amoli & Alimohammadi Sarab, 2011). در پژوهشی دیگر برای تعیین سطح زیرکشت دو محصول برنج و سویا در چهار حوزه آبخیز استان گلستان از سه روش طبقه‌بندی نظارت شده استفاده شد. نتایج نشان داد که روش‌های طبقه‌بندی حداکثر احتمال^۱ و کم‌ترین فاصله از میانگین^۲ به ترتیب برای تخمین سطح زیرکشت برنج و سویا روش مناسبی هستند (Dashti Marvili, Kamkar, & Kazemi, 2019). نتایج تحقیق دیگری حاکی از آن بود که سطح زیر کشت محاسبه شده با استفاده از دو روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال و شبکه عصبی

- 3- Overall Accuracy
- 4- Kappa Coefficient
- 5- Normalized Difference Vegetation Index
- 6- Soil Adjusted Vegetation Index
- 7- Difference Vegetation Index
- 8- Ratio Vegetation Index
- 9- Rice Growth Vegetation Index
- 10- Support Vector Machine

- 1- Maximum Likelihood
- 2- Minimum Distance

عرض جغرافیایی $37^{\circ} 16' 32''$ تا $37^{\circ} 28' 20''$ شمالی واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع متوسط این منطقه، ۲۶ متر پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد است. میانگین سالیانه دما $16/71^{\circ}$ سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه آن $1356/38$ میلی‌متر است. میانگین حداکثر دما در گرم‌ترین ماه‌های سال (تیر و مرداد) 33° سانتی‌گراد و متوسط حداقل دما در سردترین ماه‌های سال (دی و بهمن) $0/4^{\circ}$ سانتی‌گراد بوده است (Faridi, 2006; Naghinezhad, Saeidi Mehrvarz, Norouzi, & Faridi, 2006).

داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، از تصاویر سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ سنجنده‌ی TM، ماهواره لندست ۵ و تصویر ۲۰۲۰ سنجنده‌ی OLI ماهواره لندست ۸ به منظور تهیه نقشه‌های کاربری اراضی استفاده شد (<http://earthexplorer.usgs.gov>). تصاویر، بر مبنای میزان کمترین درصد ابرناکی و تقویم رشد محصول برنج در منطقه مورد مطالعه، از سایت زمین‌شناسی آمریکا دریافت شد (جدول ۱). همچنین، در این مطالعه از نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده در قالب شیپ فایل^۲، که در دهه‌ی ۱۳۸۰ تهیه شده بود و نیز نقشه گوگل ارث^۳ برای تعیین نقاط کنترل زمینی و تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید. به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای، یافتن بهترین ترکیب باندی، تعیین نقاط تعلیمی و تهیه نقشه‌های کاربری مربوط به هر سال از نرم‌افزارهای ENVI 5.3، ILWIS 3.3، Google Earth Pro 7.3.2 و Arc GIS 10.4 استفاده شد.

پیش‌پردازش تصاویر

در این مرحله، تصاویر از نظر هندسی، اتمسفری و رادیومتریک تصحیح شدند. ابتدا تصحیح هندسی بر روی تصاویر صورت گرفت. لازم به ذکر است تصاویر اخذ شده از سایت USGS که با پسوند L1T تهیه شده‌اند، دارای تصحیحات هندسی می‌باشند، اما از آنجا که هدف این مطالعه مقایسه تصاویر چندزمانه می‌باشد، برای انطباق کامل تصاویر سه سال تصویر سال ۲۰۲۰ به دلیل دقت بالاتر آن، به عنوان تصویر مرجع در نظر گرفته شد و دو تصویر ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ با روش تصویر به تصویر^۴ با تصویر ۲۰۲۰ زمین مرجع شدند. همچنین، به دلیل اثرات جو بر روی میزان انرژی ثبت شده توسط سنجنده، برای تحلیل داده‌های تصویر می‌بایست اثر جو در صورت امکان تعدیل می‌شد. در این تحقیق، به دلیل آن که ماهیت پردازش صورت گرفته، طبقه‌بندی بود، اثرات جو بر روی نتایج تأثیر قابل‌توجهی نداشت. بنابراین از روش تصحیح اتمسفریک ساده تفریق پیکسل‌های تاریک^۵

OLI ماهواره لندست ۸ برای تعیین بهترین شاخص استخراج آب به منظور نظارت بر مناطق کشت برنج در ژاپن استفاده شد. پس از مقایسه شش شاخص، شاخص NDWI-GS1^۱ که از باندهای سبز و مادون قرمز با طول موج کوتاه استفاده می‌کند بهترین عملکرد و کمترین میزان خطا در برآورد مناطق کشت برنج را داشت (Sakamoto, Sprague, Okamoto, & Ishitsuka, 2018).

در سال‌های اخیر، پایش وضعیت سطح زیر کشت برنج، به عنوان یک محصول استراتژیک در استان گیلان، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. دلیل این امر، رشد مناطق ساحلی و توریستی استان و مهاجرت بی‌رویه و کنترل نشده ساکنین استان‌های جنوبی کشور به این مناطق می‌باشد که اخیراً به دلیل پدیده خشکسالی در جنوب رشد بیشتری داشته‌است. این قبیل مهاجرت‌ها به شدت سبب تغییر و تبدیل اراضی کشاورزی به مناطق مسکونی شده است. علاوه بر این، شیوع پدیده‌ی ویلاسازی، چه توسط شهروندان بومی استان و چه توسط اهالی استان‌های پرجمعیت و صنعتی اطراف، منجر به تغییر کاربری بسیاری از اراضی، به خصوص اراضی شالیزاری توسط روستاییان شده است. روند این تغییرات در سال‌های اخیر به حدی چشمگیر بوده است که تبدیل به یکی از معضلات اصلی استان‌های شمالی کشور شده است، به طوری که توجه بسیاری از مسئولین استان را به خود معطوف کرده است. واضح است، قدم اول در مدیریت و کنترل معضل به وجود آمده، امکان رصد وضعیت موجود و بررسی روند این تغییرات در چند دهه‌ی اخیر می‌باشد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی سطح زیر کشت برنج در طی یک فاصله زمانی ۲۰ ساله، بین سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ در بخش کیاشهر از شهرستان آستانه اشرفیه در استان گیلان با استفاده از فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی و مقایسه این تغییرات است. گفتنی است، این بخش یکی از مناطق ساحلی و گردشگری استان گیلان بوده و به جهت وجود پارک ملی بوجاق به عنوان یکی از زیستگاه‌های ارزشمند حیات وحش حائز اهمیت بین‌المللی می‌باشد. از اهداف فرعی تحقیق، بررسی تغییر کاربری سایر اراضی، شامل اراضی جنگلی، مسکونی، آبی و پهنه‌های ماسه‌ای و میزان تبدیل آن‌ها به یکدیگر می‌باشد.

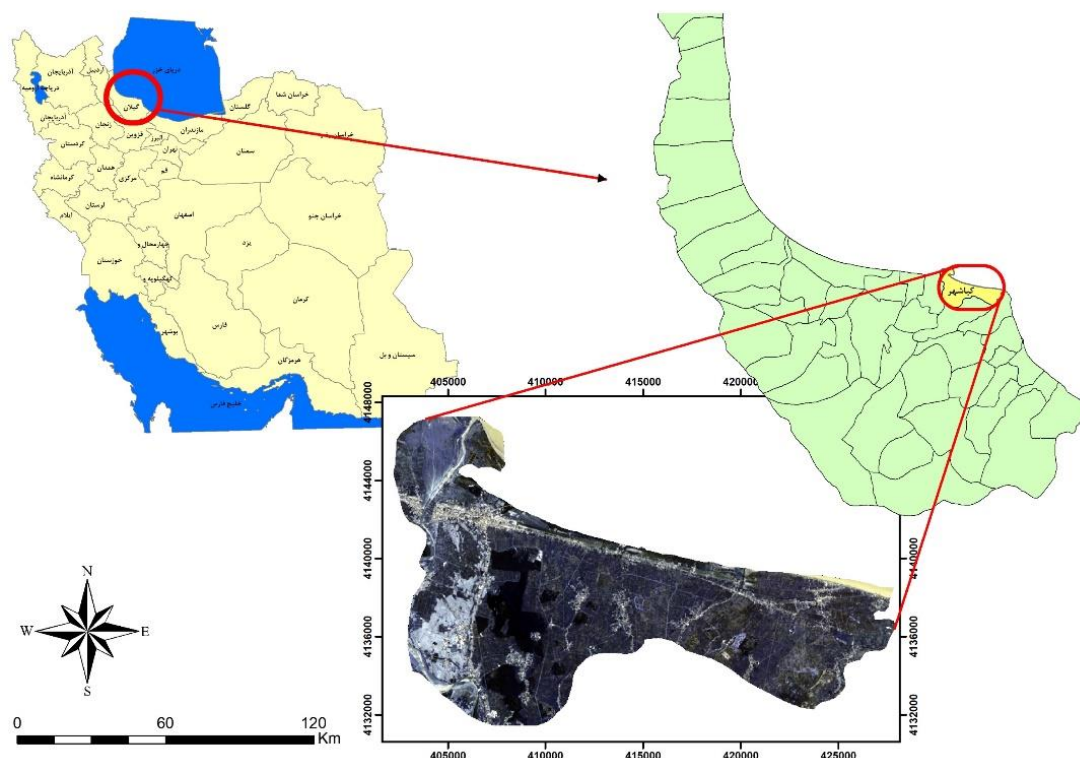
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

بندر کیاشهر، شهری در فاصله ۱۷ کیلومتری آستانه اشرفیه است که با وسعت نزدیک به ۱۷۰ کیلومتر مربع، در شمال استان گیلان و در طول جغرافیایی $32^{\circ} 32' 49''$ تا $36^{\circ} 15' 11''$ شرقی و

2- Shape file
3- Google Earth
4- Image to Image
5- Dark Subtraction

1- Normalized Difference Water Index (Spectral bands: Green and SWIR1)



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Location of the study area

جدول ۱- مشخصات تصاویر مورد استفاده در طبقه‌بندی

Table 1- Characteristics of the images used in the classification

ماهواره Satellite	سنجنده Sensor	تاریخ Date
لندست ۵ Landsat5	TM	06/06/2000
لندست ۵ Landsat5	TM	02/06/2010
لندست ۸ Landsat8	OLI	13/06/2020

طبقه‌بندی تصاویر

برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، از طبقه‌بندی نظارت شده و به روش حداکثر احتمال استفاده شد. روش حداکثر احتمال، یکی از دقیق‌ترین روش‌های طبقه‌بندی در اکثر تحقیقات گزارش شده است (Richards, 1999). در این روش، احتمال این که یک پیکسل بتواند به هر یک از کلاس‌های موجود تعلق یابد محاسبه می‌شود و سپس پیکسل به کلاسی که بیشترین احتمال را دارد، اختصاص می‌یابد (Godarzi Mehr, Abbaspour, Ahadnezhad, & Khakbaz, 2012). برای محدوده‌ی مورد مطالعه هفت کاربری شامل اراضی برنج، جنگل نیمه‌انبوه، جنگل تنک، مناطق مسکونی، مناطق آبی،

در حالت ایده‌آل، پدیده‌های تیره دارای تابش صفر در همه طول موج‌ها هستند. در این روش فرض می‌شود که در هر باند از تصویر، می‌توان پیکسل‌هایی مانند آب یافت که مقادیر بازتابندگی آن‌ها صفر یا نزدیک به صفر باشد. به این ترتیب اثر پخش جوی به صورت مقدار ثابت به پیکسل‌ها در هر باند اضافه می‌گردد. به همین جهت برای حذف خطاهای اتمسفریک، باید مقدار ثابتی از ارزش پیکسل‌های هر باند کم شود (Bagan & Yamagata, 2012).

برای تشکیل تصویر با بیشترین قدرت تفکیک و نمایش بهتر تغییرات منطقه مورد مطالعه، از شاخص OIF^۱ برای تعیین بهترین ترکیب باندی استفاده شد. بیشترین میزان OIF برای تصاویر مربوط به هر سال، در جدول ۲ آورده شده است.

1- Optimum Index Factor

حداکثر احتمال، نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ تهیه شد.

پهنه‌های ماسه‌ای و سایر اراضی تعیین گردید. با استفاده از نرم‌افزار گوگل ارث و نقشه‌های موجود از کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، و به‌کارگیری طبقه‌بندی نظارت‌شده به روش

جدول ۲- نتایج حاصل از شاخص OIF
Table 2- Results from the OIF index

سال Year	ترکیب باندها Bands	مقدار شاخص Index value
2000	1,4,5	62.29
2010	1,4,5	62.93
2020	4,5,7	8104.94

اعتبارسنجی و ارزیابی صحت طبقه‌بندی

جهت ارزیابی دقت طبقه‌بندی، از نمونه‌های تعلیمی‌ای استفاده شد که در روند طبقه‌بندی دخالت داده نشده بودند. برای هر یک از کلاس‌ها، ۷۵ درصد پیکسل‌ها به‌عنوان نمونه‌های آموزشی در طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفتند و ۲۵ درصد مابقی پیکسل‌ها به‌عنوان نمونه‌های اعتبارسنجی در نظر گرفته شدند. ارزیابی دقت و صحت نقشه‌های طبقه‌بندی شده با استفاده از پارامترهای دقت کلی، ضریب کاپا، دقت تولیدکننده^۱، دقت کاربر^۲، خطای اضافه^۳ و خطای حذف^۴ انجام گرفت. دقت کلی، میانگینی از دقت طبقه‌بندی است و از نسبت تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده به کل پیکسل‌های طبقه‌بندی شده در تمام طبقات به‌دست می‌آید. یکی دیگر از پارامترهای دقت که از ماتریس خطا استخراج می‌شود ضریب کاپا است که دقت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند (Mather & Tso, 2016). مزیت ضریب کاپا نسبت به دقت کلی، در استفاده از مقادیر حاشیه‌ای ماتریس خطا برای محاسبه دقت است. علاوه بر آن، دقت کلی یک برآورد خوش‌بینانه است و همیشه دقت را بالاتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. از طرفی، دقت کلی و ضریب کاپا با تمام طبقات سر و کار دارند و اطلاعاتی درباره هر کلاس نمی‌دهند. برای محاسبه دقت در هر کلاس مجزا، باید از پارامترهایی نظیر دقت کاربر و دقت تولیدکننده استفاده شود. در جدول ماتریس خطا، خطای حذف و اضافه نیز بیان می‌گردد. خطای اضافه عبارت است از درصدی از پیکسل‌ها که متعلق به کلاس مورد نظر نبوده، ولی در آن کلاس قرار گرفته‌اند. خطای حذف، درصدی از پیکسل‌ها هستند که در اصل، متعلق به کلاس مورد نظر بوده، ولی به اشتباه در کلاس دیگر قرار گرفته‌اند (Alipour et al., 2014).

نتایج و بحث

ماتریس‌های خطای طبقه‌بندی در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰، شامل مقادیر دقت کلی، ضریب کاپا، خطای اضافه، خطای حذف، صحت تولیدکننده و صحت کاربر، به‌ترتیب در جداول ۳ تا ۵ نشان داده شده‌اند.

با توجه به جداول ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود که پیکسل‌های طبقه اراضی برنج از سایر طبقات به‌خوبی قابل تفکیک بوده و این امر ناشی از یکپارچگی، فشردگی و گستردگی کلاس اراضی برنج در منطقه است. به‌طور کلی هرچه که مزارع برنج متراکم‌تر بوده و فضای خالی در میان آن‌ها کمتر باشد، طبقه‌بندی تصویر از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود. همچنین میزان دقت کلی برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به‌ترتیب برابر با ۹۸/۴۵، ۹۸/۵۹ و ۹۸/۷۲ درصد است. میزان ضریب کاپا برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ نیز به‌ترتیب برابر با ۰/۹۸۱، ۰/۹۷۰ و ۰/۹۸۴ است. نتایج حاصل از دقت کلی و ضریب کاپا در هر سال، نشان از دقت بالای طبقه‌بندی دارد. بالاتر بودن ضریب کاپا در تصاویر جدیدتر به دلیل وجود نمونه‌های کنترل زمینی نزدیک‌تر از نظر زمانی به این سال‌ها و قدرت تفکیک بیشتر این تصاویر می‌باشد. نقشه‌های کاربری اراضی تولیدشده، در شکل‌های ۲ تا ۴ به نمایش درآمده است. همچنین، مقادیر مربوط به مساحت هر یک از کاربری‌ها بر حسب هکتار و درصد در جدول ۶ ارائه شده است. در جدول ۷ میزان تغییرات هر یک از کاربری‌ها در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفته است. اراضی برنج در سال ۲۰۰۰ با مساحت ۱۱۰۸۰/۶۶ هکتار حدود ۵۸ درصد از کل کاربری‌های این منطقه را دربر می‌گیرد. مساحت این اراضی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ کاهش ۴/۴۲ درصدی داشته است. همچنین در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با کاهش ۲/۶۴ درصدی رو به رو بوده است. در مجموع اراضی برنج از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ با کاهش ۶/۹۴ درصدی همراه بوده و مساحت آن به

- 1- Producer Accuracy
- 2- User Accuracy
- 3- Commission
- 4- Omission

مجموع در این مدت ۲۷۹/۱۸ هکتار معادل ۱۸/۷۳ درصد از جنگل‌های تنک افزایش داشته است. بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ مساحت اراضی مسکونی ۳۲/۷۸ درصد رشد داشته است. همچنین در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ مساحت آن با ۲۶/۴۸ درصد افزایش همراه بوده است. در مجموع مساحت مناطق مسکونی ۱۶۹۵/۸۴ هکتار معادل ۶۷/۹۴ درصد رشد داشته است. این رشد می‌تواند ناشی از افزایش جمعیت در منطقه، مهاجرت روستاییان به شهرها و در نتیجه تغییر کاربری اراضی زراعی و جنگلی به مناطق مسکونی باشد. پهنه‌های ماسه‌ای در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ با کاهش مساحت به میزان ۵۸/۵۶ درصد رو به رو بوده است. همچنین بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، ۷/۰۵ درصد کاهش داشته است. در مجموع مساحت کاربری پهنه‌های ماسه‌ای بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، ۱۴۳/۱۵ هکتار، معادل ۶۱/۴۸ درصد کاهش داشته است. این روند نزولی همراه با افزایش ساخت و سازها در مناطق ساحل، همراه بوده است.

جدول ۳- ماتریس خطای طبقه‌بندی تصویر به روش حداکثر احتمال (سال ۲۰۰۰)

	اراضی برنج Rice lands	جنگل های نیمه انبوه Semi-dense forests	جنگل های تنک Sparse forests	مناطق مسکونی Built-up areas	مناطق آبی Water body	پهنه های ماسه ای Sand areas	سایر Other	کل Total
اراضی برنج Rice lands	108	0	0	0	0	0	0	108
جنگل های نیمه‌انبوه Semi-dense forests	0	50	0	0	0	0	0	50
جنگل های تنک Sparse forests	0	0	55	0	0	0	0	55
مناطق مسکونی Built-up areas	0	0	0	52	0	0	0	52
مناطق آبی Water body	0	0	0	0	28	0	0	28
پهنه های ماسه‌ای Sand areas	0	0	0	0	0	63	7	70
سایر Other	0	0	0	0	0	0	89	89
کل Total	108	50	55	52	28	63	96	452
خطای اضافه (%) Commission (%)	0	0	0	0	0	10	0	
خطای حذف (%) Omission (%)	0	0	0	0	0	0	7.29	
صحت تولیدکننده (%) Producer Accuracy (%)	100	100	100	100	100	100	92.71	
صحت کاربر (%) User Accuracy (%)	100	100	100	100	100	90	100	
Kappa Coefficient = (0.981) ضریب کاپا				Overall Accuracy = (98.45 %) دقت کلی				

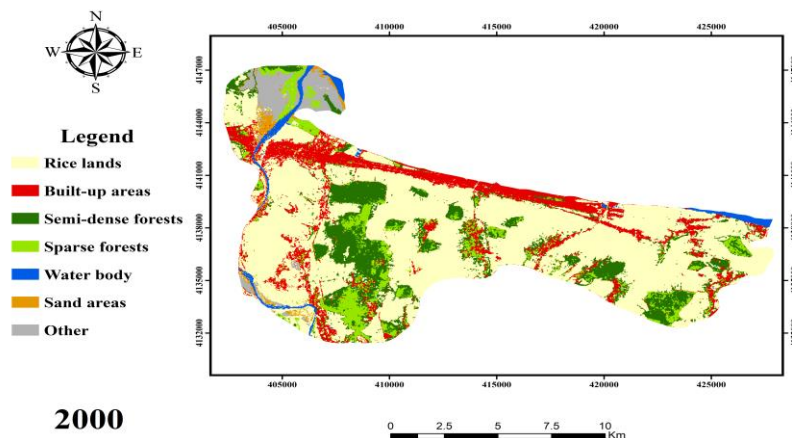
جدول ۴- ماتریس خطای طبقه‌بندی تصویر به روش حداکثر احتمال (سال ۲۰۱۰)

Table 4- The classification error matrix of image using maximum likelihood method (2010)

	اراضی برنج Rice lands	جنگل‌های نیمه‌انبوه Semi-dense forests	جنگل‌های تنک Sparse forests	مناطق مسکونی Built-up areas	مناطق آبی Water body	پهنه‌های ماسه‌ای Sand areas	سایر Other	کل Total
اراضی برنج Rice lands	82	0	0	2	0	0	0	84
جنگل‌های نیمه‌انبوه Semi-dense forests	0	111	0	0	0	0	0	111
جنگل‌های تنک Sparse forests	0	6	52	0	0	0	0	58
مناطق مسکونی Built-up areas	0	0	0	46	0	1	0	47
مناطق آبی Water body	0	0	0	0	31	0	0	31
پهنه‌های ماسه‌ای Sand areas	0	0	0	2	0	18	0	20
سایر Other	0	0	0	0	0	0	107	107
کل Total	82	117	52	50	31	19	107	458
خطای اضافه (%) Commission (%)	2.38	0	10.34	2.13	0	10	0	
خطای حذف (%) Omission (%)	0	5.13	0	8	0	5.26	0	
صحت تولیدکننده (%) Producer Accuracy (%)	100	94.87	100	92	100	94.74	100	
صحت کاربر (%) User Accuracy (%)	97.62	100	89.66	97.87	100	90	100	
Kappa Coefficient = (0.970) ضریب کاپا				Overall Accuracy = (97.59 %) دقت کلی				

درصدی همراه بوده و در مجموع در این بازه ۲۰ ساله مساحت مناطق آبی ۱۹/۲۸ هکتار، معادل ۴/۹۱ درصد کاهش داشته است.

بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ مساحت مناطق آبی ۲/۵۳ درصد رشد داشته است، اما در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با کاهش ۷/۲۵



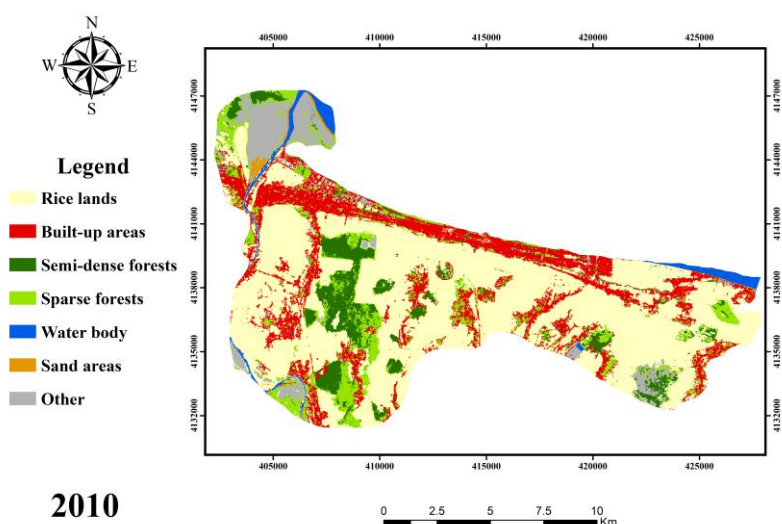
شکل ۲- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۰

Fig.2. Land use map of 2000

جدول ۵- ماتریس خطای طبقه‌بندی تصویر به روش حداکثر احتمال (سال ۲۰۲۰)

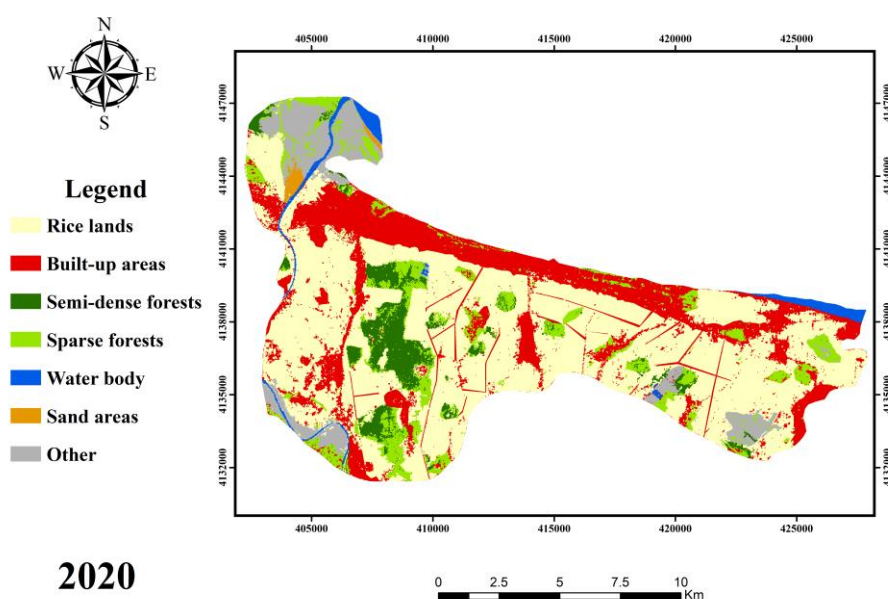
Table 5- The classification error matrix of image using maximum likelihood method (2020)

	اراضی برنج Rice lands	جنگل‌های نیمه‌انبوه Semi-dense forests	جنگل‌های تنک Sparse forests	مناطق مسکونی Built-up areas	مناطق آبی Water body	پهنه‌های ماسه‌ای Sand areas	سایر Other	کل Total
اراضی برنج Rice lands	116	0	0	0	0	0	0	116
جنگل‌های نیمه‌انبوه Semi-dense forests	0	48	0	0	0	0	0	48
جنگل‌های تنک Sparse forests	0	1	36	0	0	0	0	37
مناطق مسکونی Built-up areas	0	0	0	43	0	1	3	47
مناطق آبی Water body	0	0	0	0	53	0	0	53
پهنه‌های ماسه‌ای Sand areas	0	0	0	0	0	18	0	18
سایر Other	0	0	0	0	0	0	73	73
کل Total	116	49	36	43	53	19	76	392
خطای اضافه (%) Commission (%)	0	0	2.7	8.51	0	0	0	
خطای حذف (%) Omission (%)	0	2.04	0	0	0	5.26	3.95	
صحت تولیدکننده (%) Producer Accuracy (%)	100	97.96	100	100	100	94.74	96.05	
صحت کاربر (%) User Accuracy (%)	100	100	97.30	91.49	100	100	100	
Kappa Coefficient = (0.984) ضریب کاپا				Overall Accuracy = (98.72 %) دقت کلی				



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۰

Fig.3. Land use map of 2010



2020

شکل ۴- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰

Fig.4. Land use map of 2020

جدول ۶- مساحت هر کاربری در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰

Table 6- Area of each land use in 2000, 2010 and 2020

	2000		2010		2020	
	مساحت Area (ha)	مساحت Area (%)	مساحت Area (ha)	مساحت Area (%)	مساحت Area (ha)	مساحت Area (%)
اراضی برنج Rice lands	11080.66	57.78	10590.85	55.22	10311.69	53.77
جنگل‌های نیمه‌انبوه Semi-dense forests	2743.19	14.30	1440.66	7.51	1060.94	5.53
جنگل‌های تنک Sparse forests	1490.58	7.78	1908.34	9.95	1769.76	9.23
مناطق مسکونی Built-up areas	2496.09	13.01	3314.24	17.29	4191.93	21.86
مناطق آبی Water body	392.74	2.05	402.66	2.1	373.46	1.95
پهنه‌های ماسه‌ای Sand areas	232.84	1.21	96.50	0.50	89.7	0.47
سایر Other	741.63	3.87	1424.47	7.43	1380.26	7.19

جدول ۷- تغییرات مساحت هر یک از کاربری‌ها در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰

Table 7- Changes in the area of each land use in 2000, 2010 and 2020

	2000-2010		2010-2020		2000-2020	
	مساحت Area (ha)	مساحت Area (%)	مساحت Area (ha)	مساحت Area (%)	مساحت Area (ha)	مساحت Area (%)
اراضی برنج Rice lands	-489.81	-4.42	-279.16	-2.64	-768.97	-6.94
جنگل‌های نیمه‌انبوه Semi-dense forests	-1302.53	-47.48	-379.71	-26.36	-1682.25	-61.32
جنگل‌های تنک Sparse forests	417.76	28.03	-138.58	-7.26	279.18	18.73
مناطق مسکونی Built-up areas	818.16	32.78	877.68	26.48	1695.84	67.94
مناطق آبی Water body	9.92	2.53	-29.20	-7.25	-19.28	-4.91
پهنه‌های ماسه‌ای Sand areas	-136.34	-58.56	-6.81	-7.05	-143.15	-61.48
سایر Other	682.84	92.07	-44.22	-3.10	638.63	86.11

نتیجه‌گیری

تا ۲۰۲۰ است که این نشان می‌دهد، در یک دوره ۱۰ ساله اقدام به تخریب جنگل‌ها شده و در دوره ده ساله بعد زمین‌های حاصل از این تخریب‌ها به کاربری مسکونی تغییر یافته است. در نتیجه، لزوم توجه جدی ادارات و سازمان‌های منابع طبیعی به تخریب عمدی جنگل‌ها در طول زمان، با هدف تغییر کاربری آن‌ها به مسکونی و فروش آن ضروری به نظر می‌رسد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که می‌توان از فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان روشی دقیق، قابل اطمینان و سریع برای مطالعه و بررسی، شناسایی و مقایسه کاربری‌های اراضی و تغییرات آن‌ها، به‌خصوص کاربری زراعی و جنگل‌ها استفاده کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت مالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و پارک علم و فناوری گیلان از این پایان‌نامه در قالب کد اعتباری ۲۶-۰۰۱-۰۷۴۳۰۰۰۷۴۳ قدردانی می‌نمایند.

در تحقیق حاضر، به بررسی روند تغییرات کاربری‌های اراضی مختلف به‌ویژه سطح زیر کشت برنج در بخش کیشهر شهرستان آستانه پرداخته شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، میزان نرخ تغییرات کاربری برای کلاس‌های شالیزار و جنگل نیمه‌انبوه در بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ کمتر از دوره ده ساله قبل از آن بود که این کاهش روند را می‌توان به اتخاذ قوانین بازدارنده و نظارت بیشتر سازمان‌های ذیربط مربوط دانست. اگرچه میزان کاهش این کاربری‌ها در دهه‌ی گذشته همچنان ادامه داشته است. در این میان، افزایش ۶۷/۹۴ درصدی اراضی مسکونی گویای این مطلب است که اراضی از دست‌رفته در بخش جنگلی و شالیزاری تبدیل به مسکونی شده‌اند. نرخ تغییر کاربری در بخش مسکونی (با نادیده گرفتن کاربری سایر) بالاترین میزان را در بین کلاس‌های مورد بررسی داشته است. این نتیجه، لزوم توجه جدی به تغییرات کاربری در حوزه روستایی را بیش از پیش نشان می‌دهد. نکته دیگر، رشد مساحت جنگل‌های تنک بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ و بعد روند معکوس آن بین سال‌های ۲۰۱۰

References

1. Ajith, K., Geethalakshmi, V., Ragunath, K., Pazhanivelan, S., & Panneerselvam, S. (2017). Rice Acreage Estimation in Thanjavur, Tamil Nadu Using Lands at 8 OLIIMAGES and GIS Techniques. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6, 2327-2335. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.607.275>
2. Alipour, F., Aghkhani, M., Abasspour-Fard, M., & Sepehr, A. (2014). Demarcation and estimation of agricultural lands using etm+ imagery data (case study: Astan ghods razavi great farm). *Journal of Agricultural Machinery*, 4,

- 244-254. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAM.V4I2.34827>
3. Ansari Amoli, A., & Alimohammadi Sarab, A. (2011). Rice area estimation by using multi-temporal classification method and AVHRR data. *Spatial Planning (Modares Human Sciences)*, 15, 1-16. (in Persian).
 4. Atzberger, C. 2013. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*, 5, 949-981. <https://doi.org/10.3390/rs5020949>
 5. Bagan, H., & Yamagata, Y. 2012. Landsat analysis of urban growth: How Tokyo became the world's largest megacity during the last 40 years. *Remote Sensing of Environment*, 127, 210-222. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.011>
 6. Chauhan, S., Darvishzadeh, R., Boschetti, M., Pepe, M., & Nelson, A. (2019). Remote sensing-based crop lodging assessment: Current status and perspectives. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151, 124-140. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.005>
 7. Darvishzadeh, R., Matkan, A. A., & Eskandari, N. (2011). Evaluation of ALOS-AVNIR2 spectral indices for prediction of rice biomass. *Journal of Geographical Landscape*, 6, 11-14. (in Persian).
 8. Dashti Marvili, M., Kamkar, B., & Kazemi, H. (2019). Detection of rice and soybean grown fields and their related cultivation area using Sentinel-2 satellite images in summer cropping patterns to analyze temporal changes in their cultivation area (Case study: four watershed basins of Golestan Province). *Journal of Water and Soil Conservation (Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 26, 151-167. (in Persian).
 9. FAO. 2019. Food and agriculture organization of the United Nations. FAOSTAT: Crops. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
 10. Godarzi Mehr, S., Abbaspour, R. A., Ahadnezhad, V., & Khakbaz, B. (2012). Comparison of support vector machine, neural network, and maximum likelihood methods for the separation of lithological units. *Iranian Journal of Geology*, 6, 75-92. (in Persian).
 11. Hopkins, P. F., Maclean, A., & Lillesand, T. (1988). Assessment of Thematic Mapper imagery for forestry applications under Lake States conditions. Photogrammetric Engineering and Remote sensing (USA).
 12. Izaddoost, H., Samizadeh, H., Rabiei, B., & Abdollahi, S. (2013). Evaluation of salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars and lines with emphasis on stress tolerance indices. *Cereal Research*, 3, 167-180. (in Persian). <https://doi.org/20.1001.1.22520163.1392.3.3.1.2>
 13. Kazemi Posht Mousavi, H., Pirdashti, H. A., Bahmanyar, M. A., & Nasiri, M. (2007). Study the effects of nitrogen fertilizer rates and split application on yield and yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Pajouhesh-va-Sazandegi*, 20, 68-77. (in Persian).
 14. Khatami, R., Mountrakis, G., & Stehman, S. V. (2016). A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment*, 177, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.028>
 15. Li, C., Wang, J., Wang, L., Hu, L., & Gong, P. (2014). Comparison of classification algorithms and training sample sizes in urban land classification with Landsat thematic mapper imagery. *Remote Sensing*, 6, 964-983. <https://doi.org/10.3390/rs6020964>
 16. Mather, P., & Tso, B. (2016). *Classification methods for remotely sensed data*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420090741>
 17. Mondal, S., Jeganathan, C., Sinha, N. K., Rajan, H., Roy, T., & Kumar, P. (2014). Extracting seasonal cropping patterns using multi-temporal vegetation indices from IRS LISS-III data in Muzaffarpur District of Bihar, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 17, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.09.002>
 18. Naghinezhad, A. R., Saeidi Mehrvarz, S., Norouzi, M., & Faridi, M. (2006). Contribution to the vascular and bryophyte flora as well as habitat diversity of the boujagh national park, n. Iran. *Rostaniha*, 7, 83-105. (in Persian).
 19. Nuarsa, I., Nishio, F., & Hongo, C. (2010). Development of the empirical model for rice field distribution mapping using multi-temporal Landsat ETM+ data: case study in Bali Indonesia. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVIII, part 8.
 20. Paul, G. C., Saha, S., & Hembram, T. K. (2020). Application of phenology-based algorithm and linear regression model for estimating rice cultivated areas and yield using remote sensing data in Bansloi River Basin, Eastern India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100367. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100367>
 21. Prasad, A., Singh, R., Tare, V., & Kafatos, M. (2007). Use of vegetation index and meteorological parameters for the prediction of crop yield in India. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 5207-5235. <https://doi.org/10.1080/01431160601105843>
 22. Richards, J. A., & Richards, J. (1999). Remote sensing digital image analysis. Springer.
 23. Sakamoto, T., Sprague, D. S., Okamoto, K., & Ishitsuka, N. (2018). Semi-automatic classification method for mapping the rice-planted areas of Japan using multi-temporal Landsat images. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.02.001>
 24. Shen, S., Yang, S., Li, B., Tan, B., Li, Z., & Le Toan, T. (2009). A scheme for regional rice yield estimation using

- ENVISAT ASAR data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52, 1183-1194. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0094-z>
25. Singha, M., Dong, J., Zhang, G., & Xiao, X. (2019). High resolution paddy rice maps in cloud-prone Bangladesh and Northeast India using Sentinel-1 data. *Scientific data*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0036-3>
26. Torbick, N., Chowdhury, D., Salas, W., & Qi, J. (2017). Monitoring rice agriculture across Myanmar using time series Sentinel-1 assisted by Landsat-8 and PALSAR-2. *Remote Sensing*, 9, 119. <https://doi.org/10.3390/rs9020119>
27. USGS. (2021). United States Geological Survey. USGS Earth Explorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
28. Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
29. Yaghouti, H., Pazira, E., Amiri, E., & Masihabadi, M. H. (2018). Application of satellite imagery and remote sensing technology to estimate rice yield. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 7, 55-68. (in Persian).
30. Yang, C., Everitt, J. H., & Murden, D. (2011). Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery for crop identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75, 347-354. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.012>
31. Younesi, B., Ahmadi Sani, N., & Sharafi, S. (2019). Evaluation of IRS-P6 Images for Orchards Area Estimating. *Remote Sensing & GIS*, 11, 115-128. (in Persian). <https://doi.org/10.52547/gisj.11.1.113>
32. Ziaeeian Firouzabadi, P., Sayad Bidhendi, L., & Eskandari Noudeh, M. (2009). Mapping and acreage estimating of rice agricultural land using radarsat a satellite images. *Physical Geography Research Quarterly*, 41, 45-58. (in Persian).



Distinguishing Rain-fed and Irrigated Crops in Hamadan Province Using Spectral Indices of Satellite Images

H. Mohamadi Monavar^{1*}, S. Zibazadeh²

1- Assistant Professor, Department of Bio-system Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-ali Sina University, Hamadan, Iran

2- MSc graduate, Department of Bio-system Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-ali Sina University, Hamadan, Iran

(*- Corresponding Author Email: hosna.mohamadi@basu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69074.1022>

Received: 24-02-2021

Revised: 21-09-2021

Accepted: 03-10-2021

Available Online: 04-10-2021

How to cite this article:

Mohamadi Monavar, H., & Zibazadeh, S. (2022). Distinguishing Rain-fed and Irrigated Crops in Hamadan Province Using Spectral Indices of Satellite Images. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 529-542. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69074.1022>

Introduction

Remote sensing methods for mapping farms and crops have been widely used in the last three decades. This method is applied to identify irrigated areas around the world (Alipour *et al.*, 2014), although most of these studies are in areas with semi-arid climates and low rainfall or lack of rainfall which has a significant effect on the spectral characteristics of plants. In this study, Landsat 8 and MODIS satellite images were used to identify and separate two irrigated and rain-fed wheat farms in Hamadan province. Two algorithms of support vector machine (SVM) and minimum distance (MD) were used simultaneously to classify irrigated and rain-fed farms. In the next step, the area under cultivation of rain-fed and irrigated wheat was predicted in the whole cultivated area of Hamadan province. Finally, the cultivation area of rain-fed and irrigated crops was calculated in the province using Sentinel 3 satellite images based on the random forest algorithm in 2016.

Materials and Methods

The study area is Hamedan province, which is located between 59° 33' and 49° 35' north latitude and also from 34° 47' to 34° 49' east longitude of the Greenwich meridian. A 50-hectare rain-fed wheat farm in Amzajerd was used as a sample to extract the properties of rain-fed wheat. Also, irrigated indices were extracted from a 100-hectare irrigated wheat farm located in Kaboudrahang. Satellite images were applied to separate irrigated and rain-fed wheat in Hamadan province. NDVI, EVI and NDWI indices were extracted from 16-day images of Landsat, MODIS, and Sentinel 3 sensors in the five-year period (2015-2019). Google Earth Engine (GEE) system was the environment for performing image processing calculations and extracting indices and maps.

Results and Discussion

The NDVI and EVI of irrigated and rain-fed wheat farms were calculated in 2015-2019. A small peak was observed in the rain-fed and irrigated NDVI trend in November due to the early germination of wheat leaves in winter, and the larger peak in May and June showed the maximum greenness of irrigated and rain-fed wheat, respectively. The ascending or descending trend of NDVI / EVI had no constant slope. This can be due to changes in meteorological parameters, which sometimes cause a sudden increase or decrease in the values of these indices. Despite the non-linearity of the NDVI / EVI trend over time, the maximum greenness was recorded just a month before the wheat harvest, which was seen in the third decade of May to the first decade of June. One of the cases is the sharp drop of NDVI / EVI after its final peak, which was definitely due to yellowing wheat and harvesting. Since the distinction between rain-fed and irrigated crops was difficult only based on NDVI, NDWI was also used to determine the water content of wheat so that irrigated wheat could be identified. However, the difference between rain-fed and irrigated wheat in terms of NDWI spectral density was insignificant; the maximum and minimum occurrence times of NDWI and NDVI of rain-fed and irrigated wheat were chosen for their separation. In order to map the cultivation area, in addition to the MODIS sensor, Sentinel 3 was used due to its ability to detect chlorophyll accurately. Due to the fact that the imaging of the Sentinel 3 satellite started since 2016, the map of rain-fed and irrigated cultivation as well as the cultivation area and their separation was done based on the random forest algorithm in 2016.

Conclusion

The results of this study showed that the appropriate method for distinguishing between rain-fed and irrigated wheat is the simultaneous use of several indices. Also, the greatest difference is in the maximum greenness, which happened almost one month before harvest. MD and SVM classification algorithms could distinguish irrigated and rain-fed wheat from other crops with 90% and 80% accuracy, respectively. Distinguished maps of irrigated and rain-fed crops based on the random forest algorithm were obtained using Sentinel 3 satellite imagery which can show the fertility of agricultural lands in the province.

Keywords: Distinguishing of rainfed and irrigated, Satellite images, Vegetation indices, Wheat

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۴۲-۵۲۹

تفکیک مزارع کشت دیم و آبی در استان همدان با استفاده از شاخص‌های طیفی تصاویر

ماهواره‌ای

حسنا محمدی منور^{۱*}، سمانه زیبازاده^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱

چکیده

استفاده از تکنیک سنجش از دور امروزه در کشاورزی کاربردهای فراوانی دارد از جمله تعیین سطح زیرکشت و پیش‌بینی عملکرد محصول. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای جهت تفکیک گندم آبی و دیم در استان همدان استفاده شد. شاخص‌های NDVI، EVI و NDWI از تصاویر ۱۶ روزه سنجنده‌های لندست، مادیس و سنتینل ۳ در بازه پنج ساله مورد مطالعه (۲۰۱۵-۲۰۱۹) استخراج گردید. نتایج شاخص‌ها نشان داد کاهش شدید EVI/NDVI بعد از نقطه اوج به دلیل آن است که زمان زرد شدن و یا برداشت محصول فرا رسیده است. به علاوه NDWI به ترتیب در بیشینه سبزیگی گندم در کشت آبی و دیم ۰/۷۶۷ و ۰/۷۳۶ دیده شد. سامانه Google Earth Engine محیط انجام محاسبات پردازش تصاویر و استخراج شاخص‌ها و نقشه‌ها بود و نرم‌افزار R نیز برای آنالیزهای طبقه‌بندی و تفکیک کشت دیم و آبی به کار رفت. نتایج نشان داد نقشه استان بر اساس سطح زیر کشت دیم و آبی ماهواره سنتینل ۳ جزئیات بیشتری را نشان داد. همچنین استفاده همزمان از چند شاخص NDVI، EVI و NDWI توانست قدرت تفکیک را افزایش دهد. علی‌رغم شباهت‌های موجود، الگوریتم‌های SVM و MD نیز با دقت قابل قبولی تفکیک کشت دیم و آبی استان را ارائه دادند. نتایج نشان داد کشت دیم و آبی گندم استان با دقت ۰/۷۳۷ تفکیک شد و تفکیک گندم از سایر کشت‌ها با دقت ۰/۹۴۵ انجام گردید.

واژه‌های کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای، تفکیک کشت دیم و آبی، شاخص‌های سبزیگی، گندم

مقدمه

آب اصلی‌ترین منبع طبیعی است که به دلیل تغییرات اقلیمی و مصارف بی‌رویه انسانی مقدار آن به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک محدود می‌شود. (Drusch et al., 2013). افزایش دما به خصوص در منطقه مدیترانه و در نتیجه افزایش نیاز به مصرف آب در صنعت و کشاورزی و همچنین کاهش نزولات جوی سبب کمتر شدن آب در دسترس شده است (Hartmann et al., 2013). در این منطقه کشاورزی اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب می‌باشد به خصوص در کشت‌های تابستانه (ذرت، گندم، محصولات جالیزی و غیره) که میزان بارندگی محدود و نیاز آبی شدید می‌باشد (Guzinski & Nieto, 2019). در نتیجه تخمین آبیاری محصولات در زمین‌های

وسیع، یک مسئله اساسی است که روش‌های متعارف زمینی می‌توانند فقط یک راه حل جزئی ارائه دهند. در واقع، چنین روش‌هایی نیروی کار و زمان طولانی می‌طلبند و بنابراین فقط برای ارزیابی آبیاری محصول در مناطق نسبتاً کوچک زمین و دوره‌های زمانی کوتاه استفاده می‌شوند (Giannini & Bagnoni, 2000). روش‌های سنجش از دور برای تهیه نقشه مزارع و محصولات کشاورزی در سه دهه اخیر به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش برای تشخیص مناطق آبی در سراسر دنیا به کار می‌رود (Alipour, Agh-Khani, Abbaspour-Fard, & Sepehr, 2014; Alexandridis, Zalidis, & Silleos, 2008; Wardlow, Egbert, & Kastens, 2006; Akbari et al., 2007). اگرچه اکثر این مطالعات در مناطقی با اقلیم نیمه خشک و کم بارش انجام شده است و کمبود بارش در خصوصیات طیفی گیاه تاثیر قابل توجهی دارد. در مقایسه با کشت‌های آبی در مناطق خشک و نیمه خشک، کشت دیم در مناطقی با رطوبت بالا که ممکن است حتی در تابستان هم بارش‌های طولانی را تجربه کنند، خصوصیات طیفی گیاه تغییر چندانی نخواهد داشت (Shamal & Weatherland, 2014). از طرفی نقشه برداری از محصولات آبی در آب و هوای مرطوب یا معتدل با استفاده از تکنیک‌های سنجش از

۱- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانش آموزخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: hosna.mohamadi@basu.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69074.1022>

شده، الگوریتم نظارت شده جنگل تصادفی^۴ به دلیل عدم وابستگی به پارامترها به کار رفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه استان همدان است که بین مدارهای ۵۹ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۳۴ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۹ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است (شکل ۱). استان همدان با مساحت ۲۰/۱۷۳ کیلومتر مربع در ناحیه‌ی غربی کشور واقع شده و از غرب به استان سندج و کرمانشاه و از جنوب به استان لرستان و از قسمت شرق به استان مرکزی و در قسمت شمال به استان زنجان محدود می‌شود. هوای همدان سرد و خشک می‌باشد و حداکثر دمای آن در تابستان ۳۶/۸ درجه سانتی‌گراد و حداقل در زمستان ۲۹/۶ - درجه سانتی‌گراد می‌رسد و میزان بارش سالیانه‌ی آن به‌طور متوسط ۳۴۳/۱ میلی‌متر است. گندم یکی از اصلی‌ترین محصولات مورد کشت کشاورزان استان همدان می‌باشد و ۴۰۰ هزار هکتار از مزارع استان به این محصول اختصاص دارد. پژوهش حاضر به تغییرات سطوح زیر کشت دیم و آبی در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ می‌پردازد. مزرعه ۵۰ هکتاری گندم دیم (34.93N, 48.53E) واقع در اماجرده استان همدان به‌عنوان نمونه برای استخراج خواص طیفی کشت دیم گندم به کار رفت. همچنین از مزرعه ۱۰۰ هکتاری گندم آبی (35.21N, 48.72E) واقع در کبودراهنک شاخص‌های پوشش‌های گیاهی کشت آبی استخراج گردید (شکل ۱-الف).

سنسورهای تصویربرداری

در پژوهش حاضر از تصاویر سنجنده‌های با توان تفکیک مکانی بالا مانند لندست به‌منظور استخراج انواع کشت‌های دیم و آبی و سپس با استفاده از تصاویر سنجنده‌هایی با توان تفکیک زمانی بالا مانند مادیس به‌منظور استخراج سیکل رشد محصول در بازه زمانی مورد مطالعه استفاده شد. با توجه به مشکلات موجود در روند تحقیق که از جمله مهم‌ترین آن‌ها کوچک بودن مزارع کشاورزی بود از شاخص‌های NDVI و EVI استخراج شده از تصاویر سنجنده‌هایی با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا برای کل استان همدان استفاده شد. از طرفی، به دلیل ابری بودن برخی از روزهایی که تصویربرداری ماهواره‌ای انجام می‌شد از داده‌های TM^۵ و ETM^۶ سنجنده لندست

دور نیاز به دقت زیادی دارد و به آسانی آب و هوای خشک یا نیمه‌خشک نیست (Droogers, 2002). در مناطق معتدل تعیین نقشه کشت آبی مشکل است زیرا تفاوت بسیار اندکی در فنولوژی گیاهان دیم و آبی وجود دارد که به دلیل شرایط آب و هوایی و اقلیم مرطوب رخ می‌دهد (Peña-Arancibia et al., 2014).

استفاده از ماهواره‌ها موقعیت جدیدی برای نقشه‌برداری از مزارع کشاورزی مهیا نموده است (Drusch et al., 2012). مطالعات بسیاری از تصاویر ماهواره‌ای و سری زمانی جهت تهیه نقشه مزارع بهره‌جسته‌اند. استفاده از الگوریتم‌های سری زمانی سبب کاهش خطای استخراج شاخص‌ها از تصاویر ابرآلود ماهواره‌ای می‌شود (Vuolo, Neuwirth, Immitzer, Atzberger, & Ng, 2018) برای مثال تصاویر اپتیکی سنتینل ۲ در منطقه گرمسیری افریقا برای تهیه نقشه محصول استفاده شده است (Vogel et al., 2019) اگرچه دقت تصاویر در مناطق معتدل استوایی به‌علت غلظت ابر کاهش می‌یابد. برخی از مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب تصاویر اپتیکی و راداری اعتبار نقشه‌ها را بهبود می‌بخشد. استفاده همزمان ماهواره‌های سنتینل ۱ و سنتینل ۲ برای تعیین مساحت کشت آبی به‌منظور تخمین آب‌های زیر زمینی (Ferrant et al., 2017)، استفاده همزمان از ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۱ برای نقشه‌برداری مزارع آبی (Demarez, Helen, Marais-Sicre, & Baup, 2019) استفاده از سری زمانی و تصاویر راداری سنتینل ۱ (Bazzi et al., 2019) مثال‌هایی برای افزایش دقت نقشه‌برداری می‌باشند. باوجود مطالعات فراوان برای تشخیص کشت آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اطلاعات کافی برای تفکیک مزارع دیم و آبی در مناطق معتدل یا با آبیاری نسبتاً بالا وجود ندارد. ترکیب تصاویر اپتیکی مکانی و زمانی لندست ۸ و تصاویر SAR^۱ سنتینل ۱ قابلیت تشخیص مزارع آبی را در منطقه معتدل جنوب فرانسه فراهم نمود (Demarez et al., 2019). اگرچه در این مطالعه عامل محدودکننده وضوح مکانی تصاویر ماهواره لندست ۸ بیان شد.

در این پژوهش از تصاویر ماهواره لندست ۸ و مادیس برای شناسایی و تفکیک دو مزرعه کشت آبی و دیم گندم در استان همدان استفاده گردید. در تفکیک مزارع از دو الگوریتم ماشین بردار پشتیبان^۲ (svm) و حداقل فاصله^۳ (MD) به‌طور همزمان استفاده شد. استفاده همزمان از شاخص‌های گیاهی و اقلیمی در سال‌های متممادی دقت این مطالعه را افزایش داد. در نهایت با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۳ و شاخص‌های آب و هوایی، مساحت زیرکشت دیم و آبی محصولات کل استان بر اساس مقایسه نقشه مبنا در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹ محاسبه و مقایسه شد. علاوه بر الگوریتم‌های طبقه‌بندی ذکر

4- Random Forest

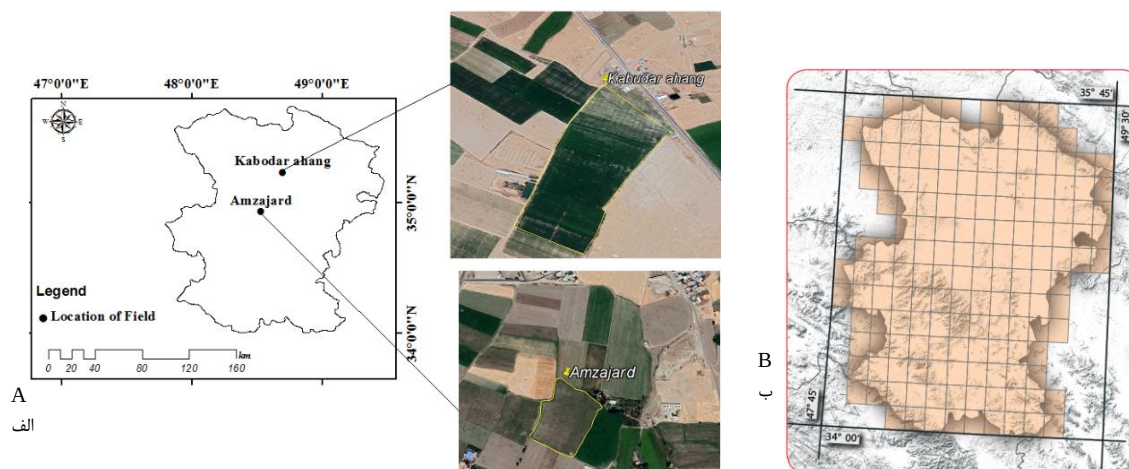
5- Thematic Mapper

6- Enhanced Thematic Mapper

1- Synthetic Aperture Radar

2- Support Vector Machine

3- Minimum Distance



شکل ۱- الف- مزارع مورد مطالعه و ب- طول و عرض جغرافیایی استان همدان
Fig.1. A- Studied fields, B-Latitude and longitude of the study area of Hamadan province

نانومتر) (Vuolo, Dash, Curran, Lajas, & Kwiatkowska, 2012) WorldView-2 (۷۲۵ نانومتر) (Heenkenda, Joyce, ۲۰۱۵) Sentinel-2 و (Maier, & De Bruin, ۲۰۱۵) و (۷۴۰، ۷۸۲ نانومتر) (Delloye, Weiss, & Defourny, 2018). با این حال، این سیستم عامل‌ها فاقد بایگانی طولانی مدت تاریخی هستند و محصولات متغیر بیوفیزیکی عملیاتی تولید نمی‌کنند. سنتینل ۳ (۲۰۱۶ تا کنون) با مشخصات مکانیکی و نوری مشابه طیف‌سنج تصویربرداری با وضوح متوسط^۳ (MERIS) (۲۰۰۲-۲۰۱۲) برای اطمینان از تداوم تولید و بررسی محصولات بیوفیزیکی زمینی و دریایی طراحی شد. شاخص کلروفیل زمینی (OTCI) شاخصی از میزان کلروفیل کانوپی است و برای ادامه بررسی شاخص کلروفیل زمینی سنجنده Envisat MERIS در نظر گرفته شده است.

شاخص‌های طبقه‌بندی

فرضیه اساسی در روش آماری تجربی اندازه‌گیری میزان سبزی‌نگی می‌باشد. شاخص طیفی NDVI و EVI به‌طور مستقیم با تخمین محصول در ارتباط هستند زیرا شرایط مثبت و منفی محیط روی رشد گیاه تأثیرگذار است و مسئول افزایش و کاهش فعالیت‌های فتوسنتزی گیاه می‌باشد که با اندازه‌گیری طیفی این شاخص‌ها می‌توان سلامت و کیفیت گندم را پایش نمود. موقعیت مهم شاخص NDVI به‌خاطر ارتباط نزدیک بین شاخص سطح برگ (LAI) و تشعشع فعال فتوسنتزی جذب شده می‌باشد که منجر به ایجاد یک رابطه‌ی خطی شده که با استفاده از آن نوع و میزان محصول قابل

سنسورهای تصویرگر عمیاتی زمین (OLI) و سنسور مادون قرمز حرارتی (TIRS) نسبت سیگنال به نویز (SNR) را در عملکرد رادیومتری لندست ۸ بهبود بخشیده‌اند و در نتیجه کمی کردن داده‌ها امکان توصیف بهتری از پوشش گیاهی را فراهم می‌سازد (Morfitt et al., 2015). سنجنده‌ی مادیس نواحی طیف مرئی (VIS)، مادون قرمز نزدیک (NIR)، مادون قرمز با طول موج کوتاه (SIR) و یا مادون قرمز میانی (MIR) و مادون قرمز با طول موج‌های بلند (LIR) را پوشش می‌دهد و برای اندازه‌گیری شاخص‌هایی مانند پوشش گیاهی (VI)، شاخص سطح برگ (LAI)، شاخص انحصار تابش فعال فتوسنتزی (FRAP)، شاخص تابع توزیع انعکاس دو محوری (BRDF) و پوشش برف، یخ، دریا و درجه حرارت سطح زمین (LST) به‌کار می‌رود (Gao et al., 2005). در نهایت به‌منظور تأیید نتایج سنجنده مادیس از ماهواره سنتینل ۳ برای تعیین مساحت مناطق کشت دییم و آبی کل استان همدان استفاده گردید. سنسور اندازه‌گیری شاخص کلروفیل زمینی^۱ (OTCI) در ماهواره سنتینل ۳ می‌تواند محتوای کلروفیل گیاهان را تشخیص دهد (Pastor-Guzman et al., 2020). تصاویر OTCI با وضوح ۳۰۰ متر در سایت کوپرنیکوس در دسترس عموم می‌باشد. برای محاسبه آن از باندهای بازتابی ۱۰، ۱۱ و ۱۲ قرمز، لکه قرمز و مادون قرمز نزدیک به‌ترتیب با طول موج‌های ۶۸۱/۲۵، ۷۰۸/۷۵ و ۷۳۵/۷۵ نانومتر سنسور تغییر رنگ زمین و اقیانوس^۲ (OLCI) سنتینل ۳ استفاده شد. چندین ماهواره چند طیفی امکان تخمین LCC و CCC را دارند زیرا در نواحی لکه قرمز مجهز به باند هستند. به‌عنوان مثال می‌توان به RapidEye (۷۱۰

1- OLCI Terrestrial Chlorophyll Index
2- Ocean and Land Colour Instrument

3- Medium Resolution Imaging Spectrometer

پیش‌بینی است. باتوجه به این‌که با افزایش فعالیت گیاه میزان NDVI در سطح برگ تقریبی خواهد بود، شاخص EVI باتوجه به در دسترس بودن آن در تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالایی می‌تواند به تفکیک گندم آبی و دیم بپردازد.

شاخص پوشش گیاهی نرمال شده تفاضلی (NDVI)

در بین شاخص‌های سبزی‌نگی‌های موجود، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده تفاضلی (NDVI) بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد این شاخص پاسخ گیاهان سالم و سبز را باند فروسرخ نزدیک و قرمز محاسبه می‌کند (Matsushita, Wei, Jin, Yuyichi, & Guoyn, 2007). دلیل این امر، خاصیت جذب نور قرمز توسط رنگدانه‌های موجود در کلروفیل است، که باعث می‌شود گیاهان انعکاس کمتری در این باند داشته باشند و انعکاس شدید NDVI گیاهان در بخش مادون قرمز طیف الکترومغناطیس است (Farajzadeh et al., 2005). شاخص از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

مقادیر NDVI بین [۱- تا ۱] متغیر است. مقدار کلی این شاخص برای پوشش گیاهی تنک در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵، معمولی و نیمه‌متراکم ۰/۱ تا ۰/۵، متراکم و غنی (۰/۵) به بالا، آب، برف و یخ دارای مقادیر منفی، خاک دارای مقادیر کمتر از ۰/۵ در مناطق پوشیده از ابر تقریباً برابر با صفر است (Schucknecht, Erasmi, 2013). NDVI اثرات توپوگرافی و جوی را به حداقل می‌رساند (Mahmoud, Hasmadi, Alias, & Alias, 2016).

شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI)

پوشش گیاهی بهبودیافته با استفاده از سیگنال‌های پوشش گیاهی در دامنه‌ی نمایه‌ی سطح برگ به‌وسیله‌ی استفاده از بازتاب طیف آبی برای تصحیح کاهش اثر جو و سیگنال‌های پس‌زمینه خاک برای افزایش دقت شاخص NDVI گسترش یافته است (Carlson, Gillies, & Perry, 1994). این شاخص برای شناسایی تغییرات ساختار گیاهان شامل شاخص سطح برگ، نوع و ساختار تاج پوششی گیاه بسیار کارآمد است (Huete et al., 2002). مقدار شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته در محدوده (۱+) تا (۱-) می‌باشد. شاخص از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$EVI = 2.5 * (NIR - RED) / (NIR + 6 * RED + (7.5 * BLUE) + 1) \quad (2)$$

شاخص تفاضل آبی نرمال شده (NDWI)

این شاخص به دلیل حساس بودن به خصوصیات مختلف مانند محتوای آبی گیاه انتخاب شد (Gao, 1996). در حالی‌که NDVI

اطلاعاتی در مورد میزان فتوسنتز و محتوای کلروفیل فراهم می‌کند، از NDWI می‌توان به‌عنوان شاخص محتوای آب گیاه استفاده کرد. NDWI به‌طور گسترده‌ای جهت مطالعه محتوای آب پوشش‌های گیاهی مورد استفاده قرار گرفته است (Cheng, Zarco-Tejada, 2006). (Riaño, Rueda, & Ustin, 2006) و برای نقشه‌برداری از مناطق آبیاری (Alexandridis et al., 2008). NDWI به‌عنوان نسبت بین بازتابش مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانه (MIR) از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Gao, 1996).

$$NDWI = (NIR - MIR) / (NIR + MIR) \quad (3)$$

طبقه‌بندی تصاویر

طبقه‌بندی را می‌توان یک فرآیند تصمیم‌گیری دانست که در آن داده‌های تصویری به فضای کلاس‌های مشخص انتقال می‌یابد. در حقیقت طبقه‌بندی یک نگاشت از فضای چندطیفی به فضای عوارض است (Arkhi & Adib-nejad, 2011). در پژوهش حاضر از طبقه‌بندی با ماشین‌های بردار پشتیبان^۱ (SVM) استفاده شد. دلیل عمده‌ی برتری نتایج SVM در مقایسه با سایر روش‌های طبقه‌بندی استفاده از ویژگی‌های هندسی داده‌های آموزشی به‌جای ویژگی آماری آن‌هاست. هدف SVM یافتن ابر صفحه‌ای است که به بهترین شکل هر دو کلاس ممکن را از یکدیگر جدا کند (Tso & Mather, 2009). در داده‌های تفکیک‌پذیر دو کلاس با قابلیت تفکیک‌پذیری خطی وجود دارد و داده‌های آموزشی برای این دو کلاس به‌صورت زوج‌های مرتب $\{x_i, y_i\}, i=1, \dots, n, y_i \in \{-1, +1\}, x_i \in R^d$ قابل بیان هستند. در این نوع نمایش x_i ویژگی‌های نقطه‌ی λ_m و y_i برچسب کلاس برای این داده است. هدف SVM یافتن ابر صفحه بهینه‌ای است که دو کلاس را به گونه‌ای از هم جدا کند که فاصله نزدیک‌ترین نمونه‌های آموزشی از دو کلاس به این ابر صفحه، از یکدیگر بیشینه گردد، این فاصله اصطلاحاً حاشیه نامیده می‌شود (Tso & Mather, 2009). می‌توان هدف SVM را تعیین پارامترهای ابر صفحه به منظور بیشینه کردن این حاشیه دانست (Borges, 1998). از آنجا که کلاس در داده‌های سنجش از دور قابلیت تفکیک‌پذیری خطی ندارند باید از الگوریتم‌های غیر خطی برای تفکیک آن‌ها استفاده نمود. داده‌های گندم دیم و آبی مزارع امزاجرد و کبودآهنگ به‌عنوان داده‌ی آموزشی الگوریتم SVM به‌کار رفت و سپس داده‌های ده ساله‌ی ماهواره‌های لندست و مادیس به‌عنوان داده‌ی آزمون به‌منظور طبقه‌بندی گندم دیم و آبی وارد نرم‌افزار R گردید.

ندارد، زیرا حتی بدون مقیاس‌بندی داده، دقت خوبی باقی خواهد ماند. حتی در صورت فقدان بخش بزرگی از داده، الگوریتم‌های جنگل تصادفی دقت بالایی خواهند داشت.

نتایج و بحث

میزان NDVI و EVI مزرعه کشت آبی و دیم گندم در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ محاسبه شد. شکل ۲ تا ۴ روند به‌دست آمده از تغییرات هر دو شاخص را توسط ماهواره‌های لندست ۸ و مادیس نشان می‌دهد. در زمستان ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ مقدار منفی شاخص‌ها در هر دو تصاویر لندست ۸ و مادیس مشاهده شد که به‌علت بارش برف طولانی مدت و یخبندان زمستانه بود. پیک کوچکی در نمودار NDVI دیم و آبی در ماه نوامبر مشاهده شد که به علت جوانه‌زدن اولیه برگ‌های گندم در زمستان می‌باشد و پیک بزرگ‌تر زمان بهار سبزی‌نگی را نشان می‌دهد که به‌ترتیب برای گندم آبی و دیم در ماه‌های مه و ژوئن اتفاق می‌افتد (برای نمونه عدد یکی از قله‌های NDVI در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است). در مزرعه دیم نسبت به کشت آبی روند به‌دست آمده در دو ماهواره شیف‌ت داده شده و پیک‌های بلندتری را نشان می‌دهد. از طرف دیگر وضوح طیف در ماهواره لندست بیش از نتایج ماهواره مادیس بود که نتایج مشابه برای تفکیک مزارع دیم و آبی سیب‌زمینی تاییدی بر آن می‌باشد (Shamal & Weatherhead, 2014). نتایج کلی به‌دست آمده از شکل ۲ تا ۴ عبارتند از:

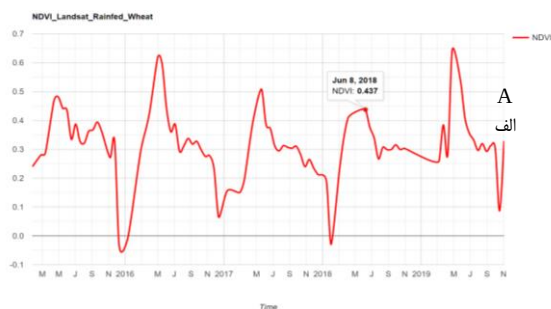
- ۱- روند افزایشی یا کاهش NDVI و EVI با توجه به زمان اخذ تصویر لزوماً روندی خطی با شیبی ثابت نیست. این مسئله می‌تواند به دلایلی مانند تغییرات پارامترهای هواشناسی باشد که گاهی موجب افزایش یا کاهش ناگهانی در مقادیر این شاخص‌ها می‌شود.
- ۲- با وجود غیرخطی بودن روند NDVI و EVI در طول زمان تقریباً در همه‌ی اراضی بیشینه‌ی سبزی‌نگی و توده‌ی گیاهی مطابق انتظار درست در زمان قبل از برداشت گندم یعنی دهه‌ی سوم اردیبهشت تا دهه‌ی اول خرداد ثبت شده است.
- ۳- یکی از مواردی که مطابق انتظار در همه‌ی نمودارها آمده است افت شدید NDVI و EVI بعد از اوج نهایی آن است که دلیل آن قطعاً زرد شدن و یا برداشت محصول است.
- در شکل ۵ بیشینه NDVI محاسبه شده از تصاویر ماهواره لندست و مادیس برای مزارع گندم دیم و آبی برای هر سال در بازه مورد مطالعه نشان داده شده است. از تصاویر Thematic Mapper (TM) لندست ۸ برای مقایسه مشخصات NDVI مزارع گندم آبی و دیم استفاده شد. زیرا اطلاعات مربوط به NDVI را با وضوح مکانی بالاتر (۳۰ متر) از MODIS (۲۵۰ متر) فراهم می‌کند. از طرف دیگر به‌دلیل پوشش ابر تصاویر لندست ۸ همزمان از تصاویر مادیس هم

روش حداقل فاصله^۱ به‌عنوان روش دیگری برای طبقه‌بندی تصاویر مورد آزمون قرار گرفت. طبقه‌بندی حداقل فاصله برای طبقه‌بندی داده‌های تصویر ناشناخته به کلاس‌هایی که فاصله بین داده‌های تصویر و کلاس را در فضای چند ویژگی به حداقل می‌رساند، استفاده می‌شود. فاصله به‌عنوان شاخص شباهت تعریف می‌شود به‌طوری که حداقل فاصله با حداکثر شباهت یکسان است. استفاده از روش‌های طبقه‌بندی حداقل فاصله در مسائل سنجش از دور، مانند شناسایی گونه‌های زراعی، در نظر گرفته شده است. به‌طور خاص در طبقه‌بندی حداقل فاصله، یک نمونه (یعنی گروهی از بردارها) در گروهی طبقه‌بندی می‌شود که توزیع شناخته شده یا برآورد شده آن شباهت زیادی به توزیع تخمینی نمونه برای طبقه‌بندی دارد. اندازه‌گیری شباهت، اندازه‌گیری فاصله در فضای توابع توزیع است (Wacker & Landgrebe, 1972).

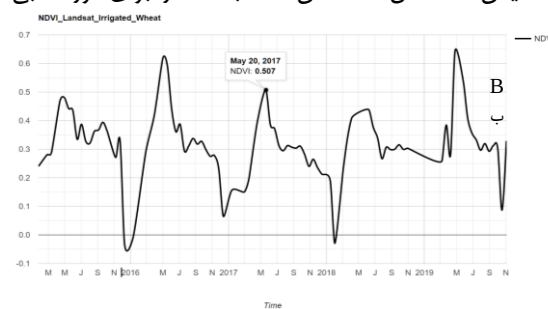
روش نظارت شده جنگل تصادفی در طبقه‌بندی فاکتورهای بیولوژیک عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهد (Pelletier et al., 2017). عملکرد این الگوریتم با شبیه‌سازی داده‌ها با درختان جنگل به‌دست می‌آید و درختان بیشتر به معنای جنگل مقاوم‌تر است. جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری نظارت شده محسوب می‌شود. همانطور که از نام آن مشهود است، این الگوریتم جنگلی را به‌طور تصادفی می‌سازد. «جنگل» ساخته شده، در واقع گروهی از درخت‌های تصمیم^۲ است. کار ساخت جنگل با استفاده از درخت‌ها اغلب اوقات به روش کیسه‌گذاری^۳ انجام می‌شود. ایده اصلی روش کیسه‌گذاری آن است که ترکیبی از مدل‌های یادگیری، نتایج کلی مدل را افزایش می‌دهد. به‌طور مشابه، الگوریتم درخت تصادفی روی نمونه‌های داده، درختان تصمیم‌گیری می‌سازد و سپس از هر کدام از آن‌ها پیش‌بینی می‌گیرد و در نهایت به‌واسطه رای‌گیری، بهترین راه حل را انتخاب می‌کند. این یک روش گروهی است که از یک درخت تصمیم‌گیری مجزا بهتر است، زیرا با میانگین‌گیری در نتیجه، بیش برآزش^۴ را کاهش می‌دهد (Immitzer et al., 2016). جنگل تصادفی، تصادفی بودن افزوده‌ای را ضمن رشد درختان به مدل اضافه می‌کند. این الگوریتم، به جای جست‌وجو به دنبال مهم‌ترین ویژگی‌ها هنگام تقسیم کردن یک گره^۵، به دنبال بهترین ویژگی‌ها در میان مجموعه تصادفی از ویژگی‌ها می‌گردد. این امر منجر به تنوع زیاد و در نهایت مدل بهتر می‌شود. جنگل‌های تصادفی برای بازه وسیعی از عناصر داده، نسبت به درخت تصمیم‌گیری مجزا، عملکرد بهتری دارند. در الگوریتم جنگل تصادفی نیازی به مقیاس‌پذیری داده وجود

- 1- Minimum Distance
- 2- Decision Trees
- 3- Bagging
- 4- over-fitting
- 5- Node

واقع در کبودرآهنگ و مزرعه دیم واقع در امزاجرد نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ در زمستان‌های یخبندان میزان NDWI به ۰/۸ و بیشتر رسیده است (در شکل ۶ در ماه ژانویه برای کشت آبی NDWI=0.767 و در کشت دیم NDWI=0.736 دیده می‌شود).

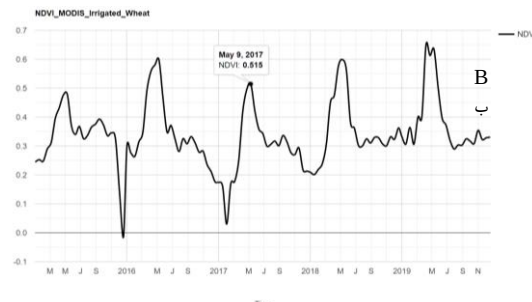
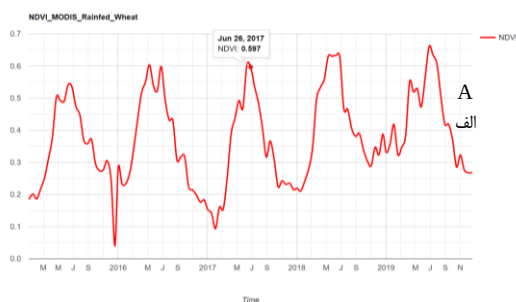


استفاده شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت تفاوت آشکاری در شاخص‌های سبزیگی محاسبه شده مشاهده نشد و تفکیک کشت دیم و آبی تنها بر مبنای NDVI مشکل می‌باشد. بنابراین از NDWI برای تعیین محتوای آبی گندم استفاده شد تا از این طریق بتوان گندم آبی را تشخیص داد. شکل ۶ شاخص محاسبه شده را برای مزرعه آبی



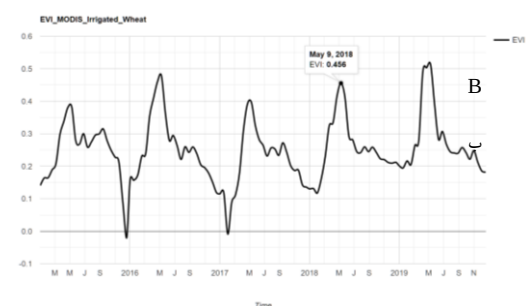
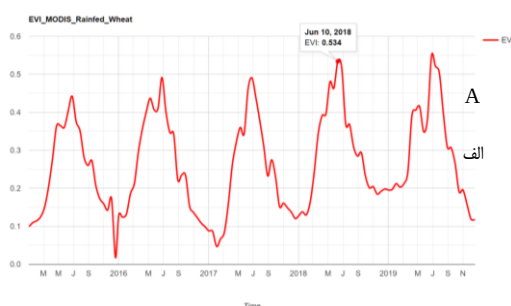
شکل ۲- مقدار NDVI محاسبه شده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در ۲۰۱۵-۲۰۱۹ مزرعه کشت گندم الف- دیم و ب- آبی

Fig.2. Calculated NDVI value from Landsat 8 satellite images in 2019-2015 A- Rainfed and B- Irrigated wheat farms



شکل ۳- مقدار NDVI محاسبه شده از تصاویر سنجنده مادیس در ۲۰۱۵-۲۰۱۹ مزرعه کشت گندم الف- دیم و ب- آبی

Fig.3. Calculated NDVI value from MODIS images in 2019-2015 A- Rainfed and B- Irrigated wheat farms



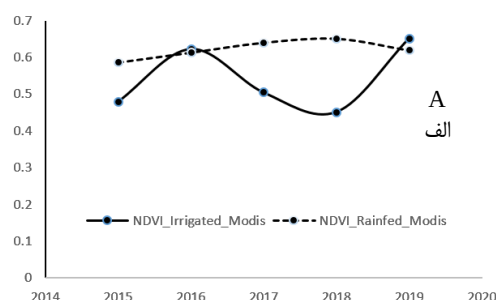
شکل ۴- مقدار EVI محاسبه شده از تصاویر سنجنده مادیس در ۲۰۱۵-۲۰۱۹ مزرعه کشت گندم الف- دیم و ب- آبی

Fig.4. Calculated EVI value from MODIS images in 2019-2015 A- Rainfed and B- Irrigated wheat farms

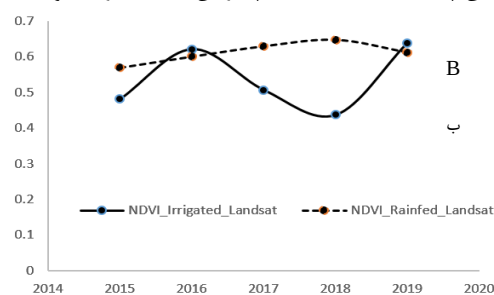
گرفت. همچنین استفاده از تصاویر طیفی (نوری و راداری) و تصاویر چند زمانه منجر به افزایش تعداد ویژگی‌ها در پردازش و در نتیجه افزایش دقت تحلیل نتایج گردید و از طرف دیگر سبب افزونگی اطلاعات طیفی و افزایش زمان محاسبه فرایند طبقه‌بندی شد. برای جلوگیری از این تأثیر شاخص‌های ماهانه تجمعی محاسبه شد. استفاده از شاخص‌های تجمعی نشان‌دهنده عملکرد گیاه است و ارتباط

تفاوت معنی‌داری در نمودار در دوره رشد کامل مشاهده می‌شود (NDWI < 0.40). این تفاوت در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ بیشتر است و پس از آن با زرد شدن گندم مقدار NDWI کاهش می‌یابد. اما تفاوت گندم دیم و آبی از نظر چگالی طیفی NDWI چندان محسوس نبود اگرچه زمان وقوع بیشینه و کمینه شاخص‌های NDWI و NDVI گندم دیم و آبی متفاوت می‌باشد که مبنای تفکیک آن‌ها قرار

رشد گندم در بيشينه سبزيني بين گندم آبي و ديم متفاوت است.

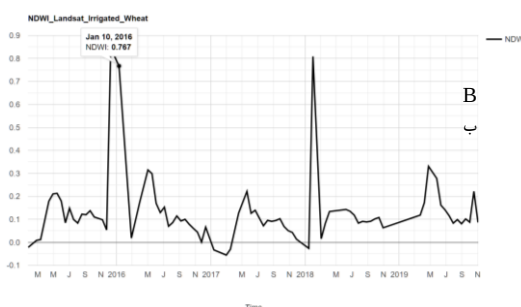
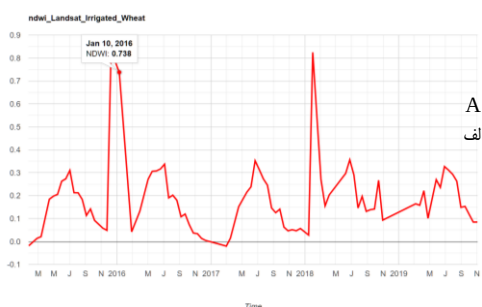


بين رشد گياه و شاخص‌هاي طيفي تجمعي توسط داده‌هاي سنجش از دور به اثبات رسيده است (Myneni & Williams, 1994). مطابق مطالعات پيشين (Dong et al., 2003) فرض شده كه سرعت و دامنه



شكل ۵- مقدار NDVI بيشينه محاسبه شده از تصاوير الف- سنجنده ماديس و ب- ماهواره لندست ۸ در ۲۰۱۵-۲۰۱۹

Fig.5. Calculated maximum NDVI from images of A- MODIS and B- Landsat 8 satellite in 2019-2015



شكل ۶- مقدار NDVI محاسبه شده از تصاوير ماهواره لندست در ۲۰۱۵-۲۰۱۹ مزرعه كشت گندم الف- ديم و ب- آبي

Fig.6. Calculated NDVI from Landsat satellite images in 2019-2015 A- Rainfed and B- Irrigated wheat farms

در اين پژوهش از تابع هسته RBF به عنوان تابع هسته پايه ماشين بردار پشتيبان استفاده شد. در توابع RBF تنها پارامترهايي كه بايد تعيين شود، پارامتر C و γ است. هدف اين است كه مقادير بهينه دو پارامتر C و γ براي كاربرد مورد نظر مشخص شود به گونه‌اي كه ماشين بتواند داده‌هاي تست را با دقت خوبي پيشگويي كند و از بيش برآزش جلوگیری كند. يكي از روش‌هاي ساده براي انتخاب پارامترهاي مناسب تابع هسته با استفاده از روش اعتبارسنجي متقابل است. در اين پژوهش براي تعميم طبقه‌بندي سه ماشين بردار پشتيبان از روش يكي در مقابل همه استفاده و ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش و ۳۰٪ داده‌ها جهت آزمايش در نظر گرفته شده است (Gupta, Das, Hellerstein, & Raskar, 2018). مقادير C و γ به ترتيب ۲ و (2^{-2}) در نظر گرفته شد. طبقه‌بندي كننده حداقل فاصله از ميانگين (MD) نيز براي جداسازي و تفكيك دو كلاس گندم ديم و آبي به كار رفت. در اين تكنيك ابتدا ميانگين همه طبقه‌ها كه قبلاً با استفاده از روش تعيين نواحي تعليمي از همدگر تفكيك گرديده‌اند، تعيين و سپس فاصله اقليدسي بازتاب هر پيكسل را از ميانگين تمام طبقه‌ها محاسبه مي‌كنند. سپس هر پيكسل به طبقه‌اي تعلق مي‌گيرد كه كمترين مقدار فاصله را تا ميانگين آن طبقه داشته باشد.

تفكيك كشت گندم ديم و آبي از ساير محصولات

بر اساس اطلاعات به دست آمده از تصاوير مزارع گندم ديم و آبي، لايه وكتوری استان همدان به عنوان ورودی سامانه GEE در نظر گرفته شد. سپس از تصاوير ماهواره لندست در سال‌هاي ۲۰۱۵-۲۰۱۹ مجموعه شاخص‌ها استخراج شد و در نتيجه كل استان به سه منطقه زير كشت گندم ديم، گندم آبي و پوشش گياهي غير از دو كلاس قبلي (ساير محصولات و باغات) تقسيم گرديد. با استفاده از الگوريتم SVM تفكيك اين سه كلاس انجام شد. اساساً طبقه‌بندي كننده ماشين بردار پشتيبان يك جداكننده دودويي است. رهيافت كلي کاهش مسئله سه كلاسه در اين پژوهش به چندين مسئله دودويي براي مسائل سه كلاسي است. هر يك از مسائل با يك جداكننده دودويي حل شد. سپس خروجي جداكننده‌هاي دودويي ماشين بردار پشتيبان با هم تركيب شده و به اين ترتيب مسئله سه كلاسه حل شد. يكي از مسائلي كه در ماشين بردار پشتيبان غيرخطي با آن مواجه هستيم، نحوه تعريف هسته و پارامترهاي مرتبط با آن است. دسته شناخته شده‌اي از توابع هسته چون هسته چندجمله‌اي، RBF معرفي شده‌اند كه نیازمند تنظيم شدن پارامترها جهت كارايي مطلوب است.

می‌باشد، با این وجود برای اطمینان بیشتر چگونگی انطباق عوارض بدون تغییر تصویر با تصویر ETM بررسی شد. محاسبه سطح زیر کشت گیاه زعفران نشان داد که دقت این روش نسبت به سایر روش‌های طبقه‌بندی مورد تایید می‌باشد و میزان خطای آن پایین است (Rahimzadegan & Pourgholam, 2016). جدول ۱ و ۲ نتایج ماتریس اغتشاش الگوریتم SVM و MD را برای سال‌های مورد مطالعه به ترتیب در دو گندم دیم و آبی و سه کلاس (گندم دیم و آبی و سایر کشت‌ها) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود (جدول ۱) ۱۰٪ کلاس گندم دیم در هیچ‌یک از دو کلاس نمی‌گنجد. به همین دلیل سه کلاس تعریف شد تا ۱۰۰٪ محصولات در طبقه‌بندی قرار بگیرد. نتایج قدرت تفکیک مناسبی با دقت ۰/۷۳۷ و ۰/۹۴۵ را به ترتیب در دو و سه کلاس نشان می‌دهند.

جدول ۱- ماتریس اغتشاش تفکیک گندم دیم و آبی در کل استان همدان

Table 1- Confusion matrix of separation of rainfed and irrigated wheat in the whole province of Hamadan

ماتریس اغتشاش Confusion matrix	گندم آبی Irrigated wheat	گندم دیم Rainfed wheat
گندم آبی Irrigated wheat	70%	30%
گندم دیم Rainfed wheat	20%	70%

جدول ۲- ماتریس اغتشاش تفکیک گندم دیم و آبی و سایر محصولات در کل استان همدان

Table 2- Confusion matrix of separation of rainfed and irrigated wheat from other crops in the whole province of Hamadan

ماتریس اغتشاش Confusion matrix	گندم آبی Irrigated wheat	گندم دیم Rainfed wheat	سایر محصولات Other crops
گندم آبی Irrigated wheat	90%	10%	0
گندم دیم Rainfed wheat	10%	80%	10%
سایر محصولات Other crops	0	10%	90%

۲۰۱۶ آغاز شده است تهیه نقشه کشت دیم و آبی و همچنین محاسبه سطح زیر کشت در سال ۲۰۱۶ انجام شد. شکل‌های ۷ نقشه مزارع زیر کشت دیم و آبی بر اساس الگوریتم‌های جنگل تصادفی را نشان می‌دهد. تغییرات رنگ‌ها در نقشه‌ها حاکی از آن است که در نقشه پایه رنگ سبز کشت دیم و رنگ نارنجی تا قهوه‌ای کشت آبی را نشان می‌دهد. در نقشه grayscale رنگ سفید مناطق کشت دیم و مناطق خاکستری مناطق تحت کشت آبی را فارغ از نوع محصول نشان می‌دهد. در نقشه به‌دست‌آمده از ماهواره‌ها مبنا محاسبه NDVI بود و همانطور که مشاهده می‌شود دقت پیکسل‌ها نسبت به نقشه مبنا

در این مطالعه برای ثبت تصاویر مزارع به تعداد قابل قبول و با پراکنش مناسب نقاط کنترل روی تصویر انتخاب شد. برای یافتن رابطه مختصاتی بین نقاط کنترل زمینی و پیکسل‌های تصویر از معادله چند جمله‌ای درجه اول و نمونه‌برداری مجدد به روش نزدیک‌ترین همسایه استفاده شد. در طبقه‌بندی تصویر، استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایه که کمترین اثر را روی درجات خاکستری دارد، می‌تواند انتخاب مناسب‌تری نسبت به روش‌های دیگر باشد. چرا که ایجاد درجات خاکستری غیر واقعی گاه روش‌های طبقه‌بندی را به اشتباه می‌اندازد. در این روش عملاً هیچ‌گونه محاسبه‌ای انجام نمی‌پذیرد و از مقادیر حقیقی موجود در تصویر استفاده می‌شود، بنابراین ارقام جدیدی که گاه ممکن است غیر واقعی باشند را تولید نمی‌نماید (Fatemi & Rezaee, 2005). هرچند خطای میانگین مربعات کمتر از یک پیکسل مقدار قابل قبولی

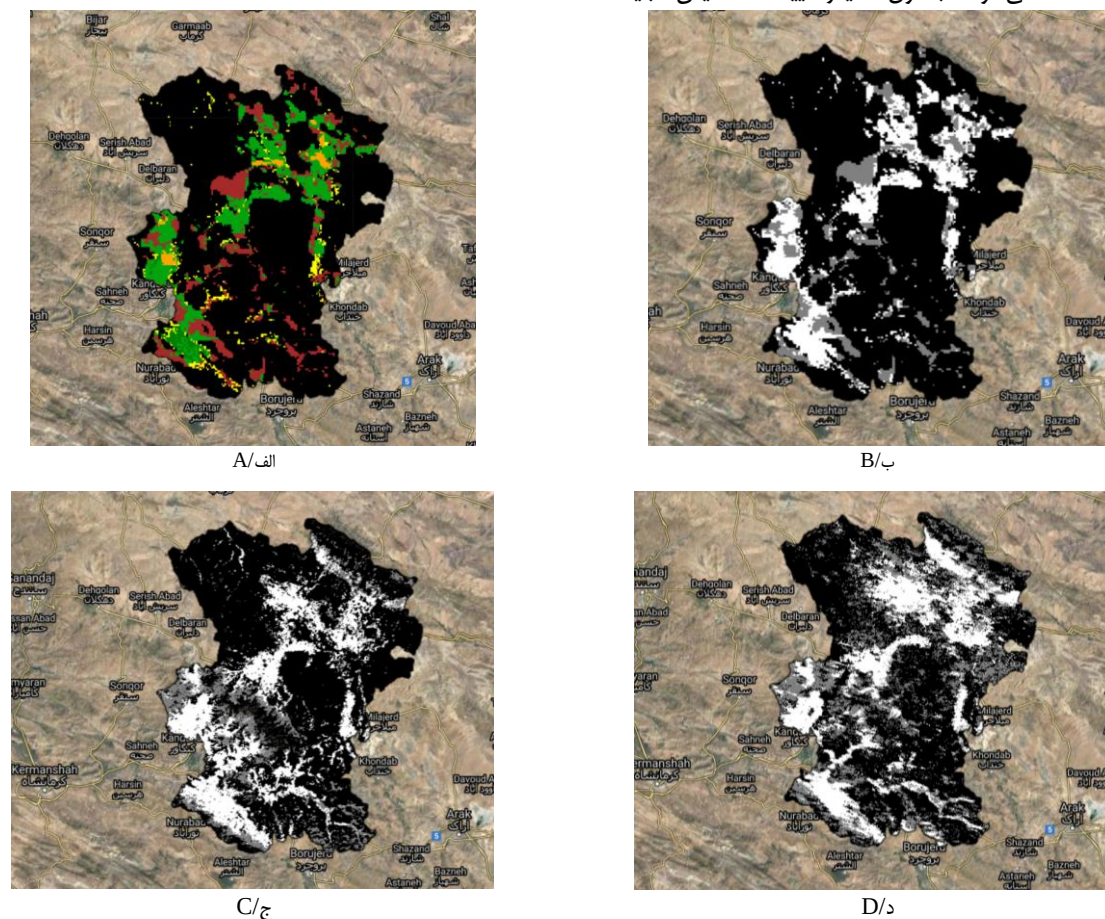
با توجه به شباهت گندم دیم و آبی، رشد فنولوژیکی سبزیگی در گندم دیم و آبی ملاک عمل قرار گرفت. در مرحله بعدی با استخراج ویژگی‌های تصاویر از مزارع مورد مطالعه، سطح زیر کشت گندم دیم و آبی در کل سطح استان همدان پیش‌بینی شد.

محاسبه مساحت زیر کشت دیم و آبی گندم استان همدان

به‌منظور محاسبه مساحت زیر کشت گندم علاوه بر سنجنده مادیس، ماهواره سنتینل ۳ با توجه به توانایی تشخیص دقیق کلروفیل به کار رفت. با توجه به این که تصویربرداری ماهواره سنتینل ۳ از سال

سنتینل ۳ می باشد که مساحت بیشتری برای محصولات دیم و آبی پیش بینی می کند.

افزایش یافته است. به علاوه در نقشه به دست آمده از تصاویر ۱۶ روزه ماهواره سنتینل ۳ به علت توانایی تشخیص کلروفیل و توان تفکیک طیفی در ۲۱ باند در محدوده مرئی تا مادون قرمز نزدیک، کشت های پراکنده نیز مشاهده می شوند. جدول ۳ نیز تایید کننده این قابلیت



شکل ۷- تفکیک کشت دیم و آبی در استان همدان الف- نقشه RGB پایه ب- نقشه Grayscale پایه، ج- تصویر سنجنده مادیس، د- تصویر ماهواره سنتینل

Fig. 7. Separation of rainfed and irrigated crops in Hamedan province A- Basic RGB map B- Grayscale basic map, C- MODIS image, D- Sentinel satellite image

تفکیک محصولات زراعی و باغی را انجام داد و یا مساحت زیر کشت هر کدام را محاسبه نمود (Ajadi et al., 2021; Nguyen et al., 2020). علت دیگر تفاوت تصاویر با داده های زمینی می تواند بازه طولانی مدت برداشت با توجه به شرایط اقلیمی حاکم در کل استان باشد به این ترتیب که گندم شهرستان های جنوبی زودتر برداشت می شوند که در مقایسه با مزارع گندم شمال استان همدان بازه برداشت به حدود ۴۵ تا ۵۰ روز می رسد. در نتیجه تصویری که برای مثال در اردیبهشت ماه برداشت می شود بازتاب رنگ زرد خوشه های رسیده گندم جنوب استان را نشان می دهد در حالی که در همین تاریخ گندم های شمال استان هنوز سبز هستند و یک ماه یا بیشتر تا زمان

جدول ۳ مساحت زیر کشت کل محصول را در ۲۰۱۶ نشان می دهد. با توجه به این که احتمال دیده شدن مزارع با وسعت پایین در تصاویر ماهواره سنتینل ۳ با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ و سنجنده مادیس با توان ۲۵۰ متر کمتر می باشد و از طرف دیگر آمار کشت خرده مالکان در مرکز تحقیقات کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان ثبت نشده است امکان بررسی دقیق داده های زمینی با نتایج به دست آمده وجود ندارد. در بسیاری از مقالات (Pageot et al., 2020; Sepulcre-Canto et al., 2008) موجود در مراکز کشاورزی می توان حتی با تصاویر به دست آمده از یک سنجنده و تنها یکی از الگوریتم های موجود با دقت قابل قبولی

برداشت آن‌ها باقی است. این تفاوت‌ها در مزارع آستان قدس رضوی
به‌منظور تفکیک غلات، محصولات جالیزی و باغات دیده شد

جدول ۳- مساحت زیرکشت محصولات دیم و آبی در کل استان همدان

Table 3. Area of cultivation of rainfed and irrigated crops in the whole province of Hamadan

مساحت Area (km ²)	محصولات آبی irrigated crops	محصولات دیم Rainfed crops
ماهواره سنتینل ۳ Sentinel 3	4700.7020	4219.0875
سنجنده مادیس Modis	4265.1152	4157.1207

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد روش مناسب برای تفکیک گندم دیم و آبی استفاده همزمان از چند شاخص می‌باشد. همچنین بیشترین تمایز در بیشینه سبزینه‌گی یعنی حدود یک ماه پیش از برداشت می‌باشد. الگوریتم‌های طبقه‌بندی MD و SVM می‌تواند با دقت ۹۰٪ و ۸۰٪ (جدول ۲) به‌ترتیب گندم آبی و دیم را از سایر محصولات تشخیص دهد. از قابلیت سنجنده‌های مختلف برای این جداسازی استفاده شد و درنهایت مساحت زیر کشت محصولات آبی و دیم استان استخراج گردید. این اطلاعات برای برآورد میزان مصرف انرژی

و استفاده از نهاده‌ها و میزان نیاز به ماشین‌های کشاورزی مفید می‌باشند. نقشه تفکیک محصولات آبی و دیم استان بر اساس الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۳ به‌دست آمد که می‌تواند میزان باروری زمین‌های کشاورزی استان را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌گردد این نقشه‌ها به تفکیک محصولات استراتژیک و در سال‌های مختلف استان تهیه شود تا بتوان میزان تولید خالص استان همدان از هر محصول را برآورد نمود. همچنین می‌توان توانایی سایر سنجنده‌ها و ماهواره‌ها و یا سایر شاخص‌های گیاهی را در تفکیک کشت گندم دیم و آبی مطالعه نمود.

References

1. Ajadi A. O., Barr, J., Liang, S. Z., Ferreira, R., Kumpatla, S. P., Patel, R., & Swatantran, A. (2021). Large-scale crop type and crop area mapping across Brazil using synthetic aperture radar and optical imagery. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 97, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102294>
2. Akbari, M., Mamanpoush, A. R., Gieske, A., Miranzadeh, M., Torabi, M., & Salemi, H. R. (2006). Crop and land cover classification in Iran using Landsat 7 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(19), 4117-4135. <https://doi.org/10.1080/01431160600784192>
3. Alexandridis, T. K., Zalidis, G. C., & Silleos, N. G. (2008). Mapping irrigated area in Mediterranean basins using low cost satellite Earth Observation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64(2), 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.04.001>
4. Alipour, F., Agh-Khani, M. H., Abbaspour-Fard, M. H., & Sepehr, A. (2014). Limiting and estimating the area under cultivation of agricultural products to help satellite images (Case study: Astan Quds Razavi sample farm). *Journal of Agricultural Machinery*, 4(2), 244-254. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v4i2.34827>
5. Arekhi, S., & Adib-nejad, M. (2011). Evaluating the efficiency of support vector machine algorithms for land use classification using Landsat + ETM satellite data (Case study: Ilam area). *Iranian Range and Desert Research*, 3(44), 420-440. (in Persian).
6. Bazzi, H., Baghdadi, N., Ienco, D., El Hajj, M., Zribi, M., Belhouchette, H., Escorihuela, M. J., & Demarez, V. (2019). Mapping Irrigated Areas Using Sentinel-1 Time Series in Catalonia, Spain. *Remote Sensing*, 11, 1836. <https://doi.org/10.3390/rs11151836>
7. Burges, C. J. C. (1998). A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2, 121-167.
8. Carlson, T. N., Gillies, R. R., & Perry, E. M. (1994). A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9(1-2), 161-173. <https://doi.org/10.1080/02757259409532220>
9. Cheng, Y. B., Zarco-Tejada, P. J., Riaño, D., Rueda, C. A., & Ustin, S. L. (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105(4), 30 2006, 354-366
10. Delloye, C., Weiss, M., & Defourny, P. (2018). Retrieval of the canopy chlorophyll content from Sentinel-2

- spectral bands to estimate nitrogen uptake in intensive winter wheat cropping systems. *Remote Sensing of Environment*, 216, 245-261. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.037>
11. Demarez, V., Helen, F., Marais-Sicre, C., & Baup, F. (2019). In-Season Mapping of Irrigated Crops Using Landsat 8 and Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing*, 11(2), 118. <https://doi.org/10.3390/rs11020118>
12. Dong, J., Kaufmann, R. K., Myneni, R. B., Tucker, C. J., Kauppi, P. E., Liski, J., Buermann, W., Alexeyev, V., & Hughes, M. K. (2003). Hughes. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: Carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 84, 393-410. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00130-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00130-X)
13. Droogers, P. 2002. Global irrigated area mapping: overview and recommendations, Working Paper 36, International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka.
14. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2013). Water in the balance. *Science* 340(6138), 1300-1301. <https://doi.org/10.1126/science.1236460>
15. Farajzadeh, M. (2005). *Drought from Concept to Solutions*. National Geographical Organization Publication.
16. Fatemi, S. B., & Rezaee, F. (2005). *Fundamental of Remote Sensing*. 1st Pub, Azade Publication. Tehran.
17. Ferrant, S., Selles, A., Le Page, M., Herrault, P. A., Pelletier, C., Al-Bitar, A., Mermoz, S., Gascoin, S., Bouvet, A., & Saqalli, M. (2017). Detection of irrigated crops from Sentinel-1 and Sentinel-2 data to estimate seasonal groundwater use in south India. *Remote Sensing*, 9, 11-19. <https://doi.org/10.3390/rs9111119>
18. Gao, B. C. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing Environment*, 58, 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
19. Gao, F., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Roesch, A., Lucht, W., & Dickinson R. (2005). MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo climate modeling grid products and the variability of albedo for major global vegetation types. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2004JD005190>
20. Giannini, A., & Bagnoni, V. (2000). Schede di tecnica irrigua per l'agricoltura toscana. ARSIA- Servizio Telematico Irrigazione. Regione Toscana, EFFEMME Lito, Firenze, pp. 66-97 ISBN 88-8295-015-018.
21. Gupta, O., Das, A. J., Hellerstein, J., & Raskar, R. (2018). Machine Learning approaches for large scale classification of produce, Scientific Reports Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139, USA. pp. 8:5226. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23394-3>
22. Guzinski, R., & Nieto, H. (2019). Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations. *Remote Sensing of Environment*, 221, 157-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.019>
23. Hartmann, D. L., Tank, A. M. K., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y. A. R., Dentener, F. J., Dlugokencky, E. J., Easterling, D. R., & Kaplan, A. (2013). Observations: atmosphere and surface. Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
24. Heenkenda, M. K., Joyce, K. E., Maier, S. W., & De Bruin, S. (2015). Quantifying mangrove chlorophyll from high spatial resolution imagery. *ISPRS Photogrammetry of Remote Sensing*, 108, 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.003>
25. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213.
26. Immitzer, M., Vuolo, F., Atzberger, C., Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe. *Remote Sensing*, 8, 166. <https://doi.org/10.3390/rs8030166>
27. Mahmoud, A. M. A., Hasmadi, M., Alias, M. S., & Alias, M. A. (2016). Rangeland degradation assessment in the south slope of the Al-Jabal Al-Akhdar, northeast Libya using remote sensing technology. *Rangeland Science*, 6(1), 73-81.
28. Martimort, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36.
29. Matsushita, B., Wei, Y., Jin, C., Yuyichi, O., & Guoyn, Q. (2007). Sensivity of the enhanced vegetation index (EVI) and NDVI to topographic effects: A case study in high-density Cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651. <https://doi.org/10.3390/s7112636>
30. Morfitt, R., Barsi, J., Levy, R., Markham, B., Micijevic, E., Ong, L., Scaramuzza, P., & Vanderwerff, K. (2015). Landsat-8 operational land imager (OLI) radiometric performance on-orbit. *Remote Sensors*, 7, 2208-2237.
31. Myneni, R., & Williams, D. (1994). On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49, 200-211. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90016-7)
32. Nguyen, T. T., Hoang, T. D., Pham, M. T., Vu, T. T., Nguyen, T. H., Huynh, Q. T., & Jo, J. (2020). Monitoring agriculture areas with satellite images and deep learning. *Applied Soft Computing*, 95, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106565>

33. Pageot, Y., Bau, F., Inglada, J., Baghdadi, N., & Demarez, V. (2020). Detection of Irrigated and Rainfed Crops in Temperate Areas Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series. *Remote Sensing*, 12, 1-19. <https://doi.org/10.3390/rs12183044>
34. Pastor-Guzman, J., Brown, L., Morris, H., Bourg, L., Goryl, P., Dransfeld, S., & Dash, J. (2020). The sentinel-3 OLCI terrestrial chlorophyll index (OTCI): algorithm improvements, spatiotemporal consistency and continuity with the MERIS archive. *Remote Sensing*, 12, 2652-2674. <https://doi.org/10.3390/rs12162652>
35. Pelletier, C., Valero, S., Inglada, J., Champion, N., Marais Sicre, C., & Dedieu, G. (2017). Effect of Training Class Label Noise on Classification Performances for Land Cover Mapping with Satellite Image Time Series. *Remote Sensing*, 9, 173. <https://doi.org/10.3390/rs9020173>
36. Peña-Arancibia, J. L., McVicar, T. R., Paydar, Z., Li, L., Guerschman, J. P., Donohue, R. J., Dutta, D., Podger, G. M., van Dijk, A. I. J. M., & Chiew, F. H. S. (2014). Dynamic identification of summer cropping irrigated areas in a large basin experiencing extreme climatic variability. *Remote Sensing of Environment*, 154, 139-152. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.016>
37. Rahimzadegan, M., & Pourgholam, M. (2016). Determining the area under saffron cultivation using Landsat images (Case study: City Torbat Heydariyeh). *Remote Sensing and GIS in Natural Resource*, 7(4), 97-115. (in Persian). <https://doi.org/10.22048/jsat.2017.48518.1194>
38. Schucknecht, A., Erasmi, S., Niemeyer, I., & Matschullat, J. (2013). Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. *Remote Sensing*, 46, 40-59. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20134603>
39. Sepulcre-Canto, G., Zarco-Tejada, P. J., Sobrino, J. A., Berni, J. A. J., Jimenez-Munoz, J. C., & Gastellu-Etchegorry, J. P. (2008). Discriminating irrigated and rainfed olive orchards with thermal ASTER imagery and DART 3D simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 962-975. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.12.001>
40. Shamal, S. A. M., & Weatherhead, K. (2014). Assessing spectral similarities between rainfed and irrigated croplands in a humid environment for irrigated land mapping. *IP Publication Ltd*, 43(2), 109-114. <https://doi.org/10.5367/oa.2014.0168>
41. Tso, B., & Mather, P. (2009). *Support Vector machines, in Classification Methods for Remotely sensed Data*. 1st ed: CRC Press: 125-153.
42. Vogel, E., Donat, M. G., Alexander, L. V., Meinshausen, M., Ray, D. K., Karoly, D., Meinshausen, N., & Frieler, K. (2019). The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters*, 14(5), 1-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b>
43. Vuolo, F., Dash, J., Curran, P. J., Lajas, D., & Kwiatkowska, E. (2012). Methodologies and uncertainties in the use of the terrestrial chlorophyll index for the Sentinel-3 mission. *Remote Sensing*, 4, 1112-1133. <https://doi.org/10.3390/rs4051112>
44. Vuolo, F., Neuwirth, M., Immitzer, M., Atzberger, C., & Ng, W. T. (2018). How much does multi-temporal Sentinel-2 data improve crop type classification? *Applied Earth Observation and Geo-information*, 72, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.007>
45. Wacker, A. G., & Landgrebe, D. A. (1972). *Minimum Distance Classification in Remote Sensing*. LARS Technical Reports. Paper 25. <https://docs.lib.purdue.edu/larstech/25>
46. Wardlow, B. D., Egbert, S. L., & Kastens, J. H. (2007). Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108(3), 290-310. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.021>



A Data-driven Model for Predicting the Yield of Recoverable Sugar from Sugarcane

F. Nadernezhad¹, D. M. Imani^{2*} , M. R. Rasouli³

1- MSc Student, Productivity Management Department, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Productivity Management Department, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, System and e-Commerce Engineering Department, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: Imanim@iust.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69805.1034>

Received: 12-04-2021

Revised: 09-06-2021

Accepted: 14-07-2021

Available Online: 14-07-2021

How to cite this article:

Nadernezhad, F., Imani, D.M., & Rasouli, M.R. (2022). A Data-driven Model for Predicting the Yield of Recoverable Sugar from Sugarcane. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 543-558. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69805.1034>

Introduction

Sugarcane is a strategic agricultural product and increasing productivity and self-sufficiency in its production is of special importance. The most important product of sugarcane is sugar. Various factors like climatic and management conditions affect the yield of sugarcane and recoverable sugar. Crop yield forecasting is one of the most important topics in precision agriculture, which is used to estimate yield, match product supply with demand and manage product to increase productivity. The purpose of this study is to predict and model the factors affecting sugar extracted from sugarcane (recoverable sugar) in the farms of Amir-Kabir sugarcane agro-industry Company of Khuzestan province using machine learning methods.

Materials and Methods

To conduct this study, data from the agro-industrial company Amir-Kabir in the province of Khuzestan from 2010 to 2017 were used. This data has 3223 records which include four sets of data: climate, soil, crop and farm management. This data includes continuous and discrete variables. Discrete variables include production management, soil type, farm, variety, age (cane class), the month of harvest and times irrigation. Continuous variables include area, chemical fertilizer consumption, water consumption per hectare, total water consumption, drain, crop season duration, yield (cane yield) soil EC, purity, time interval drying off to crop harvest, precipitation, min and max temperature, min and max relative humidity, wind speed and evaporation. The recoverable sugar variable is considered as the target variable and is divided into two classes, values greater than or equal to 9 are in the optimal class and less than 9 are in the undesirable class. The other variables are considered as predictor variables. For modeling using the Holdout method the data were randomly divided into two independent sets, a training set and a test set. 70% of the data which includes 2256 records were used for training and 30% of the data which includes 967 records were used for testing. The modeling of this study was performed with the Python programming language version 3.8.6 in the Jupyter notebook environment. Random Forest, Adaboost, XGBoost and SVM (support vector machine) algorithms were used for modeling.

Results and Discussion

To evaluate the models, metrics of accuracy, precision, recall, f1 score and k-fold cross validation were used. The XGBoost model with 94.8% accuracy on the training set and the Adaboost model with 92.4% accuracy on the test set, are the best models. Based on precision and recall metrics Adaboost model with 87% precision and SVM model with 87% recall have better performance than the other models. Based on Repeated 10-fold stratified cross validation using two repeats the SVM model with 92.3% accuracy is the best model. The variables of purity, time interval drying off to crop harvest and crop season duration are the most important variables in predicting the recoverable sugar.

Conclusion

In this study a new approach based on machine learning methods for predicting recoverable sugar from sugarcane was presented. The most important innovation of this study is the simultaneous consideration of management and climatic factors, along with other factors such as soil and crop characteristics for modeling and classification the recoverable sugar percentage from sugarcane. The results show that the performance of all models is acceptable and machine learning methods and ensemble learning algorithms can be used to predict crop yield. The results of this study and the analysis of the rules obtained from the set of decision trees made in the random forest model can be used for managers of different agro-industries in determining appropriate strategies and preparing the conditions to achieve optimal production.

For future research as well as policy making and decision making Amir-Kabir sugarcane agro-industry Company the following suggestions are offered: more samples can be used to obtain more reliable results. Also can be used Deep learning methods, time series analysis and image processing. Use of IOT equipment to collect and real-time processing data on Amir-Kabir sugarcane agro-industry farms.

Keywords: Classification, Machine learning, Modeling, Precision agriculture

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۵۸-۵۴۳

ارائه مدلی داده‌رانه برای پیش‌بینی عملکرد شکر استحصالی از نیشکر

فاطمه نادرزاد^۱، دین محمد ایمانی^{۲*}، محمدرضا رسولی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۳

چکیده

پیش‌بینی عملکرد محصول یکی از مسائل مهم در حوزه‌ی کشاورزی می‌باشد و به عوامل مختلفی از جمله شرایط آب‌وهوایی، ویژگی‌های خاک، ویژگی‌های محصول و برنامه‌های مدیریتی وابسته می‌باشد. پیش‌بینی دقیق عملکرد محصول می‌تواند در تصمیم‌گیری‌ها و بهینه‌سازی فرآیندها به کشاورزان و صنایع وابسته به کشاورزی کمک نماید و در نهایت منجر به افزایش تولید شود. نیشکر یکی از مهم‌ترین محصولات استراتژیک کشاورزی و منبع تأمین شکر در جهان می‌باشد. هدف پژوهش حاضر پیش‌بینی و بررسی عوامل مؤثر بر میزان شکر استحصالی از نیشکر در مزارع شرکت کشت‌و صنعت نیشکر امیرکبیر با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌باشد. داده‌های جمع‌آوری شده برای این پژوهش مربوط به بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۸۹ شامل ۳۲۲۳ نمونه می‌باشد که شامل چهار مجموعه داده آب‌وهوایی، محصول، خاک و مدیریت مزرعه می‌باشد. برای مدل‌سازی پژوهش از الگوریتم‌های جنگل تصادفی، آدابوست، تقویت گرادیان حداکثری و ماشین بردار پشتیبان استفاده شده و در محیط ژوپیترنوت‌بوک پایتون پیاده‌سازی شده‌اند. مدل جنگل تصادفی با صحت ۹۲/۲٪ برای پیش‌بینی شکر استحصالی در بین مدل‌های ارائه شده بهترین عملکرد را دارد.

واژه‌های کلیدی: طبقه‌بندی، کشاورزی دقیق، مدل‌سازی، یادگیری ماشین

مقدمه

کشاورزی نقش مهمی در اقتصاد جهانی دارد و مواد غذایی مورد نیاز انسان را تأمین می‌کند. با افزایش روزافزون جمعیت جهان و به دنبال آن افزایش تقاضا برای مواد غذایی فشار بیشتری بر سیستم کشاورزی و منابع طبیعی وارد می‌شود. ورود تکنولوژی‌های جدید در بخش کشاورزی در طی قرن گذشته و در طول انقلاب سبز، به کشاورزی کمک کرده که همگام با تقاضای در حال رشد مواد غذایی و سایر محصولات باشند. تکنولوژی‌ها و رویکردهای جدید می‌توانند اثرات زیست‌محیطی کشاورزی را شناسایی و با حفظ یا کاهش آن، نیازهای غذایی آینده را برطرف کنند. فناوری‌های نوظهوری همانند اینترنت اشیاء، تجزیه و تحلیل کلان داده‌ها و هوش مصنوعی می‌توانند در تصمیم‌گیری‌های آگاهانه مدیریتی با هدف افزایش تولید محصولات استفاده شوند (Sishodia, Ray, & Singh, 2020).

کشاورزی دقیق که امروزه کشاورزی دیجیتالی نامیده می‌شود مستلزم استفاده از مجموعه‌ای از این فناوری‌ها برای بهینه‌سازی نهاده‌های کشاورزی برای افزایش میزان تولید کشاورزی و کاهش اتلاف‌ها می‌باشد. کشاورزی دقیق زمینه‌های علمی جدیدی را به وجود آورده که با استفاده از رویکردهای داده‌محور منجر به افزایش بهره‌وری در کشاورزی شده و اثرات زیست‌محیطی آن را به حداقل می‌رساند. داده‌های تولید شده در عملیات کشاورزی مدرن توسط انواع مختلفی از حس‌گرها جمع‌آوری می‌شود که درک بهتری از محیط عملیاتی محصول، شرایط خاک، شرایط آب‌وهوایی و داده‌های مربوط به عملیات ماشین‌های کشاورزی را ایجاد می‌کند و منجر به تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر و سریع‌تری می‌شود (Liakos, Busato, Moshou, Pearson, & Bochtis, 2018). پیش‌بینی عملکرد محصول یکی از مهم‌ترین موضوعات در کشاورزی دقیق است، که برای نظارت بر عملکرد، تخمین عملکرد، تطابق عرضه محصول با تقاضا و مدیریت محصول برای افزایش بهره‌وری، استفاده می‌شود و از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد (Liakos et al., 2018). هم‌چنین پیش‌بینی عملکرد محصول یکی از مسائل چالش برانگیز در کشاورزی دقیق می‌باشد و تاکنون مدل‌های زیادی برای آن ارائه و تأیید شده است. این مسئله نیاز به استفاده از چندین مجموعه داده دارد، زیرا عملکرد محصول به عوامل مختلفی از جمله شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک، کودهای شیمیایی و نوع محصول بستگی دارد.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مدیریت بهره‌وری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مدیریت بهره‌وری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی سیستم‌های هوشمند، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: Imanim@iust.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69805.1034>

بنابراین می‌توان گفت پیش‌بینی عملکرد محصول کار ساده‌ای نیست و مراحل پیچیده‌ای دارد که باید بر اساس داده‌های موجود حل شود (Van Klompenburg, Kassahun, & Catal, 2020).

ابزارهای داده‌کاوی و یادگیری ماشین می‌توانند داده‌ها را تحلیل و عوامل مؤثر بر عملکرد محصول را شناسایی کنند. داده‌کاوی فرآیند شناسایی و استخراج اطلاعات مهم و مفید و الگوهای پنهان از مجموعه داده‌ها و تبدیل آن‌ها به اطلاعات قابل فهم می‌باشد (Ramesh & Vardhan, 2013). یادگیری ماشین شاخه‌ای از هوش مصنوعی می‌باشد که تمرکز آن ایجاد توانایی یادگیری در ماشین‌ها بدون دخالت انسان و برنامه‌ریزی دقیق می‌باشد. فلسفه یادگیری ماشین بر این است که آینده به گذشته بسیار نزدیک می‌باشد، بنابراین مدل‌ها بر اساس داده‌های گذشته ساخته و آموزش داده می‌شوند و بر اساس آن‌ها آینده پیش‌بینی می‌شود. مدل‌های یادگیری ماشین باتوجه به هدف مسئله می‌توانند پیش‌بینی‌کننده یا توصیفی باشند. برای کسب دانش از داده‌های جمع‌آوری شده و توضیح آن‌چه اتفاق افتاده است از مدل‌های توصیفی استفاده می‌شود، در حالی که از مدل‌های پیش‌بینانه برای پیش‌بینی آینده استفاده می‌شود (van Klompenburg et al., 2020).

نیشکر یکی از محصولات استراتژیک کشاورزی و یکی از مهم‌ترین گیاهان قندی در جهان محسوب می‌شود. این گیاه پتانسیل تولید شکر با کیفیت بالا و به مقدار زیاد در واحد سطح زمین را دارد. اصلی‌ترین محصولی که از نیشکر استحصال می‌شود شکر است. مقدار شکر استحصال شده برای هر رقم نیشکر با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی متفاوت می‌باشد. اما معمولاً بین ۱۰ تا ۱۲ درصد برای هر تن نی متفاوت است. قیمت بسیار ارزان شکر در مقایسه با مقدار کالری که ایجاد می‌نماید، شکر را به‌عنوان یکی از منابع غذایی انسان تبدیل کرده و نقش مهمی را در سید مواد غذایی ضروری مردم جهان دارد. به طوری که ۵/۲ درصد از کل تولیدات غذایی جهان به نیشکر و چغندر قند اختصاص دارد. در مقیاس جهانی عملکرد قند چغندر قند و قند نیشکر در واحد سطح تقریباً مساوی است، اما هزینه تولید نیشکر معمولاً کمتر از چغندر قند می‌باشد (Shooshtari, Ahmadian, & Asfiaa, 2008). بر اساس آمارهای موجود، شکر تولید شده در جهان تقریباً ۸۰ درصد از نیشکر و ۲۰ درصد از چغندر قند به‌دست می‌آید (The Sugar Market, n.d.; Walton, 2020).

با توجه به این‌که نیشکر در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری دنیا و در حوالی مدار ۲۶ درجه تا ۳۴ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی می‌روید منطقه جنوب ایران و استان خوزستان منطقه مساعد برای کشت این گیاه محسوب می‌شود. نیشکر در خوزستان در واحدهای هفت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی و همچنین شرکت‌های کارون، هفت تپه و میان آب کشت می‌شود. این شرکت‌ها و واحدهای

کشاورزی وابسته به آن‌ها برای تعیین استراتژی‌های مناسب مدیریتی در زمینه واردات، صادرات و قیمت‌گذاری محصول نیازمند اطلاعاتی پیرامون عملکرد محصول هستند. با استفاده از روش‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین می‌توان داده‌های مربوط به عملکرد محصول و عوامل مؤثر بر آن را شناسایی و بررسی نمود و مدل‌هایی برای پیش‌بینی عملکرد آن ارائه داد که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های بلندمدت استفاده شود و رشد و توسعه اقتصادی و افزایش تولید را به ارمغان آورد. هدف این پژوهش ارائه‌ی مدلی برای پیش‌بینی شکر استحصالی از نیشکر و بررسی متغیرهای مؤثر بر آن، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌باشد. مهم‌ترین نوآوری این مطالعه در نظر گرفتن هم‌زمان عوامل مدیریتی و آب‌وهوایی در کنار سایر عوامل از جمله ویژگی‌های خاک و محصول برای مدل‌سازی و پیش‌بینی شکر استحصالی از نیشکر می‌باشد. برای این پژوهش از مجموعه داده‌های شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۹۶ که شامل ۳۲۲۳ نمونه می‌باشد، استفاده شده است.

در پژوهش (Veenadhari, Misra, & Singh, 2011) تأثیر پارامترهای آب‌وهوایی بر میزان بهره‌وری محصول سویا بررسی شده است. در این تحقیق از روش‌های درخت تصمیم (ID3) برای پیش‌بینی تأثیر پارامترهای آب‌وهوایی استفاده شده است. تحلیل‌های درخت تصمیم نشان می‌دهد که بهره‌وری و عملکرد محصول سویا به‌طور عمده تحت تأثیر رطوبت نسبی، دما و بارندگی می‌باشد.

در پژوهش (Veenadhari, Misra, & Singh, 2014) از رویکردهای یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رشد محصول بر اساس پارامترهای آب‌وهوایی استفاده شده است. در این تحقیق نرم‌افزاری با عنوان "Crop Advisor" با کمک الگوریتم C4.5 تأثیر پارامترهای آب‌وهوایی بر عملکرد محصول را بررسی می‌کند و پارامتری که بیش‌ترین تأثیر را بر عملکرد محصول انتخاب شده دارد مشخص می‌کند.

در پژوهش (Thuankaewsing, Khamjan, Piewthongngam, & Pathumnakul, 2015) مسئله زمان‌بندی برداشت نیشکر، برای گروهی از تأمین‌کنندگان که نیشکر کارخانه شکر در کشور تایلند را تأمین می‌کردند، ارائه شد. برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ استفاده شد. برای مدل‌سازی از متغیرهای مختلفی از جمله رقم محصول، نوع خاک و میانگین حداقل و حداکثر دمای روزانه استفاده شده است.

در پژوهش (de Oliveira, Bocca, & Rodrigues, 2017) سه تکنیک یادگیری ماشین رگرسیون بردار پشتیبان، جنگل تصادفی^۲

1- Artificial neural networks

2- Random forest

پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بیشتر مدل‌ها تمرکز بر پیش‌بینی عملکرد نیشکر می‌باشد و به پیش‌بینی شکر حاصل از آن کمتر پرداخته شده است، هم‌چنین تمامی عوامل مؤثر از جمله عوامل مدیریتی و آب‌وهوایی در کنار هم بررسی نشده‌اند، بنابراین می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده و از جمله شکاف‌های تحقیقاتی محسوب شود. در پژوهش‌های بررسی شده الگوریتم‌های بوستینگ کمتر از سایر الگوریتم‌ها استفاده شده‌اند و با توجه به این‌که از خانواده یادگیری گروهی هستند می‌توانند از الگوریتم‌های تکی عملکرد بهتری داشته باشند و در مدل‌سازی استفاده شوند. در پژوهش حاضر مدلی برای پیش‌بینی عملکرد شکر استحصالی از نیشکر با در نظر گرفتن عوامل مختلفی از جمله عوامل مدیریتی و آب‌وهوایی با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

مراحل این پژوهش بر اساس گام‌های متدولوژی کریسپ^۳ انجام شده است. به‌طور معمول از متدولوژی کریسپ برای انجام پروژه‌های صنعتی و سازمانی استفاده می‌شود، که به معنی فرآیندهای استاندارد صنعتی متقابل برای داده‌کاوی می‌باشد و در واقع چرخه حیات یک پروژه را نشان می‌دهد. این متدولوژی از شش گام شامل درک موضوع کسب و کار، درک و شناخت داده‌ها، آماده‌سازی داده‌ها، مدل‌سازی، ارزیابی و توسعه تشکیل شده است. برای انجام پژوهش از داده‌های مزارع شرکت کشت‌و‌صنعت نیشکر امیرکبیر استفاده شده است. این مزارع در ۴۵ کیلومتری جنوب اهواز و حداقل رودخانه کارون جاده اهواز خرم‌شهر بین طول‌های جغرافیایی ۱۰' و ۴۸' تا ۲۲' و ۴۸' شرقی و بین عرض‌های ۵۰' و ۳۰' و ۵۰' و ۳۱' شمالی واقع هستند و ارتفاع از سطح دریا آن ۷ متر می‌باشد. این شرکت دارای ۴۸۰ مزرعه ۲۵/۵ هکتاری می‌باشد. داده‌های جمع‌آوری شده در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۸۹ می‌باشد. مجموعه داده‌ها شامل ۳۲۲۳ نمونه (رکورد) می‌باشد که از یکپارچه‌سازی چهار مجموعه داده شامل داده‌های هواشناسی، داده‌های محصول، داده‌های خاک و داده‌های مدیریت مزرعه تشکیل شده است. جدول ۲ توصیف متغیرهای (ویژگی‌های) گسسته و جدول ۳ توصیف متغیرهای (ویژگی‌های) پیوسته را نشان می‌دهد. متغیرهای حداقل و حداکثر دما، حداقل حداکثر رطوبت نسبی، تبخیر و سرعت باد به‌صورت میانگین در بازه زمانی اردیبهشت-مهر محاسبه شده‌اند، هم‌چنین بارندگی به‌صورت میانگین در بازه زمانی مهر-اردیبهشت محاسبه شده است.

و درخت‌های رگرسیون برای پیش‌بینی میزان شکر استحصالی از نیشکر برداشت شده استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی با کمترین مقدار خطا بهترین روش برای پیش‌بینی می‌باشد.

در پژوهش (Balakrishnan et al., 2016) از مجموعه‌ی داده‌های هواشناسی شامل: میانگین دما، تراکم ابر، دمای روزانه، حداکثر و حداقل دما، تبخیر و تعرق بالقوه، تبخیر و تعرق محصول، فشار بخار و بارندگی برای پیش‌بینی عملکرد محصولات برنج، پنبه، نیشکر، بادام زمینی و ماش سیاه استفاده شده است. الگوریتم‌های استفاده شده برای پیش‌بینی ماشین بردار پشتیبان^۱ و بیز ساده^۲ و روش‌های جمعی AdaNaive و AdaSVM می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های جمعی AdaSVM و روش AdaNaive نسبت به روش‌های ماشین بردار پشتیبان و بیز قابل قبول‌تر هستند.

در پژوهش (Rajeswari, Suthendran, & Rajakumar, 2017) از دستگاه‌های اینترنت اشیاء برای جمع‌آوری داده‌های کشاورزی و ذخیره‌سازی آن‌ها در فضای ابری استفاده شده است. سپس بر مبنای روش‌های داده‌کاوی پیش‌بینی‌هایی انجام می‌شود. هدف نهایی این تحقیق افزایش تولید محصول و کنترل هزینه‌های تولیدی کشاورزی با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از پیش‌بینی می‌باشد. مدل هوشمند کشاورزی پیشنهادی در این تحقیق عملکرد محصول را پیش‌بینی می‌کند و تصمیم‌گیری در مورد توالی بهتر محصول بر اساس توالی گذشته محصول در همان مزرعه را با توجه به اطلاعات فعلی مواد مغذی خاک انجام می‌دهد.

در پژوهش (Pande, Purohit, Jadhav, & Shah, 2019) سیستم بهینه پیش‌بینی عملکرد محصول با کمک روش‌های داده‌کاوی پیشنهاد شده است. در این تحقیق برنامه مبتنی بر وب توسعه داده شده که به کشاورزان برای انتخاب مناسب‌ترین محصول برای کشت کمک می‌کند. این سیستم در مقایسه با سیستم‌های قبلی بهتر است و پارامترهای بیشتری را جهت انتخاب محصول بررسی می‌کند. پارامترهای مورد بررسی شامل رنگ خاک، رطوبت خاک، میزان PH خاک، فصل، بارندگی، دما و آبیاری می‌باشد. بر مبنای این پارامترها و با کمک الگوریتم درخت تصمیم ID3 سیستم مناسب‌ترین محصول را پیشنهاد می‌دهد.

در پژوهش‌های (Ferraro, Rivero, & Ghersa, 2009; Bocca & Rodrigues, 2016; Everingham, Sexton, Skocaj, & Inman-Bamber, 2016; Charoen-Ung & Mittrapiyanuruk, 2018; Medar, Rajpurohit, & Ambekar, 2019; Zakidizaji, Bahrami, Monjezi, & Shiekhdavoodi, 2019) مدل‌هایی بر مبنای روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر ارائه شده است. جدول ۱ مقاله‌های بررسی شده در این

3- Cross-industry standard process for data mining as CRISP-DM

1- Support vector machine
2- Naive Bayes

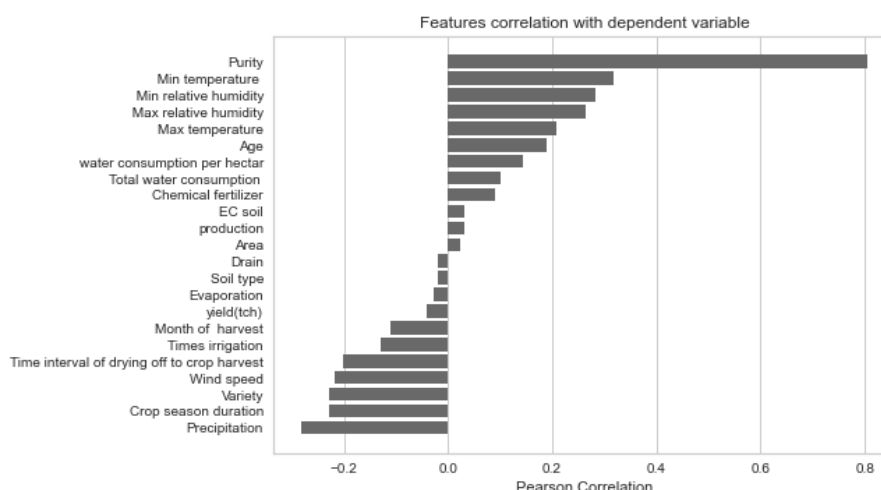
جدول ۱ - مقاله‌های بررسی شده
Table 1- Reviewed articles

مرجع Reference	محصول Crop	تکنیک Technique	ابزار Tool	ویژگی Feature
Ferraro <i>et al.</i> (2009)	نیشکر Sugarcane	Classification and regression trees (CART)		مدیریت مزرعه، سن محصول، ماه برداشت، طول فصل زراعی، مساحت، بارندگی Farm management, Month of harvest, Age, Crop season duration, Area, Precipitation
Veenadhari <i>et al.</i> 2011	سویا Soybean	Decision tree		رطوبت نسبی، تبخیر Relative Humidity, Temperature, Rainfall, Evaporation
Veenadhari <i>et al.</i> (2014)	ذرت، گندم، سویا، برنج Maize, Wheat, Paddy, Soyabean	Decision tree	Web based software in C# language	بارندگی، حداقل و حداکثر دما، تبخیر، تعرق، باقی‌مانده پوشش ابر Rainfall, Maximum & Minimum temperature, Potential Evapotranspiration, Cloud cover
Thuankaewsing <i>et al.</i> (2015)	نیشکر Sugarcane	Artificial neural networks	Matlab	مزرعه، سن، کلاس محصول، رقم، نوع خاک، آبیاری، طول فصل زراعی، بارندگی، حداقل و حداکثر دما Farm skill, Area, Crop class, Cultivar, Soil type, Irrigation system, Rainfall, Maximum & Minimum temperature, Crop season duration
Balakrishnan <i>et al.</i> (2016)	برنج، پنبه، نیشکر و بادام زمینی Rice paddy, Cotton, SugarcaneGroundnut	Support vector machine NaiveBayes-AdaSYM-AdaNaiveBayse	Rapidminer	میانگین و حداقل و حداکثر دما، پوشش ابر، تبخیر، تعرق، باقی‌مانده پوشش ابر، روزهای مرطوب، بارندگی Average Temperature, Cloud Cover, Diurnal Temperature, Maximum Temperature, Minimum Temperature, Potential Evapotranspiration, Vapour Pressure, Wet day frequency, Precipitation
Bocca and Rodrigues (2016)	نیشکر Sugarcane	Random forest, Support vector machine, Boosted regression trees, Artificial neural networks, Regression trees		کود شیمیایی، دما، بارندگی، مزرعه، ماه برداشت، رقم محصول، نوع خاک Fertilizer, Temperature, Precipitation, Variety, Age, Soil information, Month of harvest
Everingham <i>et al.</i> (2016)	نیشکر Sugarcane	Classification and regression random forest	Statistical software R	بارندگی، دما، تابش خورشید Rainfall, Temperature, Radiation
de Oliveira <i>et al.</i> (2017)	استحصالی از نیشکر Recoverable sugar from sugarcane	Support vector regression, Random forests, Regression trees	Statistical software R	اطلاعات خاک، حداقل و حداکثر دما، مجموع تعداد روزها با درجه حرارت منفی و مثبت Soil information, Maximum & Minimum temperature, Sum of degree days, Precipitation, Sum of Negative Degree Days, Fertilization, Variety, Crop season duration
Rajeswari <i>et al.</i> (2017)	تقسیم‌گیری بهترین توالی محصول Decide the better crop sequence	Association rule, Decision tree		اطلاعات خاک Soil information
Charoen-Ung, and Mittrapiyanuruk (2018)	نیشکر Sugarcane	Random forest	python	رقم محصول، نوع خاک، مساحت، کود شیمیایی، نوع آبیاری Cane class/type, Soil type, Area, Fertilizer, Rainfall, Epidemic, Water Type
Pande <i>et al.</i> (2019)	انتخاب محصول مناسب Selecting suitable crop	Decision tree		رنگ خاک، رطوبت خاک، PH خاک، فصل، بارندگی، آبیاری Soil color, Soil moisture, Soil PH, Season, Rainfall, Irrigation
Medar <i>et al.</i> (2019)	نیشکر Sugarcane	Time series, support vector regression	python	دما، دمای نقطه شبنم، دمای خاک، رطوبت خاک، بارندگی، رطوبت نسبی، مدت زمان آفتابی، شاخص NDVI، تبخیر، تعرق Temperature, Dew Point Temperature, Soil Temperature, Soil Moisture, Precipitation, Relative Humidity, Sunshine Duration, Evapotranspiration, NDVI
Zakidizaji <i>et al.</i> (2019)	نیشکر Sugarcane	C5.0 and QUEST Decision Tree	SPSS	رقم محصول، ماه برداشت، کودشیمیایی، سن گیاه، تعداد دفعات آبیاری، نسبت سطح سمپاشی، بافت خاک، هدایت الکتریکی خاک، مقدار آب مصرفی، زهکشی، مدیریت مزرعه، طول فصل زراعی، مساحت Crop duration, Area

جدول ۲- توصیف متغیرهای گسسته پژوهش

Table 2- Description categorical variables used for this study

ردیف Row	نام متغیر Variable name	توصیف متغیر Variable description
1	مدیریت تولید Production management	1, 2 sandy loam سندی لوم، sandy clay loam سندی کلی لوم
2	بافت خاک Soil type	سیلتی لوم، silty loam سیلتی کلی، silty clay لوم سیلتی کلی سیلتی لوم، silty loam سیلتی کلی لوم، silty clay لوم کلی لوم-کلی لوم، loam-clay لوم کلی
3	مزرعه Farm	480 مزرعه
4	واريته محصول Variety	CP48-103, CP57-614, CP69-1062, CP73-21 IRC0010, IRC0014, IRC9901, IRC9902, IRC9906, MIX, SP70-1143, Tahghighati
5	سن گیاه (کلاس محصول) Age (Cane class)	PC, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10
6	ماه برداشت Month of harvest	فروردین، اردیبهشت، مهر، آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند April, may, October, November, December, January, February, March
7	تعداد دفعات آبیاری Times irrigation	11 تا 35 نوبت



شکل ۱- همبستگی بین متغیرهای مستقل با متغیر وابسته (درصد شکر استحصالی)

Fig.1. Features correlation with dependent variable (recoverable sugar)

آماده‌سازی داده‌ها

گام سوم در متدولوژی کریسپ آماده‌سازی داده‌ها می‌باشد. در این مرحله متناسب با الگوریتم‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی تغییراتی بر روی شکل داده‌ها انجام می‌شود، از جمله تبدیل متغیرهای اسمی و ترتیبی به مقادیر عددی می‌باشد. در این پژوهش متغیرهای بافت خاک، واریته محصول، سن گیاه و ماه برداشت به مقادیر عددی تبدیل شده‌اند.

شکل ۱ همبستگی متغیرهای مستقل (پیش‌بینی‌کننده) با متغیر وابسته یعنی درصد شکر استحصالی را نشان می‌دهد، که بر اساس همبستگی پیرسون^۱ محاسبه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود ویژگی‌های درصد خلوص شربت و حداقل دما همبستگی مثبت بالایی با میزان شکر استحصالی دارند و هم‌چنین متغیر بارندگی بیش‌ترین همبستگی منفی با میزان شکر استحصالی را دارد.

1- Pearson

جدول ۳- توصیف متغیرهای پیوسته پژوهش

Table 3- Description continuous variables used for this study

ردیف Number	نام متغیر Variable name	واحد Unit	توصیف متغیر Variable description	میانگین Average
1	مساحت Area	ha	متغیر ورودی Input variable	22.41
2	کود مصرفی Chemical fertilizer consumption	kg ha ⁻¹	متغیر ورودی Input variable میزان کل کود مصرفی برای مزارع که طی ۴ مرحله انجام می‌شود.	354
3	مصرف آب در هکتار Water consumption per hectare	m ³ ha ⁻¹	متغیر ورودی Input variable	1404
4	کل آب مصرفی Total water consumption	m ³ ha ⁻¹	متغیر ورودی Input variable مساحت قابل برداشت * مصرف آب در هکتار	31902
5	کل زه خروجی Drain	m ³ ha ⁻¹	متغیر ورودی Input variable	15320
6	طول فصل زراعی Crop season duration	day	متغیر ورودی Input variable	391
7	عملکرد Yield	ton ha ⁻¹	متغیر ورودی Input variable مقدار نیشکر برداشت شده از مساحت قابل برداشت	71.7
8	هدایت الکتریکی خاک Soil EC	ds m ⁻¹	متغیر ورودی Input variable	4.96
9	درصد خلوص شربت Purity	%	متغیر ورودی Input variable	87.20
10	شکر تصفیه شده (شکر استحصالی) Recoverable sugar	%	متغیر هدف Target variable	10.22
11	فاصله زمانی قطع آب تا برداشت محصول Time interval of drying off to crop harvest	day	متغیر ورودی Input variable	88
12	حداقل دما Min temperature	°C	متغیر ورودی Input variable	23.78
13	حداکثر دما Max temperature	°C	متغیر ورودی Input variable	42.65
14	بارندگی Mean precipitation	mm	متغیر ورودی Input variable	
15	حداقل رطوبت نسبی Min relative humidity	%	متغیر ورودی Input variable	18.50
16	حداکثر رطوبت نسبی Max relative humidity	%	متغیر ورودی Input variable	57.64
17	سرعت باد Wind speed	m s ⁻¹	متغیر ورودی Input variable	5
18	تبخیر Evaporation	mm	متغیر ورودی Input variable	12.98

تقسیم شده است به این ترتیب که مقادیر بیشتر مساوی ۹ برای درصد شکر استحصالی در کلاس مطلوب و مقادیر پایین‌تر از ۹ در کلاس نامطلوب قرار دارند.

با توجه به این که متغیرهای مورد استفاده برای مدل‌سازی مقیاس یکسانی ندارند، برای جلوگیری از این که مقیاس‌های متفاوت لطمه‌ای

تبدیل ویژگی‌های عددی به بازه‌های مناسب گسسته‌سازی^۱ نامیده می‌شود. در این پژوهش متغیر شکر استحصالی با توجه به نظر خبره شرکت مورد مطالعه به ۲ کلاس مطلوب (۰) و نامطلوب (۱)

درختان تصمیم می‌باشد که هر درخت تصمیم با مجموعه‌ای از داده‌ها که به روش نمونه‌برداری با جایگذاری (تکنیک بوت‌استرپ)^۴ انتخاب شده‌اند آموزش داده می‌شود. برای ساخت هر درخت در هر مرحله زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده سپس بر اساس معیارهای متفاوتی مثل سنجه جینی^۵ بهترین ویژگی برای تفکیک داده‌ها از زیر مجموعه تصادفی از ویژگی‌ها انتخاب می‌شود. این سنجه ناخالصی نمونه‌ها را در مجموعه D بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌کند:

$$\text{Gini}(D) = 1 - \sum_{i=1}^m p_i^2 \quad (2)$$

که در آن p_i احتمال تعلق یک نمونه در مجموعه D را به کلاس G_i نشان می‌دهد و برای هر ویژگی هرچه مقدار آن کمتر باشد یعنی آن ویژگی اطلاعات بیشتری را به ما می‌دهد و برای تفکیک انتخاب می‌شود (Han et al., 2019). برای پیش‌بینی نمونه‌های داده آزمون، ابتدا پیش‌بینی هر درخت انجام می‌شود و سپس همه پیش‌بینی‌ها ادغام شده و رای‌گیری با رویکرد سهل‌گیرانه یا سخت‌گیرانه انجام می‌شود و پیش‌بینی نهایی اعلام می‌شود (Everingham et al., 2016).

بوستینگ^۶

بوستینگ یکی از تکنیک‌های یادگیری گروهی است که تلاش می‌کند دسته‌بندی قوی از تعدادی دسته‌بند ضعیف (یادگیرنده ضعیف)^۷ ایجاد کند. این کار با ساخت یک مدل از داده‌های آموزش، سپس ایجاد یک مدل دوم که سعی می‌کند خطاهای مدل اول را اصلاح کند، انجام می‌شود. در واقع در بوستینگ برخلاف روش‌های بگینگ^۸ مانند جنگل تصادفی، مدل‌ها به طور مستقل ساخته نمی‌شوند بلکه به طور متوالی ساخته می‌شوند. آدابوست^۹ اولین الگوریتم موفق بوستینگ است که برای طبقه‌بندی‌های باینری (دودویی) توسعه داده شده است. آدابوست مخفف بوستینگ تطبیقی بوده که توسط یاو فروند و رابرت شاپیر^{۱۰} ابداع شد. در واقع آدابوست یک متا الگوریتم^{۱۱} است که برای ارتقای عملکرد همراه دیگر الگوریتم‌های یادگیری استفاده می‌شود. در این الگوریتم دسته‌بندی در هر مرحله جدید بر مبنای نمونه‌های غلط طبقه‌بندی شده در مراحل قبل، تنظیم می‌گردد. در الگوریتم آدابوست در هر دور یک دسته‌بند ضعیف اضافه می‌شود.

به فرآیند تحلیل وارد نکند باید نرمال‌سازی شوند. در نرمال‌سازی داده‌ها سعی می‌شود تا وزن یکسانی به کلیه ویژگی‌ها داده شود. روش‌های متعددی برای نرمال‌سازی داده‌ها وجود دارد. در این پژوهش از روش نرمال‌سازی مین-ماکس^۱ استفاده شده است. این روش نرمال‌سازی یک تبدیل خطی را بر روی داده‌های اولیه اجرا می‌کند. در این روش یک مقدار از ویژگی A مانند x_i به مقداری مانند x در محدوده $[New_{min}, New_{max}]$ با رابطه (۱) نگاشت می‌شود (Han, Kamber, & Pei, 2019):

$$x = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} * (New_{max} - New_{min}) + New_{min} \quad (1)$$

که x_{min} و x_{max} به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار موجود برای ویژگی مورد نظر و New_{min} و New_{max} محدوده جدید است که در اینجا بازه $[0,1]$ می‌باشد.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین

برای مدل‌سازی این پژوهش از چهار الگوریتم یادگیری ماشین استفاده شده است که در ادامه معرفی می‌شوند. متغیرهای پیوسته و گسسته که در جدول‌های ۲ و ۳ معرفی شدند برای ساخت مدل‌ها و پیش‌بینی کلاس‌های تعیین شده برای شکر استحصالی از نیشکر استفاده شده است.

ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان به طور ذاتی یک دسته‌بند دودویی است که یک خط یا ابر صفحه جداکننده برای طبقه‌بندی داده‌های نمونه می‌سازد. قابلیت طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان سنتی را می‌توان به وسیله‌ای تبدیل فضای ویژگی‌های اصلی به فضای ویژگی با ابعاد بالاتر با استفاده از حقه کرنل^۲ به طور اساسی افزایش داد. ماشین بردار پشتیبان برای یادگیری از توابع خطی استفاده می‌کند در برخی از موارد غیرخطی، ماشین بردار پشتیبان از تکنیک کرنل برای نگاشت کردن داده‌ها در فضای ویژگی با ابعاد بالا استفاده می‌کند که توابع خطی می‌توانند به کار برده شوند (Liakos et al., 2018; Palanivel & Surianarayanan, 2019).

جنگل تصادفی^۳

جنگل‌های تصادفی از الگوریتم‌های یادگیری گروهی هستند که می‌توانند برای مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده شوند. مزیت کلیدی جنگل تصادفی این است که می‌تواند روابط غیرخطی و سلسله مراتبی را بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و متغیر پاسخ با استفاده از رویکرد یادگیری گروهی بررسی کند. مدل جنگل تصادفی گروهی از

4- Bootstrap

5- Gini index

6- Boosting

7- Weak learner

8- Bagging

9- Adaptive boosting

10- Freund & Schapire

11- Meta-algorithm

1- Min-Max

2- Kernel trick

3- Random forest

نتایج و بحث

برای ارزیابی مدل‌های ساخته شده از سنج‌های صحت، دقت، فراخوانی و امتیاز F1 و همچنین اعتبارسنجی متقابل داده‌ها استفاده شده است. روابط (۳) تا (۶) سنج‌های استفاده شده را نشان می‌دهند.

$$(۳) \text{ صحت} = \frac{TP+TN}{P+N}$$

$$(۴) \text{ دقت} = \frac{TP}{TP+FP}$$

$$(۵) \text{ حساسیت} = \frac{TP}{p}$$

$$(۶) \text{ امتیاز F1} = \frac{2*Precision*Recall}{Precision+Recall}$$

در روابط بالا P و N به ترتیب تعداد کل نمونه‌ها در کلاس مثبت و منفی اشاره می‌کند. درست مثبت (TP)، این اصطلاح اشاره به تعداد نمونه‌هایی دارد که در کلاس مثبت هستند و توسط دسته‌بند به درستی برچسب خورده است. درست منفی (TN)، این اصطلاح اشاره به تعداد نمونه‌هایی دارد که در کلاس منفی هستند و توسط دسته‌بند به درستی برچسب منفی خورده است. نادرست مثبت (FP)، تعداد نمونه‌هایی هستند که در کلاس منفی قرار دارند اما به نادرست برچسب مثبت خورده‌اند. نادرست منفی (FN)، تعداد نمونه‌هایی هستند که در کلاس مثبت قرار دارند اما به نادرست برچسب منفی خورده‌اند. معیار صحت کارایی کلی مدل را می‌سنجد. سنج‌های دقت و حساسیت به صورت گسترده‌ای در دسته‌بندی استفاده می‌شوند. سنج دقت به عنوان یک سنج درستی در نظر گرفته می‌شود (درصدی از نمونه‌ها که مثبت برچسب‌گذاری می‌شوند و واقعاً کلاس آن‌ها مثبت است) و سنج فراخوانی یک سنج تمامیت است (درصدی از نمونه‌های کلاس مثبت که به درستی دسته‌بندی می‌شوند) و با سنج حساسیت برابر است. سنج امتیاز F1 میانگین هارمونیک^{۱۰} دو سنج دقت و فراخوانی است. در فرمول آن وزن یکسانی به دقت و فراخوانی تخصیص داده شده است (Han et al., 2019). جدول ۵ نتایج مدل‌های ساخته شده برای پیش‌بینی شکر استحصال را نشان می‌دهد. سنج‌های دقت، حساسیت و امتیاز F1 برای مجموعه آزمایشی و سنج صحت برای مجموعه آموزشی و آزمایشی محاسبه شده است. مقادیر جدول بر اساس درصد می‌باشند.

در هر مرحله دسته‌بند پایه فقط کافیت از دسته‌بند تصادفی (۵۰٪) بهتر باشد (Freund and Schapire, 1997).

گرادین بوستینگ

گرادین تقویتی^۱ یکی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که برای مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون به کار می‌رود. یک مدل پیش‌بینی در قالب گروهی از یادگیرنده‌های ضعیف ایجاد می‌کند که معمولاً یادگیرنده‌ها درختان تصمیم هستند. مدل‌سازی همانند دیگر روش‌های بوستینگ به شکل مرحله‌ای می‌باشد. این الگوریتم مشابه بوستینگ تطبیقی می‌باشد اما از جنبه‌های خاصی با آن متفاوت است. در واقع در این روش مسئله بوستینگ (تقویتی) به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌شود. یعنی در هر مرحله تابع ضرری در نظر گرفته می‌شود و هدف بهینه‌سازی آن می‌باشد. این ایده اولین بار توسط بریمن^۲ توسعه داده شد. الگوریتم تقویت گرادین حداکثری^۳ (XGBoost) از دسته الگوریتم‌های گرادین تقویتی و الگوریتم‌های گروهی می‌باشد که می‌تواند برای مسائل رگرسیون و طبقه‌بندی استفاده شود. الگوریتم XGBoost به دلیل سرعت بسیار بالا در مقایسه با سایر الگوریتم‌های گرادین بوستینگ و عملکرد بسیار خوبی که دارد بسیار محبوب است و همچنین در مسابقات یادگیری ماشین استفاده می‌شود (Brownlee, 2020).

مدل‌سازی

مدل‌سازی این تحقیق با زبان برنامه‌نویسی پایتون نسخه ۳٫۸٫۶ و در محیط ژوپیتر نوت‌بوک انجام شده است. برای مدل‌سازی داده‌ها با تکنیک هلداوت^۴ به صورت تصادفی به دو مجموعه مستقل آموزشی و آزمایشی تقسیم شده‌اند. معمولاً دو سوم داده‌ها به مجموعه‌ی آموزشی و یک سوم باقی‌مانده به مجموعه‌ی آزمایشی تخصیص داده می‌شود. مجموعه داده‌های آموزشی برای ساخت مدل و مجموعه داده‌های آزمایشی برای ارزشیابی مدل استفاده می‌شود (Han et al., 2019). در این پژوهش ۷۰ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش استفاده شده‌اند. برای تنظیم و به‌دست آوردن مقادیر بهینه هایپرپارامترهای الگوریتم‌ها از روش جست و جوی شبکه‌ای^۵ به همراه اعتبارسنجی متقابل استفاده شده است. جدول ۴ هایپرپارامترهای تنظیم شده به همراه مقدارهایشان را نشان می‌دهد.

6- True positive

7- True negative

8- False positive

9- False negative

10- Harmonic

1- Gradient boosting

2- Breiman

3- Extreme gradient boosting

4- Holdout

5- Grid search

جدول ۴- هایپرپارامترهای تنظیم‌شده الگوریتم‌ها

Table 4- Tuned of algorithms hyperparameters

الگوریتم Algorithms	مقدار تنظیم‌شده هایپرپارامترها با روش جست‌وجوی شبکه‌ای به همراه اعتبارسنجی متقابل Hyperparameters by cross-validated grid-search
	تعداد درختان : تعداد درختان تصمیم در جنگل ۱۰۰ The number of trees in the forest.
	حداکثر عمق درخت: The maximum depth of the tree
جنگل تصادفی Random forest	حداقل نمونه در گره برگ: کم‌ترین نمونه لازم در گره که برگ محسوب شود. ۱۲ The minimum number of samples required to be at a leaf node
	حداکثر ویژگی‌ها: بیش‌ترین تعداد ویژگی‌هایی که هنگام جست‌وجوی بهترین تقسیم باید در نظر گرفته شود، ۸ The number of features to consider when looking for the best split
	تعداد مدل‌ها: تعداد مدل‌هایی که فرایند آموزش را تکرار می‌کنند. ۵۰ The maximum number of estimators at which boosting is terminated
آدا بوست AdaBoost	نرخ یادگیری: سهم هر طبقه‌بند در وزن‌ها در هر دور را کنترل می‌کند. توازن بین میزان یادگیری و تعداد دورها (طبقه‌بندها) وجود دارد. ۰,۲۵ Learning rate shrinks the contribution of each classifier by learning_rate
	تعداد مدل‌ها: تعداد درختان تصمیم در جنگل (تعداد دفعات یادگیری مدل) ۴۵ Number of boosting rounds
تقویت گرادیان حداکثری XGBoost	حداکثر عمق درخت: ۳ نرخ یادگیری: کنترل وزن مدل‌ها در هر دور، ۰,۱۷ Learning rate
	کرنل: هسته، جداسازی کلاس‌ها در فضای داده‌ها، خطی Specifies the kernel type to be used in the algorithm
ماشین بردار پشتیبان SVC	هایپرپارامتر جریمه C: پارامتر تنظیم میزان جریمه‌ای که به داده‌هایی که اشتباه دسته‌بندی شده‌اند داده می‌شود. ۱۵ Regularization parameter

جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل‌ها

Table 5- Results of models evaluation

مدل Model	صحت مجموعه آموزش Accuracy train	صحت مجموعه آزمایش Accuracy test	دقت Precision	فراخوانی Recall	امتیاز F1 F1 score
جنگل تصادفی RF	93.7	92.3	85	68	75
آدا بوست AdaBoost	92.6	92.4	87	67	76
تقویت گرادیان حداکثری XGBoost	94.8	92.1	81	72	76
ماشین بردار پشتیبان SVC	92.5	92	65	87	74

تعیین می‌کند نتایج مدل ساخته شده بر روی یک مجموعه داده تا چه اندازه قابل تعمیم و مستقل از داده‌های آموزشی است. در اعتبارسنجی متقابل که همراه با پارامتر k استفاده می‌شود، داده‌های اولیه به صورت تصادفی به k زیرمجموعه تقسیم می‌شوند. هر دفعه یک زیر مجموعه برای اعتبارسنجی و $k-1$ تای دیگر برای آموزش به کار می‌رود. در نهایت میانگین این k اعتبارسنجی به عنوان امتیاز نهایی اعلام می‌شود.

همان طور که جدول ۵ نشان می‌دهد بر اساس سنجح صحت امتیاز مدل‌ها بسیار نزدیک به هم و با تفاوت ناچیزی مدل آدا بوست عملکرد بهتری دارد. هم‌چنین بر اساس معیارهای دقت و فراخوانی به ترتیب مدل‌های آدا بوست و ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارند. بر اساس معیار F1 مدل‌های آدا بوست و تقویت گرادیان حداکثری با تفاوت ناچیزی نسبت به مدل‌های دیگر عملکرد بهتری دارند.

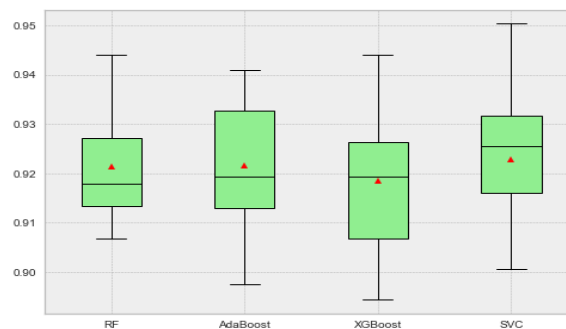
اعتبارسنجی متقابل

اعتبارسنجی متقابل یکی از روش‌های ارزیابی مدل می‌باشد که

جدول ۶- نتایج اعتبارسنجی متقابل

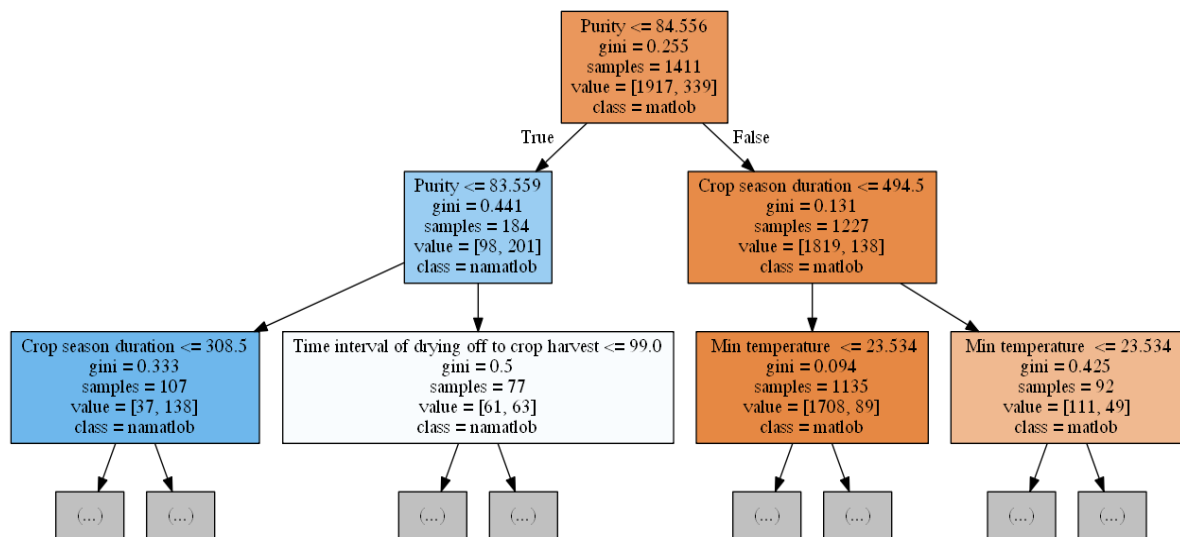
Table 6- Result of 10-fold cross-validation

مدل Model	صحت Accuracy	انحراف استاندارد Standard deviation
جنگل تصادفی RF	92.1	0.011
آدا بوست AdaBoost	92.2	0.012
تقویت گرادیان حداکثری XGBoost	91.9	0.013
ماشین بردار پشتیبان SVC	92.3	0.013



شکل ۲- نمودار جعبه‌ای اعتبارسنجی متقابل مدل‌ها

Fig.2. Boxplot of CV scores of all classifiers over 10-fold stratified cross validation



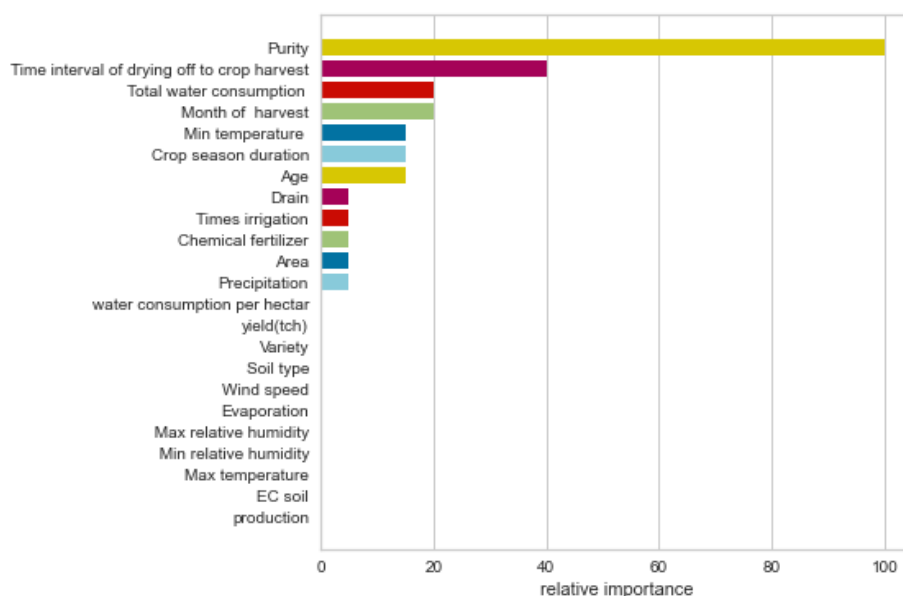
شکل ۳- بخشی از درخت تصمیم شماره ۱ از مجموعه درختان تصمیم جنگل تصادفی

Fig.3. Part of decision tree No.1 from the Random Forest decision trees collection

جدول ۷- قوانین استخراجی از درخت تصمیم شماره ۱ از مجموعه درختان تصمیم جنگل تصادفی

Table 7- Extraction rules from decision tree No.1, from the Random Forest decision trees collection

Table 7 - Extraction rules from decision tree #94, from the Random Forest decision trees collection					
		-- Purity <= 84.556			-- Purity > 84.556
		-- Purity <= 83.559		-- Crop season duration <= 494.500	
		-- Crop season duration <= 308.500		-- Min temperature <= 23.534	
		-- class: 0.0		-- Crop season duration <= 376.500	
		-- Crop season duration > 308.500		-- truncated branch of depth 4	
		water consumption per hectar <= 1397.852		-- Crop season duration > 376.500	
		-- truncated branch of depth 3		-- truncated branch of depth 4	
		water consumption per hectar > 1397.852		-- Min temperature > 23.534	
		-- truncated branch of depth 2		-- Precipitation <= 0.376	
		-- Purity > 83.559		-- class: 0.0	
		-- Time interval of drying off to crop harvest <		-- Precipitation > 0.376	
		= 99.000		-- truncated branch of depth 4	
		-- yield(tch) <= 74.989		-- Crop season duration > 494.500	
		-- truncated branch of depth 2		-- Min temperature <= 23.534	
		-- yield(tch) > 74.989		-- Total water consumption <= 30014.873	
		-- truncated branch of depth 2		-- class: 0.0	
		-- Time interval of drying off to crop harvest >		-- Total water consumption > 30014.873	
		99.000		-- truncated branch of depth 3	
		-- Max temperature <= 42.952		-- Min temperature > 23.534	
		-- class: 1.0		-- Times irrigation <= 28.500	
		-- Max temperature > 42.952		-- truncated branch of depth 2	
		-- class: 1.0		-- Times irrigation > 28.500	
				-- class: 0.0	



شکل ۴- اهمیت متغیرها در مدل آداپوست

Fig.4. Feature importance of 23 features using AdaBoost Classifier

استحصالی بر اساس درصد نشان می‌دهد. بر این اساس مدل ماشین بردار پشتیبان با صحت ۹۲/۳٪ بهترین مدل برای پیش‌بینی شکر استحصالی می‌باشد. شکل ۲ نمودار جعبه‌ای ارزیابی مدل‌ها با روش اعتبار‌سنجی متقابل را نشان می‌دهد.

شکل ۳ سه سطح از درخت تصمیم شماره یک از مجموعه ۱۰۰ درخت ساخته شده در مدل جنگل تصادفی را نشان می‌دهد. از شاخص جینی برای تقسیم‌بندی استفاده شده و ویژگی‌هایی که به ریشه درخت نزدیک‌تر هستند اهمیت بیشتری دارند. هم‌چنین در

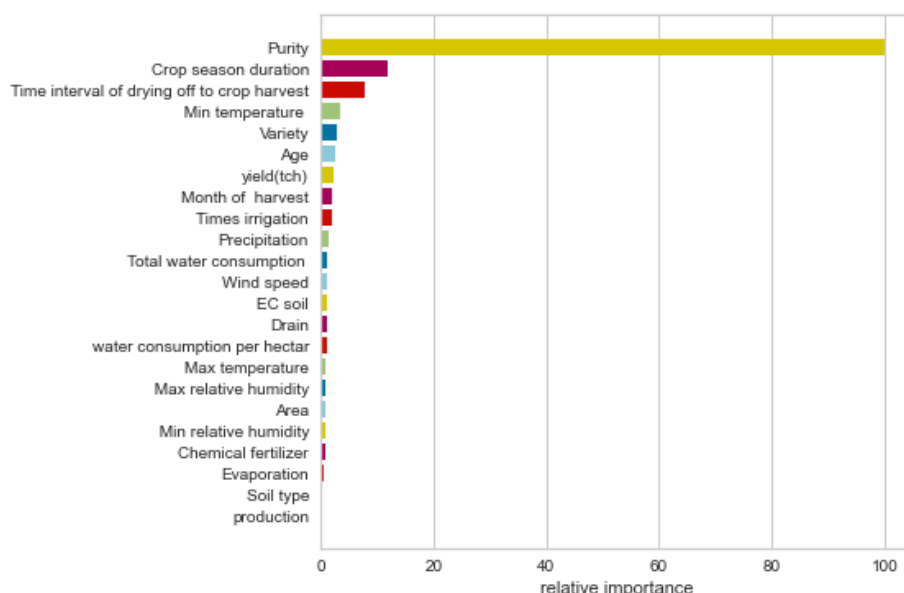
اگر زیرمجموعه‌ها یا بخش‌ها به گونه‌ای انتخاب شوند که توزیع کلاس نمونه‌ها در هر بخش به صورت تقریبی یکسان باشد، اعتبارسنجی متقابل و طبقه‌بندی شده^۱ نام دارد (Han et al., 2019). در این پژوهش برای ارزیابی مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی شکر استحصال، از اعتبارسنجی متقابل و طبقه‌بندی شده داده‌ها با ۱۰ لایه ۲ و تکرار و معیار صحت برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شده است. جدول ۶ نتایج اعتبارسنجی متقابل مدل‌ها را برای پیش‌بینی شکر

1- Stratified Cross-validation

و جنگل تصادفی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود متغیرهای درصد خلوص شربت، فاصله زمانی قطع آب تا برداشت محصول، طول فصل زراعی و کل آب مصرفی مهم‌تر از سایر متغیرها می‌باشند.

جدول ۷ مجموعه قوانین استخراج شده از این درخت را در سه سطح نمایش می‌دهد.

شکل‌های ۴ و ۵ میزان اهمیت متغیرهای استفاده شده برای مدل‌سازی درصد شکر استحصالی را به ترتیب برای مدل‌های آدابوست



شکل ۵- اهمیت متغیرها در مدل جنگل تصادفی

Fig.5. Feature importance of 23 features using Random Forest Classifier

میزان بارندگی کم‌اهمیت‌ترین متغیر بوده است. در پژوهش دیگری (de Oliveira et al., 2017) متغیرهای آب‌وهوایی از جمله مجموع درجه حرارت روزانه و حداقل دما بیش‌ترین اهمیت را بر عملکرد شکر استحصالی از نیشکر داشته و متغیرهای مربوط به خاک از جمله نوع خاک اهمیت کمتری داشته‌اند. نتایج حاصل از این مطالعه و تحلیل قوانین به‌دست آمده از مجموعه ۱۰۰ درخت تصمیم ساخته شده در مدل جنگل تصادفی می‌تواند برای مدیران کشت‌و‌صنعت‌های مختلف در تعیین استراتژی‌های مناسب و آماده‌سازی شرایط برای دستیابی به تولید مطلوب و بهینه استفاده شود.

پیشنهادهای

برای پژوهش‌های آینده و همچنین سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری شرکت کشت‌و‌صنعت نیشکر امیرکبیر پیشنهادهایی به شرح زیر ارائه می‌شود:

- ✓ در تحقیقات آینده می‌توان از تعداد نمونه‌های بیشتر استفاده شود که نتایج با اطمینان بیشتری حاصل شود.
- ✓ همچنین می‌توان از روش‌های یادگیری عمیق و تحلیل سری‌های زمانی و پردازش تصویر استفاده شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه رویکرد جدیدی مبتنی بر روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی شکر استحصالی از نیشکر ارائه شد. برای مدل‌سازی داده‌ها به دو دسته آموزشی و آزمایشی تقسیم شدند. ۲۲۵۶ نمونه که ۷۰٪ از داده‌ها را شامل می‌شود در مجموعه آموزشی و ۹۶۷ نمونه که ۳۰٪ داده‌ها می‌باشد برای مجموعه آزمایشی در نظر گرفته شد و سپس مدل‌های ساخته شده با سنج‌های متفاوتی بر روی مجموعه داده آزمایشی ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد همه مدل‌ها قابل قبول می‌باشد و می‌توان از روش‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های یادگیری جمعی برای پیش‌بینی استفاده نمود. نتایج حاصل از بررسی اهمیت ویژگی‌ها نشان می‌دهد متغیرهای درصد خلوص شربت، طول فصل زراعی، فاصله زمانی قطع آب تا برداشت محصول، ماه برداشت و حداقل دما از متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر عملکرد شکر استحصالی می‌باشند. در پژوهش‌های گذشته نتایج حاصل از بررسی متغیرهای مؤثر بر عملکرد شکر استحصالی از نیشکر متفاوت می‌باشند. برای مثال در پژوهش (Ferraro et al., 2009) متغیرهای رقم محصول و سن محصول بیش‌ترین اهمیت را بر عملکرد شکر استحصالی از نیشکر داشته و

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر که داده‌های مورد نیاز برای انجام پژوهش را در اختیار قرار داده‌اند، کمال تشکر را دارند.

- ✓ ترکیب الگوریتم‌های یادگیری ماشین با یک‌دیگر و مقایسه با مدل‌های ارائه شده در پژوهش حاضر به‌منظور دستیابی به مدلی‌هایی با صحت بالاتر.
- ✓ استفاده از تجهیزات اینترنت اشیا برای جمع‌آوری و پردازش بالادرنگ داده‌ها در مزارع کشت‌و‌صنعت نیشکر امیرکبیر

References

- Balakrishnan, N., & Muthukumarasamy, G. (2016). Crop production-ensemble machine learning model for prediction. *International Journal of Computer Science and Software Engineering*, 5, 148.
- Bocca, F. F., & Rodrigues, L. H. A. (2016). The effect of tuning, feature engineering, and feature selection in data mining applied to rainfed sugarcane yield modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.015>.
- Brownlee, J. (2020a). How to Develop Your First XGBoost Model in Python with scikit-learn. <https://machinelearningmastery.com/develop-first-xgboost-model-python-scikit-learn/>.
- Brownlee, J. (2020b). A Gentle Introduction to XGBoost for Applied Machine Learning. <https://machinelearningmastery.com/gentle-introduction-xgboost-applied-machine-learning/>.
- Brownlee, J. (2020c). Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Ensemble in Python. <https://machinelearningmastery.com/extreme-gradient-boosting-ensemble-in-python/>.
- Charoen-Ung, P., & Mittrapiyanuruk, P. (2018). Sugarcane Yield Grade Prediction using random forest with forward feature selection and hyper-parameter tuning. Pages 33-42. International Conference on Computing and Information Technology: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93692-5_4
- de Oliveira, M. P. G., Bocca, F. F., & Rodrigues, L. H. A. (2017). From spreadsheets to sugar content modeling: A data mining approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 132, 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.11.012>
- Everingham, Y., Sexton, J., Skocaj, D., & Inman-Bamber, G. (2016). Accurate prediction of sugarcane yield using a random forest algorithm. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 27. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0364-z>
- Ferraro, D. O., Rivero, D. E., & Ghersa, C. M. (2009). An analysis of the factors that influence sugarcane yield in Northern Argentina using classification and regression trees. *Field Crops Research*, 112, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.02.014>
- Freund, Y., & Schapire, R. E. (1997). A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Sciences*, 55, 119-139. <https://doi.org/10.1006/jcss.1997.1504>
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2019). *Data mining: concepts and techniques*, 3rd ed. Niaz danesh. Tehran.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18, 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Medar, R. A., Rajpurohit, V. S., & Ambekar, A. M. (2019). Sugarcane Crop Yield Forecasting Model Using Supervised Machine Learning. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 11, 11. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2019.08.02>
- Palanivel, K., & Surianarayanan, C. (2019). An approach for prediction of crop yield using machine learning and big data techniques. *International Journal of Computer Engineering and Technology*, 10, 110-118. <https://ssrn.com/abstract=3555087>
- Pande, A., Purohit, S., Jadhav, S., & Shah, K. (2019). Optimum Crop Prediction using Data Mining and Machine Learning Techniques. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7, 2392-2396. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.3436>
- Rajeswari, S., Suthendran, K., & Rajakumar, K. (2017). A smart agricultural model by integrating IoT, mobile and cloud-based big data analytics. Pages 1-5. 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2): IEEE. <https://doi.org/10.1109/I2C2.2017.8321902>
- Ramesh, D., & Vardhan, B. V. (2013). Data mining techniques and applications to agricultural yield data. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2, 3477-3480.
- Shooshtari, M. B., Ahmadian, S., & Asfiaa, G. (2008). *Sugarcane in Iran*. Aeizh. Tehran.
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12, 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- The Sugar Market. (n.d.). About Sugar. Retrieved from <https://www.isosugar.org/sugarsector/sugar>
- Thuankaewsing, S., Khamjan, S., Piewthongngam, K., & Pathumnakul, S. (2015). Harvest scheduling algorithm to equalize supplier benefits: A case study from the Thai sugar cane industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 110, 42-55. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.10.005>

22. Van Klompenburg, T., Kassahun, A., & Catal, C. 2020. Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>
23. Veenadhari, S., Misra, B., & Singh, C. (2011). Soybean productivity modelling using decision tree algorithms. *International Journal of Computer Applications*, 27, 11-15.
24. Veenadhari, S., Misra, B., & Singh, C. (2014). *Machine learning approach for forecasting crop yield based on climatic parameters*. Pages 1-5. 2014 International Conference on Computer Communication and Informatics: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCI.2014.6921718>
25. Walton, J. The 5 Countries That Produce the Most Sugar. <https://www.investopedia.com/articles/investing/101615/5-countries-produce-most-sugar.asp>
26. Zakidizaji, H., Bahrami, H., Monjezi, N., & Shiekhdavoodi, M. (2019). Modeling of the variables that influence sugarcane yield using C5. 0 and QUEST decision tree algorithms. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(2), 469-484. <https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.69712>



Numerical Simulation of the Performance and Emission of a Diesel Engine with Diesel-biodiesel Mixtures

S. R. Mousavi Seyedi^{1*}, S. M. R. Miri²

1- Associate Professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: mousavi22@sanru.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69149.1023>

Received: 27-02-2021

Revised: 21-06-2021

Accepted: 30-06-2021

Available Online: 03-07-2021

How to cite this article:

Mousavi Seyedi, S. R., & Miri, S. M. R. (2022). Numerical Simulation of the Performance and Emission of a Diesel Engine with Diesel-biodiesel Mixtures. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 559-574. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69149.1023>

Introduction

Increasing industrialization, growing energy demand, limited reserves of fossil fuels, and increasing environmental pollution have jointly necessitated for exploration of a substitute for conventional liquid fuels. Vegetable oils can be used as alternatives to petroleum fuels for engine operation. These oils are mixtures of free-fatty acid molecules to contain carbon, hydrogen, and oxygen atoms. The ability to simulate the process of converting chemical energy to heat, energy users of computational fluid dynamics software in the design, analysis, and optimization of high-tech tools. Also, simulation saves time and reduces costs, workforce, and the space required.

Materials and Methods

In this research, a one-dimensional computational fluid dynamics solution with GT-Power software was used to simulate a four-cylinder, four-stroke, direct injection diesel engine to study the performance and exhaust emissions characteristics with different speeds and blends at full load. The engine speeds were chosen to be 1100 to 1400 rpm at an interval of 100 rpm. Also, fuel blends such as diesel (as a base), B5, and B10 biodiesel were selected for engine testing. To model a engine, we should have the dimensions of the engine, input air collection, output gases collection, the amount of sprinkled fuel, valves properties, combustion, and some of the estimates corresponding to the cylinder's thermodynamic parameters when opening the output and input gate and to exchange the heat inside the cylinder as the input data. The model mainly consisted of an air cleaner, intake valve, exhaust valve, intake and exhaust port, injection nozzle, engine cylinder, and engine. Engine cylinder's intake and exhaust ports are modeled geometrically with pipes. Before this investigation was carried out, a validation model for evaluation was done by experimental and simulation data. The validation results showed that the software model error is acceptable.

Results and Discussion

The engine performance and emissions were evaluated in terms of engine torque, specific fuel consumption, NO_x, and CO emission at different engine speeds and fuels at full load. The results showed that with increasing the engine speeds, torque increased. On the other hand, the maximum engine torque for the diesel engine is slightly lower than the biodiesel-blended that increased by 4.4% because of the higher density and viscosity of biodiesel than diesel. Specific Fuel Consumption (SFC) is a measure of the fuel efficiency of any prime mover that burns fuel and produces rotation, or shaft, power. The results indicated that by increasing engine speeds, the SFC increased. A fuel with a lower heating value should be injected with more mass into the engine. This will increase the SFC. So, the maximum engine SFC for the diesel engine is more than the biodiesel-blended that decreased by 4.45% because of better fuel combustion and more power generation of biodiesel than diesel. The only nitrogen oxide that can be formed in an engine combustion temperature is nitrogen monoxide (NO). This pollutant factor can be converted to nitrogen dioxide (NO₂) over the time of exhaust gas. The results showed that with increasing the engine speeds, the NO_x emissions decrease steadily and then increases, which is due to the high temperature in the cylinder. The viscosity and density of fuels have an effect on NO_x emission, and because of the larger droplets of the fuel, it released NO_x. The highest NO_x emissions belong B10 biodiesel in 1400 rpm, due to the high oxygen content of this fuel and the lowest NO_x emissions belong B10 biodiesel in

1300 rpm, due to the low density of the fuel compared to diesel. CO is a colorless and odorless gas, whose even very low concentrations are dangerous for humans and animals. The results showed that with increasing the engine speeds, the CO emission decreased and the minimum CO emission for diesel engine is more than the biodiesel-blended that decreased by 37.61% because of excess oxygen availability and complete combustion in biodiesel than diesel.

Conclusion

The results of this study showed that the B10 blend in high engine speeds, generally had the best performance and emissions characteristics among the three fuels used in this study. Also, this investigation will assist in the development of WCO biodiesel as a viable sustainable fuel source through the use of a CFD model, optimized engine configuration, and technical report.

Keywords: Engine characteristics, GT-Power Software, Thermodynamic model, Waste cooking oil

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۷۴-۵۵۹

شبیه‌سازی عددی عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل با استفاده از مخلوط سوخت دیزل-بیودیزل

سید رضا موسوی سیدی^{۱*}، سید محمدرضا میری^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

چکیده

در میان سوخت‌های جایگزین، سوخت بیودیزل به‌عنوان یک گزینه مناسب برای موتور دیزل محسوب می‌شود. در این مطالعه، سوخت بیودیزل از روغن‌های پسماند آشپزخانه به روش ترانس‌استریفیکاسیون تولید شد. بیودیزل تولیدی در نسبت‌های ۵ و ۱۰ درصد حجمی با سوخت دیزل مخلوط و بر روی موتور دیزل چهار سیلندر چهار زمانه تزریق مستقیم در سرعت‌های ۱۱۰۰ rpm تا ۱۴۰۰ rpm با گام ۱۰۰ rpm تحت بار کامل در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر آزمایش شد. سپس جنبه آزمایشگاهی با مطالعه شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار GT-Power اعتبارسنجی شد. نتایج نشان می‌دهد توافق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد که حداکثر خطا در گشتاور ۶/۳ درصد، مصرف سوخت ویژه ۴/۸ درصد و در آلاینده‌های NOx و CO ۵/۶ درصد یافت شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش سرعت موتور و افزایش درصد سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل خالص برای بیودیزل مخلوط B10، گشتاور موتور به میزان ۴/۴ درصد افزایش و مصرف سوخت ویژه به میزان ۴/۴۵ درصد کاهش یافت. از طرفی در مقایسه با سوخت دیزل، آلاینده NOx، ۱/۸ درصد افزایش و آلاینده CO، ۳۷/۶۷ درصد کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان داد که سوخت B10 عملکرد بهتری را ارائه می‌دهد و نیز میزان آلاینده‌گی موتور را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. همچنین فرایند شبیه‌سازی به دلیل کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت محاسبات می‌تواند نسبت به روش‌های آزمایشگاهی هزینه تحقیق را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: روغن پسماند آشپزخانه، مدل ترمودینامیکی، نرم‌افزار GT-Power، ویژگی‌های موتور

مقدمه

داشته و انرژی گرمایی آن‌ها تقریباً ۱۰ درصد کمتر از سوخت دیزل معمولی می‌باشد (Al-Dawody, 2017).

موتورهای احتراق تراکمی به دلیل بازده بالاتر نسبت به موتورهای احتراق جرقه‌ای، بیشترین استفاده را در وسایل حمل و نقل سنگین دارند. معمولاً آزمایش‌های تجربی مبنای بهینه‌سازی طراحی موتورهای احتراق داخلی در ارتباط با انواع سوخت‌های جایگزین از جمله بیودیزل را تشکیل می‌دهد که با صرف هزینه‌های بالا به انجام می‌رسد (Menacer & Bouchetara, 2014).

توانایی شبیه‌سازی فرآیند تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی گرمایی، کاربران نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی را در طراحی، تحلیل و بهینه‌سازی ابزارهای با تکنولوژی بالا یاری می‌رساند. همچنین شبیه‌سازی باعث کاهش پارامترهایی نظیر هزینه، نیروی کار، وقت و فضای مورد نیاز می‌شود. شبیه‌سازی موتور به‌صورت مدل‌های صفر بعدی^۳، شبه‌بعدی^۴، چند منطقه‌ای^۵ و چندبعدی^۶ تقسیم بندی می‌شوند. مدل صفر بعدی توانایی پیش‌بینی

فرایند صنعتی شدن، ذخایر محدود سوخت‌های فسیلی همزمان با نیاز روزافزون انرژی و افزایش آلودگی محیط‌زیست جستجو برای یافتن جایگزین سوخت‌های دیزل معمولی را ضروری ساخته است. گزارش شده است می‌توان از روغن‌های گیاهی به‌عنوان سوخت‌های جایگزین استفاده نمود (Al-Dawody, Jazie, & Abdulkadhim, 2019).

بررسی‌های انجام شده در منابع مختلف نشان می‌دهد که تلاش چندان برای استفاده از بیودیزل حاصل از منابع غیرخوراکی جهت جایگزینی سوخت دیزلی صورت نگرفته است. روغن‌های پسماند آشپزخانه به دلیل ارزان تر بودن نسبت به روغن‌های گیاهی و کاهش قابل توجه در قیمت بیودیزل تولیدی، می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت دیزل باشد. چنین روغن‌هایی خاصیت سوخت قابل قبولی

۱- دانشجویان گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: mousavi22@sanru.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69149.1023>

3- Zero dimensional
4- Quasi dimensional
5- Multi zone
6- Multi dimensional

سوخت بهینه جهت بهترین عملکرد و آلایندگی موتور دیزل تک‌سیلندر انتخاب شد (Miri, Mousavi Seyedi, & Ghobadian, 2017).

در تحقیقی دیگر ویژگی‌های احتراق و آلایندگی موتور دیزل با استفاده از مخلوط دیزل و بیودیزل روغن کلزا با نسبت‌های حجمی ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد بیودیزل نسبت به سوخت دیزل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سوخت بیودیزل نسبت به دیزل، آلایندة دود در مخلوط‌های B10، B20، B50 و B100 به‌ترتیب ۴۷/۲۴ درصد، ۸۱/۰۶ درصد، ۸۲/۵۶ درصد و ۹۳/۳۶ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش درصد بیودیزل در مخلوط نسبت به دیزل، آلایندة NOx افزایش و آلایندة CO کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی نیز نشان داد که مخلوط با ۱۰ درصد بیودیزل روغن کلزا مناسب‌ترین مخلوط جهت عملکرد بهتر و کاهش آلایندگی می‌باشد (Al-Dawody, 2017).

تأثیر مخلوط‌های مختلف متیل استر روغن پسماند آشپزخانه و دیزل با نسبت‌های حجمی ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ درصد متیل استر روغن پسماند بر عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزل تک سیلندر از لحاظ آزمایشگاهی و نظری با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی AVL Fire سرعت ثابت و تحت بارهای مختلف توسط محققانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و توافق بسیار خوبی بین آن‌ها وجود داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش درصد متیل استر روغن پسماند در مخلوط، ماکزیمم فشار به دلیل کاهش ارزش حرارتی مخلوط نسبت به دیزل خالص کاهش یافت. از طرفی دیگر، با افزایش درصد متیل استر روغن پسماند در مخلوط، آلایندة NOx کاهش چشمگیری نسبت به دیزل خالص داشت. در نهایت مخلوط حاوی ۲۰ درصد حجمی متیل استر روغن پسماند آشپزخانه (B20) به‌عنوان بهترین سوخت معرفی شد. همچنین نتایج نشان داد نسبت‌های بیشتر از ۲۰ درصد بیودیزل باعث کاهش قابل توجهی در عملکرد موتور می‌شوند (Al-Dawody et al., 2019).

در تحقیقی دیگر ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل شش سیلندر با استفاده از مخلوط بیودیزل و دیزل با نسبت‌های حجمی ۲۰، ۴۰ و ۱۰۰ درصد بیودیزل سویا از لحاظ آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی Diesel-RK در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر میزان خطا ۶ درصد برای داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در گشتاور موتور وجود دارد. از طرفی نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش بیودیزل مخلوط نسبت به دیزل خالص، توان، گشتاور و آلایندة دود به‌ترتیب ۳/۴۱ درصد، ۲/۲۳ درصد و ۱۷/۶۱ درصد کاهش و مصرف سوخت ویژه ۲/۴۶ درصد افزایش یافت. با توجه به نتایج، مخلوط با نسبت حجمی ۲۰ درصد بیودیزل

پارامترهای عملکردی موتور را دارا می‌باشد، اما در پیش‌بینی دقیق آلایندة‌ها از دقت مناسبی برخوردار نمی‌باشد. اخیراً روند شبیه‌سازی موتورهای احتراق تراکمی به دلیل دقت بالاتر به سمت مدل‌های چندبعدی نسبت به مدل صفربعدی متمایل شده است. با این حال نیاز به داده‌های ورودی تجربی دقیق و توان محاسباتی قابل‌توجه برای حل مدل چندبعدی، به‌عنوان عیب و چالشی مهم می‌باشد (Nabi & Rasul, 2018).

در نتیجه با در نظر گرفتن معایب مدل‌های صفربعدی و چندبعدی، از نرم‌افزار GT-Power بر پایه مدل یک‌بعدی برای شبیه‌سازی موتور دیزل در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. GT-Power یکی از ساده‌ترین ابزارها برای پیش‌بینی ویژگی‌های احتراق، عملکرد و آلایندگی موتور می‌باشند. همچنین برای تجزیه و تحلیل و رسم داده‌های مختلف نیز می‌توان از نرم‌افزار پسپردازش استفاده نمود (Nabi & Rasul, 2019).

تحقیقات مختلفی در زمینه بررسی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور با استفاده از مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل به‌صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی انجام شده است.

در تحقیقی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی سوخت بیودیزل برگ سبز بومی استرالیا با شرایط ۵ و ۱۰ درصد حجمی و دیزل خالص روی یک موتور دیزل چهار سیلندر در سرعت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی AVL Fire مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. در نتیجه توافق بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی با تغییرات ۴/۴ درصد پیدا شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در شرایط عملیاتی استاندارد، آلایندة‌های موتور در مخلوط B10 کاهش قابل توجهی به میزان ۱۸ درصد نسبت به سوخت دیزل داشت. همچنین بهینه‌سازی مدل از طریق تنظیم زمان تزریق و میزان فشرده‌سازی نشان داد که مخلوط B10 عملکرد بهتری در مقایسه با سوخت دیزل و B5 داشته است (Hasan, Rahman, & Kadirgama, 2015).

ویژگی‌های عملکرد و آلایندة‌های خروجی یک موتور دیزل تک سیلندر هوا خنک در سرعت‌های rpm ۱۸۰۰ تا rpm ۳۰۰۰ با گام rpm ۴۰۰ تحت بارهای ۷۵ و ۱۰۰ درصد با استفاده از مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل روغن کلزا با نسبت‌های حجمی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد بیودیزل توسط محققانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سوخت B10 در سرعت rpm ۱۸۰۰، دارای بیشترین میزان گشتاور و کمترین میزان مصرف سوخت ویژه بود. همچنین در شرایط rpm ۷۵ درصد بار بیشینه، سوخت B20 در سرعت rpm ۱۸۰۰، دارای بیشترین میزان آلایندة NOx و CO و سوخت B10 در سرعت rpm ۳۰۰۰، دارای کمترین میزان آلایندة NOx و CO بود. از طرفی با افزایش بار موتور، میزان توان، گشتاور و آلایندگی افزایش اما مصرف سوخت ویژه کاهش یافت. در نهایت سوخت B10 به‌عنوان

مشترک با سایر مقالات که در زمینه بیودیزل می‌باشند این است که به علت ذخایر محدود، محققین به دنبال سوخت‌های جایگزین می‌گردند.

هدف اصلی مقاله، مدل‌سازی و مقایسه ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل با نتایج آزمایشگاهی مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل و دستیابی به مخلوط بهینه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا پسماند حاصل از روغن‌های استفاده شده در رستوران‌های مختلف جمع‌آوری شد. سپس سوخت بیودیزل در آزمایشگاه گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده مهندسی زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با استفاده از این روغن‌ها و به روش ترانس‌استریفیکاسیون تولید شد. در روش ترانس‌استریفیکاسیون روغن استری شده با مخلوطی شامل متانول با مولاریته ۱ به ۱۲ نسبت به روغن و واکنشگر پتاسیم هیدروکسید به مقدار ۱ درصد وزنی روغن، در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد با سرعت به‌هم‌زنی ۶۵۰ دور بر دقیقه به مدت ۹۰ دقیقه با استفاده از همزن مغناطیسی واکنش داده شد که باعث تولید اسید چرب و صابون می‌گردد. در نتیجه با انجام مراحل جداسازی و آبشویی، فرمولاسیون سوخت بیودیزل مورد مطالعه به‌صورت C55H105O6 به‌دست آمد. برخی از خصوصیات سوخت‌های مورد استفاده در آزمایش بر اساس استاندارد ASTM در جدول ۱ نشان داده شده است.

پس از اطمینان از ویژگی‌های کیفی سوخت دیزل و بیودیزل تولیدی، مخلوط‌های حجمی سوخت دیزل و بیودیزل با ترکیب‌های B0، B5، B10 و B10 بیان‌گر مخلوط با ۱۰ درصد بیودیزل و ۹۰ درصد دیزل تهیه شد. دلیل انتخاب محدوده ۰ تا ۱۰ درصد بیودیزل، شرایط ویژه موتور آزمایش می‌باشد. آزمون‌های موتور در سرعت‌های ۱۱۰۰ rpm تا ۱۴۰۰ rpm با گام ۱۰۰ rpm تحت بار ۱۰۰ درصد انجام شد. لازم به ذکر است که از هر نمونه سوخت به اندازه ۴ لیتر انتخاب شد تا آزمایش‌ها با دقت کافی و در سه تکرار انجام شود. پس از آماده‌سازی مخلوط‌ها، موتور و وسایل اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور برای شروع داده‌برداری در وضعیت مناسب قرار گرفتند. طرحواره شماتیکی آزمون موتور در شکل ۱ ارائه شده است.

برای اندازه‌گیری گشتاور موتور از دینامومتر آبی و جهت اندازه‌گیری آلایندگی‌های خروجی آگروز از دستگاه آلایندگی سنج HG-550 ساخت کشور کره جنوبی موجود در آزمایشگاه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر استفاده شد. پس از گرم شدن موتور و رسیدن دمای روغن آن به ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت موتور در مقادیر مورد نظر تنظیم و در آن سرعت پایدار شد. سپس داده‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری پارامترهای

به‌عنوان سوخت بهینه از لحاظ عملکرد و آلایندگی انتخاب شد (Haji Heydari & Hatefi Asl, 2019).

در تحقیقی دیگر نیز ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل با نسبت تراکم متغیر و با شرایط سوخت دیزل خالص، بیودیزل خالص کلزا، بیودیزل خالص ماهوار^۱ و مخلوط بیودیزل کلزا و ماهوار^۲ (RM) با ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد حجمی در سرعت ثابت ۱۵۰۰ rpm و بارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که مخلوط RM20 (۲۰ درصد بیودیزل کلزا و ماهوار) بهترین عملکرد را داشته و نزدیک به سوخت دیزل بود. علاوه بر این، راندمان حرارتی ترمزی این مخلوط ۲/۷۹ درصد کمتر از سوخت دیزل بود. در شرایط بار کامل، میزان آلایندگی‌های CO، HC و دوده با استفاده از سوخت RM20 به‌ترتیب به میزان ۲۰/۶۶، ۸/۵۶ و ۶/۹ درصد کمتر از سوخت دیزل بود. همچنین نتایج آلایندگی NOx بیان‌گر افزایش ۳/۷۷ درصدی برای سوخت RM20 نسبت به سوخت دیزل بیان شد. نتایج این مطالعه تأیید کرد که می‌توان از ترکیب RM20 به‌عنوان سوخت جایگزین برای موتورهای دیزلی بدون هیچ گونه تغییری در موتور استفاده کرد (Saravanana, Muruganb, Sreenivasa Reddy, & Satyajeet, 2020).

در تحقیقی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی ۵ نوع سوخت شامل متانول، اتانول، مخلوط دیزل و اتانول، بیودیزل و دکان بر موتور دیزل توربوشارژر در نسبت تراکم‌های ۱۵:۱ تا ۱۹:۱ با استفاده از نرم‌افزار GT-Power مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که توافق خوبی در حدود ۶/۱۲ درصد خطا بین داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی گشتاور و توان موتور وجود دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش نسبت تراکم، سوخت دکان نسبت به سوخت دیزل دارای توان و گشتاور بالاتری در حدود ۳/۸۶ درصد و مصرف سوخت ویژه کمتری در حدود ۳/۷۲ درصد می‌باشد. در مورد آلایندگی‌ها هم با کاهش نسبت تراکم نسبت به حالت مینا (دیزل خالص)، مقادیر CO و CO₂ با سوخت بیودیزل و دیزل دارای حداقل مقدار می‌باشد. همچنین کمترین میزان آلایندگی NOx با سوخت دکان حاصل شد (Ahmadipour, Aghkhani, & Zareei, 2021).

با بررسی‌های انجام شده در منابع مختلف که خلاصه‌ای از آن‌ها در مقدمه آمده است، نتیجه‌گیری می‌شود که تاکنون تحقیقی در مورد مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی تأثیر سوخت بیودیزل روغن پسماند آشپزخانه روی پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور دیزل چهار سیلندر با مخلوط سوخت بیودیزل و دیزل در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل انجام نشده است. در واقع نوع موتور و بیودیزل استفاده شده سهم تعیین‌کننده‌ای در نتایج تحقیقات داشته است، اما نقاط

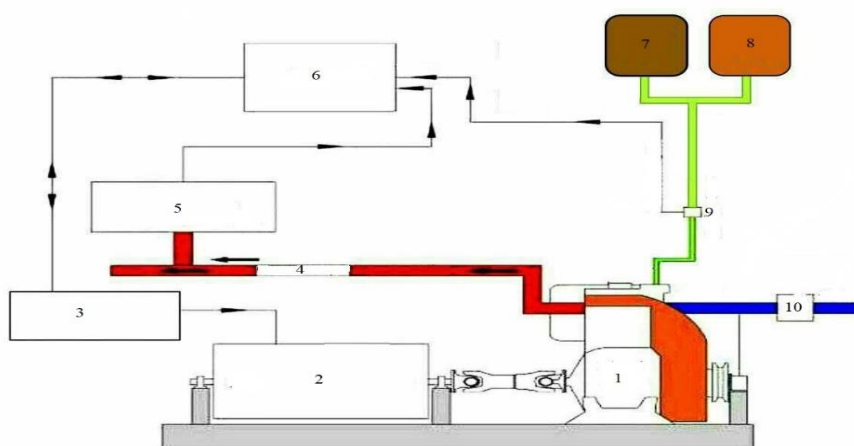
1- Mahua
2- Rapeseed and Mahua

عملکرد و آلاینده‌گی موتور در سه تکرار جمع‌آوری شد.

جدول ۱- خصوصیات سوخت دیزل و بیودیزل مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Properties of diesel and biodiesel fuels in tests

واحد	بیودیزل	بیودیزل ۱۰ درصد	بیودیزل ۵ درصد	دیزل	حدود مجاز	روش آزمون	خصوصیات
Unit	Biodiesel	B10	B5	Diesel	Allowable limit	Test method	Properties
°C	176	73.4	67.7	62	Min 130	D92	نقطه اشتعال Flash Point
°C	-1	-1.62	-1.86	-2	Min -7	D2500	نقطه ابری Cloud point
%Vol	0.05	0.05	0.05	0.05	Max 0.05	D2709	آب و رسوبات Water and sediment
mm ² .s ⁻¹	4.73	3.24	3.18	3.16	1.6 - 9	D445	گرانروی سینماتیک Kinematic viscosity
MJ.kg ⁻¹	36.8	39.94	40.12	42.8	-	D240	ارزش حرارتی Heating value
g.cm ⁻³	0.88	0.835	0.832	0.83	0.86 - 0.90	D4052	چگالی Density



شکل ۱- طرحواره شماتیکی آزمون موتور: ۱- موتور دیزل ۲- دینامومتر ۳- واحد کنترل ۴- لوله اگزوز ۵- آلاینده‌سنج ۶- واحد داده‌برداری ۷- مخزن سوخت دیزل ۸- مخزن سوخت بیودیزل ۹- دستگاه اندازه‌گیری مصرف سوخت ۱۰- ورودی هوا

Fig.1. Schematic diagram of the engine test stands: 1- Diesel engine 2- Dynamometer 3- Control unit 4- Exhaust pipe 5- Emission measurement 6- Data acquisition unit 7- Diesel fuel tank 8- Biodiesel fuel tank 9- Fuel measurement system 10- Air inlet

شبیه‌سازی

داده‌های موتور برای مدل‌سازی

ورودی‌های اولیه و روابط دینامیکی حاکم بر موتور جهت شبیه‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ابعاد هندسی موتور، مجموعه هوای ورودی، مجموعه گازهای خروجی، مقدار سوخت پاشیده شده، ویژگی سوپاپ‌ها، احتراق و برخی برآوردهای متناظر برای پارامترهای ترمودینامیکی سیلندر هنگام باز کردن دریچه ورودی و خروجی و تبادل گرمای داخل سیلندر بایستی به‌عنوان داده‌های

ورودی در نظر گرفته شود (Rahman, Mohammed, & Bakar, 2009).

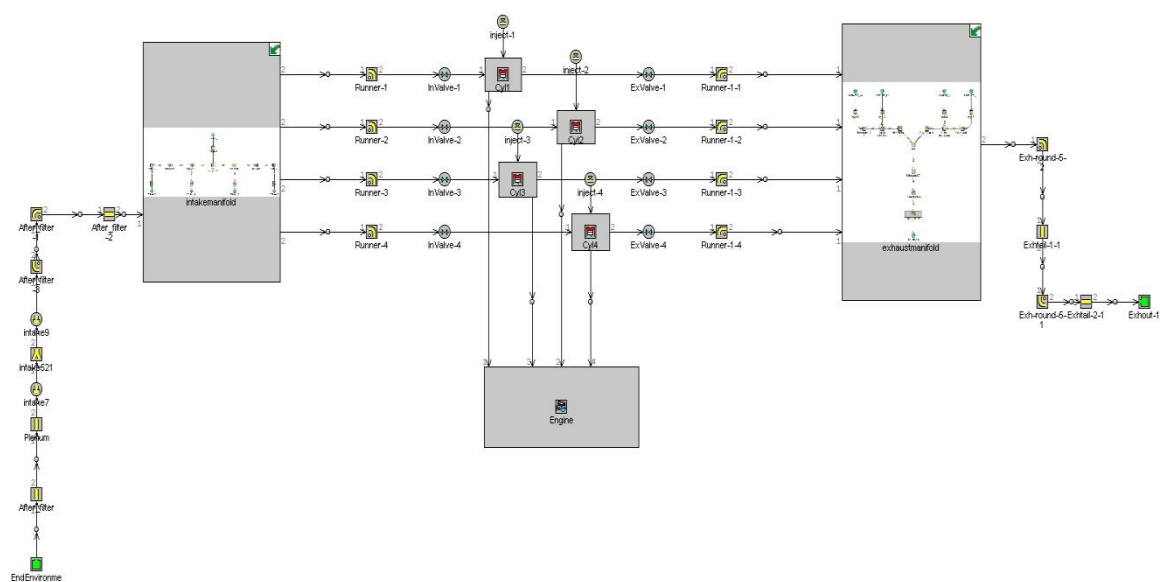
در نهایت مدل عمدتاً شامل تصفیه‌کننده هوا، سوپاپ ورودی، سوپاپ خروجی، پورت ورودی و خروجی، نازل تزریق، سیلندر و خود موتور می‌باشد. پورت‌های ورودی و خروجی سیلندر موتور به‌صورت هندسی با لوله‌ها مدل‌سازی شدند.

موتور مورد استفاده در این آزمایش از نوع موتور چهار زمانه چهار سیلندر تزریق مستقیم پرکینز (Perkins 4-108v) واقع در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر

انتخاب شد. مشخصات و مدل شبیه‌سازی موتور چهار سیلندر بیان شده در تمامی کورس‌های موتور همراه با سیستم ورودی هوا و خروجی اکزوز با استفاده از نرم‌افزار GT-Power به‌ترتیب در جدول ۲ و شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات فنی موتور دیزل
Table 2- Technical specifications of diesel engine

مشخصات Specifications	مقدار Value	واحد Unit
تعداد سیلندر Cylinders No.	4	-
قطر پیستون Bore	88.9	mm
کورس پیستون Stroke	79.5	mm
حجم موتور Displacement	1.8	Lit
نسبت تراکم Compression ratio	22:1	-
زمان باز شدن سوپاپ ورودی Inlet valve opening time	24° BTDC	°CA
زمان بسته شدن سوپاپ ورودی Inlet valve closing time	37° BTDC	°CA
زمان باز شدن سوپاپ خروجی Exhaust valve opening time	94° BTDC	°CA
زمان بسته شدن سوپاپ خروجی Exhaust valve closing time	4° BTDC	°CA
حداکثر توان در ۴۰۰۰ دور بر دقیقه Max Power @ 4000 rpm	32	kW
حداکثر گشتاور در ۲۲۰۰ دور بر دقیقه Max Torque @ 2200 rpm	105	m.N



شکل ۲- مدل شبیه‌سازی موتور دیزل چهار سیلندر تزریق مستقیم
Fig.2. Simulation model of four-cylinder, direct-injection, diesel engine

معادلات حاکم

برای مدل‌سازی جریان از معادلات ممتوم، انرژی و پیوستگی برای حل مدل یک‌بعدی استفاده شد. سیستم کامل به تعدادی حجم در مدل گسسته‌سازی شد. هر حجم نشان‌دهنده تقسیم جریان می‌باشد و هر لوله به حجم‌های تکی یا چندتایی تقسیم شد. حجم‌ها توسط مرزها به هم متصل شد. معادله پیوستگی، انرژی و ممتوم به‌ترتیب در روابط (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده‌اند (Nabi et al., 2019).

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{boundaries} \dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{d(me)}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum_{boundaries} (\dot{m}H) - hA_s(T_{fluid} - T_{wall}) \quad (2)$$

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = dpA + \sum_{boundaries} (\dot{m}u) - 4C_f \frac{\rho u |u| dx}{2D} K_p \left(\frac{1}{2} \rho u |u| \right) A \quad (3)$$

که در آن $\dot{m}$ شار جرمی مرز به حجم (kg.s^{-1}) ، m جرم حجمی (kg) ، p فشار (Pa) ، e انرژی درونی ویژه کل (J) ، H آنتالپی ویژه کل (J) ، h ضریب انتقال حرارت $(\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$ ، K_p ضریب افت فشار (Pa) ، D قطر معادل (m) ، dx طول المان جرم در راستای جریان (m) ، d_p دیفرانسیل فشار نسبت به dx (Pa.m^{-1}) ، T_{fluid} دمای سیال (K) ، T_{wall} دمای دیواره (K) ، V حجم (m^3) ، ρ چگالی (kg.m^{-3}) ، A مساحت سطح مقطع (m^2) ، u سرعت مرزی (m.s^{-1}) و C_f ضریب اصطکاک فانیگ می‌باشند.

نرخ سوخت دریافتی از انژکتور را می‌توان به کمک رابطه (۴) محاسبه کرد (Nabi, Rasul, & Gudimetla, 2019).

$$\dot{m}_{Delivery} = \eta_V \rho_{ref} N_{rpm} V_d \left(\frac{F}{A} \right) \frac{6}{(CYL)(Pulse Width)} \quad (4)$$

که در آن $\dot{m}_{Delivery}$ نرخ سوخت دریافتی از انژکتور (kg.s^{-1}) ، N_{rpm} سرعت موتور (m.s^{-1}) ، V_d حجم جابه‌جایی (m^3) ، $\frac{F}{A}$ نسبت سوخت به هوا، CYL تعداد سیلندرها، عرض پالس (m) ، η_V بازده حجمی $(\%)$ و ρ_{ref} چگالی مرجع (kg.m^{-3}) می‌باشند.

برای مدل‌سازی انتقال حرارت در داخل موتور، از مدل تجربی وشنی^۱ استفاده شد. در این مدل فرض بر این است که انتقال حرارت تنها از طریق دیواره‌های محفظه احتراق و به‌صورت جابه‌جایی صورت می‌گیرد. شار حرارتی در این مدل به کمک رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Nabi et al., 2019).

$$Q = hA(T_g - T_w) \quad (5)$$

که در آن Q شار حرارتی (J) ، h ضریب انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی گازهای مجاور دیواره $(\text{J.m}^{-2}.\text{C}^{-1})$ ، T_g دمای گازهای داخل اتاق احتراق (C) ، T_w دمای دیواره‌ها (C) و A مساحت تماس

بین گازها و اتاق احتراق (m^2) می‌باشند.

برای پیش‌بینی نرخ سوختن احتراق نسبت به زاویه لنگ از تابع ویب - دیزل پاشش مستقیم مطابق با رابطه (۶) استفاده شد (Nabi et al., 2019).

$$combustion(\theta) = (CE) \left[1 - e^{-(WC)(\theta - SOC)^{(E+1)}} \right] \quad (6)$$

که در آن CE کسر سوخت سوزانده شده (g) ، WC ثابت ویب، SOC شروع احتراق (درجه میل‌لنگ) و θ زاویه لنگ لحظه‌ای $(^\circ)$ می‌باشد.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل

در این بخش، نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده از آزمون عملکرد و آلایندگی موتور در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی جهت اعتباربخشی مدل توسعه‌یافته مورد استفاده قرار گرفت. بدین صورت که نتیجه آزمایشگاهی گشتاور برای اهداف اعتبارسنجی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده و حداکثر میزان خطا به کمک رابطه (۷) محاسبه شد (Ahmadipour et al., 2021).

$$\text{خطا} = \frac{\text{مقدار تجربی} - \text{مقدار شبیه‌سازی}}{\text{مقدار تجربی}} \times 100 \quad (7)$$

شکل ۳ داده‌های آزمایشگاهی گشتاور سوخت دیزل را نسبت به سرعت موتور برای اعتبارسنجی با داده‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۳ و رابطه (۷) می‌توان دریافت که درصد خطا بین داده‌ها در حداقل و حداکثر سرعت موتور به‌ترتیب برابر ۳/۳۳ درصد و ۵/۷۴ درصد می‌باشد. در نتیجه توافق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که برای اعتبارسنجی مدل قابل قبول می‌باشد.

ارزیابی نتایج عملکردی موتور

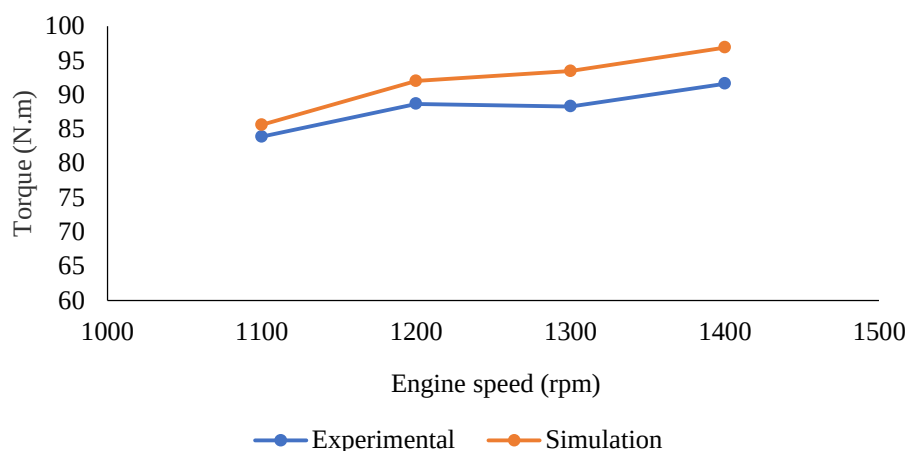
گشتاور موتور

در شکل ۴، تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تحت بار کامل مقایسه شده است.

با توجه به شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که برای همه سوخت‌های آزمایش، گشتاور در سرعت ۱۴۰۰ rpm به مقدار مطلوب خود می‌رسد. (برای همه سوخت‌های آزمایش، با افزایش سرعت موتور مقدار گشتاور افزایش می‌یابد). در این سرعت بیشترین مقدار گشتاور

۱۱۰۰ rpm و برای سوخت B0 می‌باشد.

موتور به میزان ۹۷/۷۵ N.m و برای مخلوط سوخت B10 مشاهده شد. همچنین کمترین مقدار گشتاور به میزان ۸۳/۸۸ N.m در سرعت



شکل ۳- مقایسه داده تجربی و شبیه‌سازی گشتاور موتور برای سوخت دیزل بر حسب سرعت موتور

Fig.3. Comparison of experimental and simulations data engine torque for diesel fuel According to engine speed

۱۴۰۰ و ۱۱۰۰ rpm مشاهده شد.

به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد حداکثر میزان خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور موتور برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به ترتیب ۵/۷ درصد، ۵/۳ درصد و ۶/۳ درصد می‌باشد. همچنین حداقل میزان این خطا برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به ترتیب برابر ۲/۱ درصد، ۳/۴ درصد و ۳/۳ درصد می‌باشد.

مصرف سوخت ویژه موتور

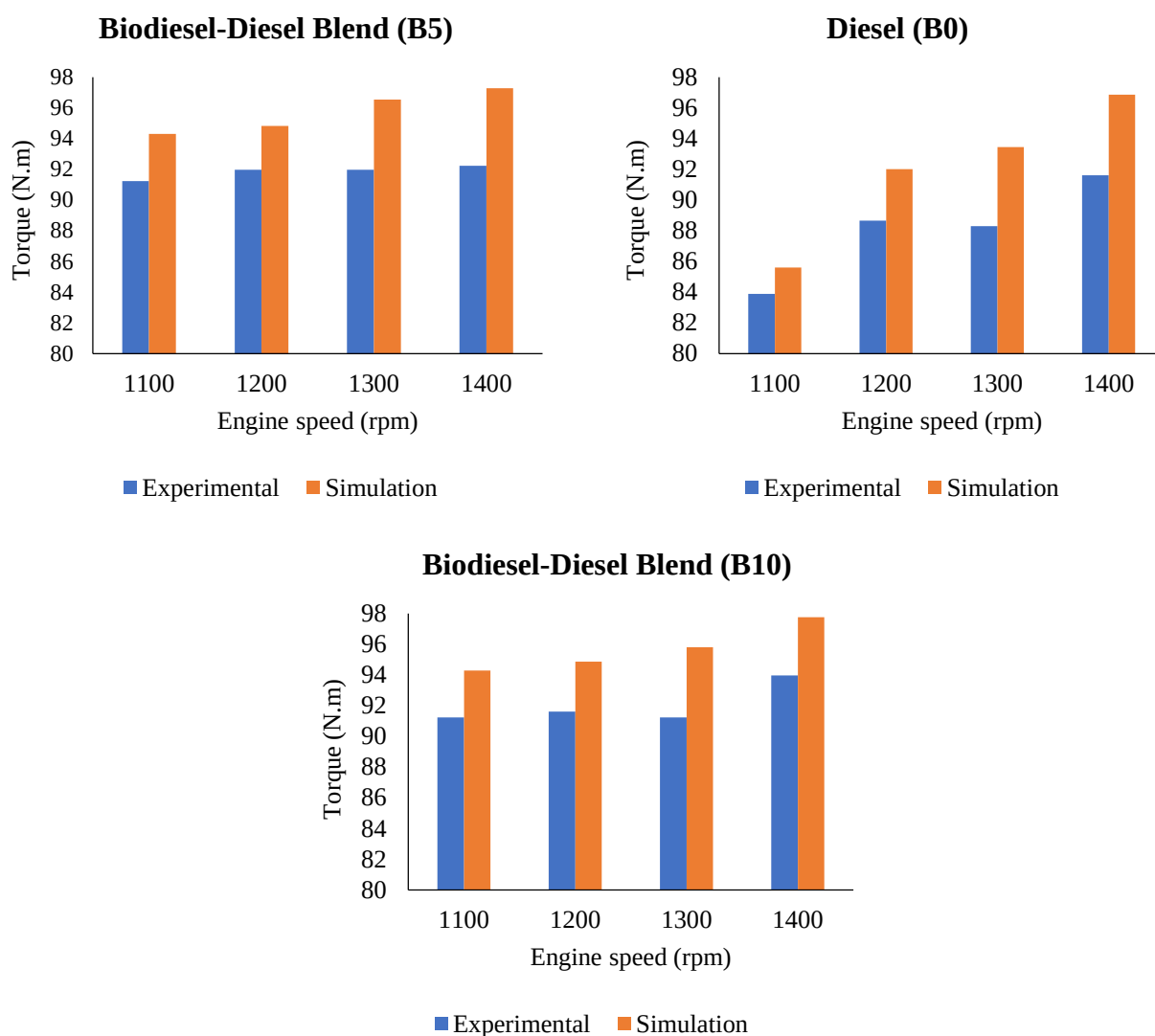
مصرف سوخت ویژه معیاری برای راندمان سوخت هر محرک اصلی است که سوخت را می‌سوزاند و تولید توان می‌کند. به طور معمول مصرف سوخت ویژه برای مقایسه راندمان موتورهای احتراق داخلی نسبت به خروجی میل‌لنگ استفاده می‌شود (Kinnal, Sujaykumar, D'costa, & Girishkumar, 2018).

در شکل ۵، تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تحت بار کامل مقایسه شده است.

در همه سرعت‌های آزمایش، گشتاور موتور برای مخلوط‌های بیودیزل و دیزل نسبت به دیزل خالص به دلیل اکسیژن موجود در سوخت بیودیزل و بهبود احتراق افزایش یافت که این افزایش بیشتر در سرعت پایین موتور (۱۱۰۰ rpm) می‌باشد (Bavafa, Tabasizadeh, Farzad, Ghobadian, & Eshghi, 2016). میانگین این افزایش در نمونه‌های سوخت B5 و B10 به ترتیب ۴/۱۱ درصد و ۴/۴۵ درصد نسبت به سوخت دیزل به دلیل اکسیژن سوخت بیودیزل می‌باشد (Bavafa et al., 2016). محققان دیگری افزایش گشتاور در اثر افزایش سرعت موتور و افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل را نیز گزارش نموده‌اند (Iliev & Hadjiev, 2012; Nabi & Rasul, 2019; Bavafa et al., 2016).

برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل میزان خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور موتور به ترتیب در سرعت‌های ۱۴۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm می‌باشد. دلیل حداکثر میزان خطا در سرعت‌های بالای موتور می‌تواند به دلیل استهلاک موتور باشد (Haji Heydari & Hatefi Asl, 2019).

برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور به ترتیب در سرعت‌های rpm

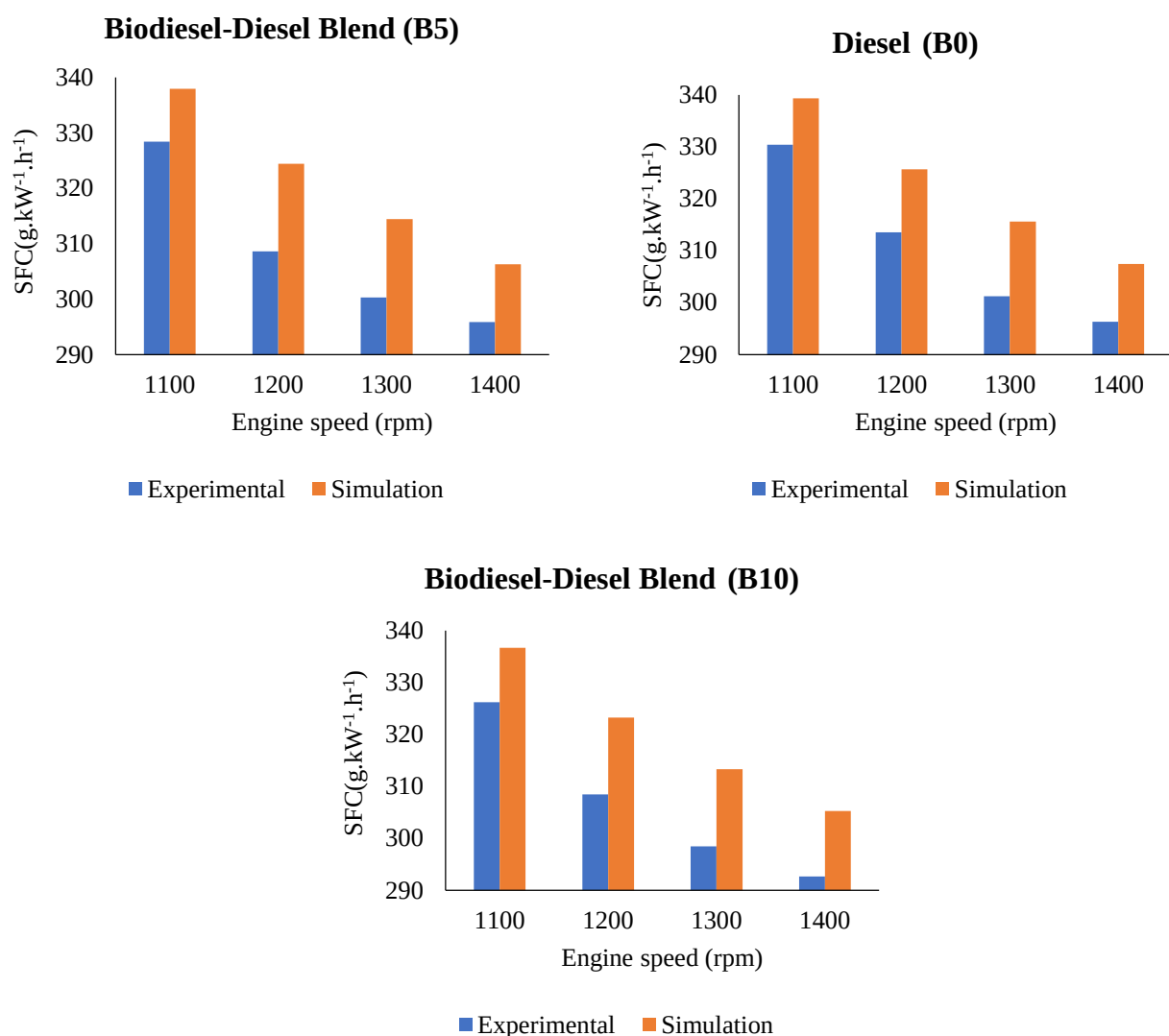


شکل ۴- تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل
Fig.4. Experimental and simulations torque variations versus engine speed for biodiesel- diesel fuel blends

سوخت بیودیزل می‌تواند در کاهش مصرف سوخت ویژه موتور موثر باشد (Armas, Yehliu, & Boehman, 2010; Nguyen, Dan, & Asano, 2015). میزان مصرف سوخت ویژه در سرعت ۱۴۰۰ rpm برای مخلوط‌های B5 و B10 به ترتیب ۴/۱۱ درصد و ۴/۴۵ درصد نسبت به سوخت دیزل کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از برخی مطالعات نیز به نتیجه حاصل از مطالعه حاضر نزدیک می‌باشد (Metin, Atilla, Ozer, & FatihSahin, 2010; Ravikumar, Sujaykumar, Divakar, & Basavaraj, 2017; Khoobbakht, 2019). برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه به ترتیب در سرعت‌های ۱۳۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm می‌باشد.

با توجه به شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که برای همه سوخت‌های آزمایش، با افزایش سرعت موتور مصرف سوخت ویژه موتور به دلیل افزایش بازده حجمی و کاهش تلفات حرارتی کاهش می‌یابد (Sen, 2019). در سرعت ۱۴۰۰ rpm، کمترین مقدار مصرف سوخت ویژه به میزان $30.5/25 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ و برای مخلوط سوخت B10 مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار مصرف سوخت ویژه به میزان $33.9/33 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ در سرعت ۱۱۰۰ rpm و برای سوخت B0 می‌باشد.

در همه سرعت‌های آزمایش، با افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به دیزل خالص مصرف سوخت ویژه موتور کاهش می‌یابد. افزایش گشتاور و توان موتور به دلیل اکسیژن موجود در



شکل ۵- تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل
Fig.5. Experimental and simulations specific fuel consumption variations versus engine speed for biodiesel -diesel fuel blends

گردد، نیتروژن مونوکسید (NO) می‌باشد. این ترکیب می‌تواند در هنگام خروج از اگزوز به نیتروژن دی‌اکسید (NO₂) تبدیل شود. با این حال، با کاهش مداوم دمای احتراق در محفظه احتراق، NO₂ شروع به تجزیه به NO و O₂ می‌نماید. در نتیجه، آلاینده NO_x عمدتاً به صورت NO و NO₂ آزاد می‌گردد که سمی‌تر از NO می‌باشد (Noorollahi, Azadbakht, & Ghobadian, 2018).

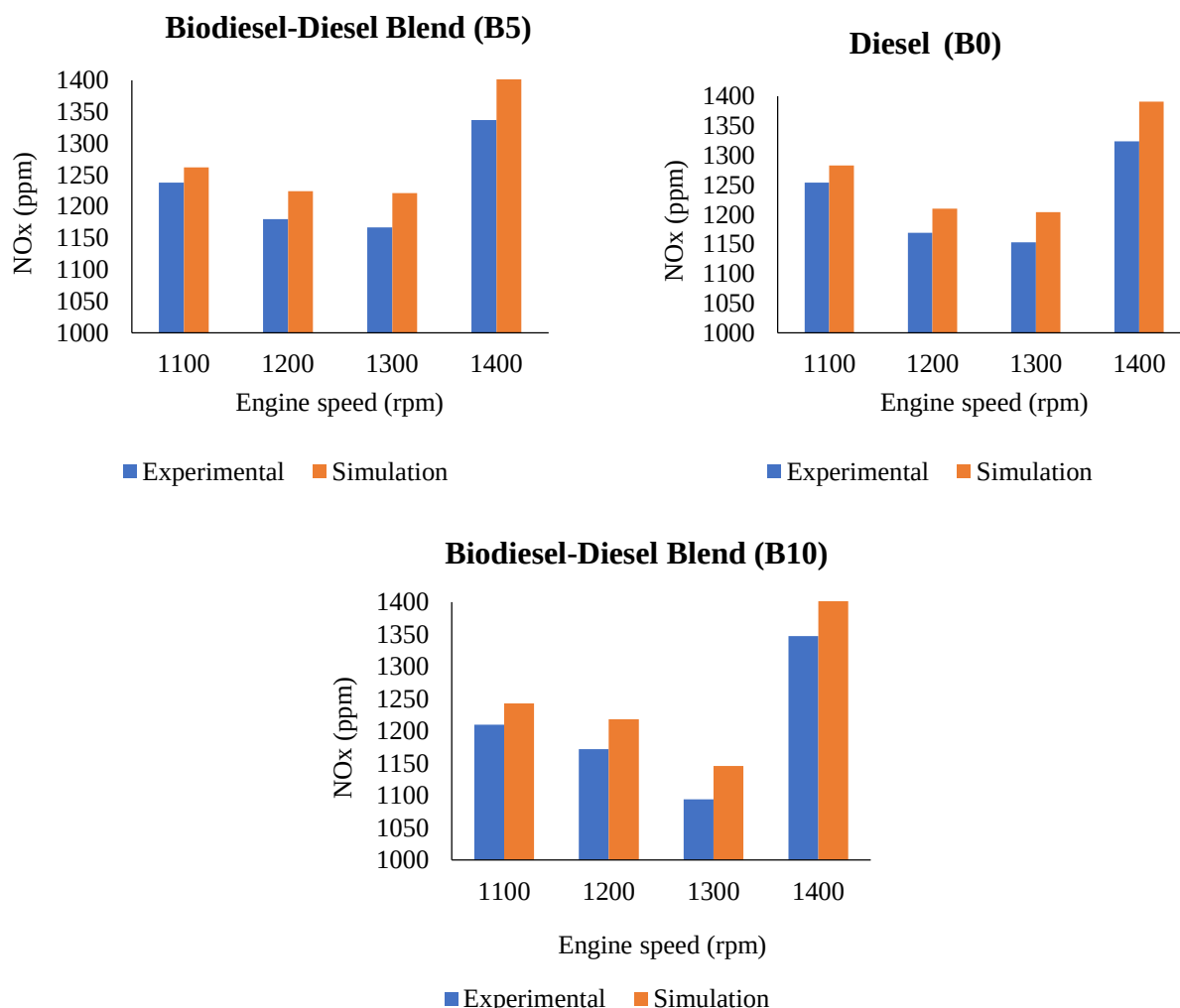
در شکل ۶، تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده NO_x نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تحت بار کامل مقایسه شده است.

در نتیجه با توجه به نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه موتور برای سوخت دیزل خالص (B0)، حداکثر میزان خطا برابر با ۴/۸ درصد و حداقل میزان خطا برابر با ۲/۹ درصد می‌باشد. همچنین برای مخلوط‌های B5 و B10، حداکثر میزان خطا برابر با ۴/۳۴ درصد و ۴/۵ درصد و حداقل میزان خطا برابر با ۲/۷ درصد و ۳/۲ درصد می‌باشد.

ارزیابی نتایج آلاینده‌ی موتور

آلاینده اکسید نیتروژن

تنها نیتروژن اکسیدی که می‌تواند در دمای احتراق موتور تشکیل



شکل ۶- تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلایندۀ NOx نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل
Fig.6. Experimental and simulations NOx emission variations versus engine speed for biodiesel -diesel fuel blends

کاهش می‌یابد (Aydin & Bayindir, 2010; Tan, Zhi-yuan, Di-ming, & Zhi-jun, 2012).

در حداکثر سرعت موتور، با افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل، آلایندۀ NOx ۱/۸ درصد افزایش می‌یابد. حضور اکسیژن در ساختار سوخت در شرایط دمای بالای احتراق نقش قابل‌توجهی در تشکیل آلایندۀ NOx دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اکسیژن مخلوط بیودیزل و دیزل نسبت به دیزل خالص سبب افزایش ناچیز این آلایندۀ می‌شود (Fu et al., 2017).

از طرفی دیگر در حداقل سرعت موتور، مقدار آلایندۀ NOx با افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل ۳/۱۱ درصد کاهش یافت. احتمالاً کاهش اکسیژن در محفظه احتراق به دلیل کاهش راندمان حجمی موتور و کاهش ارزش حرارتی

با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که برای همه سوخت‌های آزمایش، آلایندۀ NOx در سرعت ۱۳۰۰ rpm به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین در سرعت ۱۳۰۰ rpm کمترین مقدار آلایندۀ NOx به میزان ۱۰۹۴/۲۴ ppm برای مخلوط سوخت B10 حاصل شد.

برای همه سوخت‌های آزمایش، با افزایش سرعت موتور از ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ rpm مقدار آلایندۀ NOx کاهش و سپس افزایش می‌یابد. دلیل افزایش آلایندۀ NOx در سرعت ۱۴۰۰ rpm را احتمالاً می‌توان به افزایش دما و فشار محفظه احتراق به دلیل افزایش راندمان حجمی موتور نسبت داد. نتیجه بالا رفتن فشار حداکثر باعث افزایش آلایندۀ NOx می‌شود. در سرعت‌های پایین موتور به دلیل کاهش راندمان حجمی موتور و در نهایت کاهش دمای محفظه احتراق آلایندۀ NOx

(B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب برابر ۱/۹ درصد، ۲/۷ درصد و ۲/۳ درصد می‌باشد.

آلاینده مونوکسید کربن

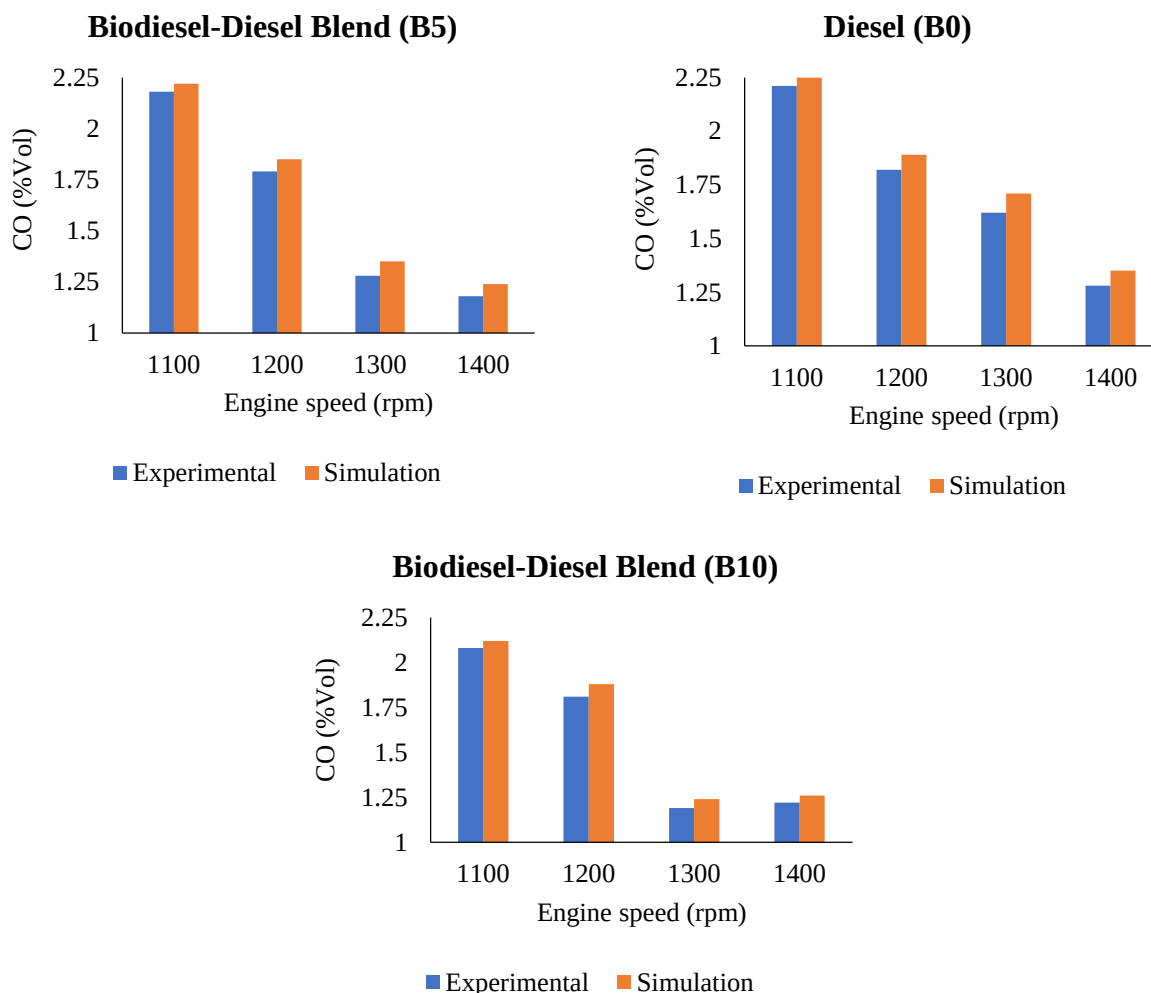
آلاینده مونوکسید کربن (CO) یک گاز بی‌رنگ و بدون بو است که حتی غلظت بسیار کم آن برای انسان و حیوانات خطرناک است. وقتی مقدار کمی اکسیژن در فرآیند سوزاندن مواد آلی وجود داشته باشد، CO تولید می‌شود. در شرایط احتراق اکسیژن موجود در ساختار مولکولی سوخت بیودیزل باعث کاهش قابل‌توجهی در آلاینده CO می‌شود (Hasan et al., 2015).

در شکل ۷، تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده CO موتور نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تحت بار کامل مقایسه شده است.

مخلوط‌های بیودیزل و دیزل نسبت به دیزل خالص سبب کاهش آلاینده NOx شده است (Osman Emiroğlu, Keskinb, & Şenb, 2018). نتایج این مطالعه با نتایج به‌دست آمده از تحقیقات محققان دیگر مطابقت داشت (Nguyen et al., 2015; Vallinayagam et al., 2014).

برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده NOx موتور به‌ترتیب در سرعت‌های ۱۴۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm می‌باشد. دلیل حداکثر میزان خطا در سرعت‌های بالای موتور نیز می‌تواند به دلیل استهلاک موتور باشد (Haji Heydari & Hatefi Asl, 2019).

در نتیجه حداکثر میزان خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده NOx موتور برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب ۵/۱ درصد، ۵/۶ درصد و ۵/۵ درصد می‌باشد. همچنین حداقل میزان این خطا برای سوخت دیزل خالص



شکل ۷- تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده CO نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل

Fig.7. Experimental and simulations CO emission variations versus engine speed for biodiesel -diesel fuel blends

مختلف سوخت جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی اعتبارسنجی شد. نتایج اصلی این مطالعه عبارتند از:

۱- اعتبارسنجی موتور نشان می‌دهد که بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در تمام سرعت‌های موتور به‌خصوص برای حداقل گشتاور مربوطه توافق خوبی وجود دارد.

۲- با افزایش سرعت موتور مقدار گشتاور افزایش یافته و با افزایش درصد سوخت بیودیزل در مخلوط نسبت به سوخت دیزل خالص، مقدار گشتاور موتور به دلیل بهبود احتراق افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش سرعت موتور، مصرف سوخت ویژه کاهش یافته و با افزایش درصد سوخت بیودیزل در مخلوط نسبت به سوخت دیزل خالص، مقدار مصرف سوخت ویژه موتور به دلیل افزایش توان کاهش می‌یابد.

۴- مخلوط سوخت B10 در سرعت ۱۳۰۰ rpm مطلوب‌ترین سوخت از نظر کاهش آلاینده‌گی NOx و CO به‌ترتیب با ۴/۷۲ درصد و ۳۷/۱۱ درصد کاهش نسبت به سوخت دیزل می‌باشد.

۵- حداکثر خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور و آلاینده NOx موتور به‌ترتیب در حدود ۶/۳ و ۵/۶ درصد در سرعت ۱۴۰۰ rpm می‌باشد.

۶- حداکثر خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه و آلاینده CO موتور به‌ترتیب در حدود ۴/۸ و ۵/۶ درصد در سرعت ۱۳۰۰ rpm می‌باشد.

۷- نتایج نشان داد که مخلوط B10 به‌عنوان بهترین سوخت از نظر عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل می‌باشد و همچنین مدل توسعه‌یافته می‌تواند برای پیش‌بینی ویژگی‌های عملکرد و گازهای خروجی از موتور دیزل استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری که فرصت تصویب و انجام این طرح پژوهشی با کد طرح ۰۲-۱۳۹۹-۰۲ را فراهم نمودند، تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

با توجه به شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که برای همه سوخت‌های آزمایش، با افزایش سرعت موتور مقدار آلاینده CO کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش سرعت راندمان حجمی موتور افزایش می‌یابد. در نتیجه این افزایش، باعث بهبود احتراق و کاهش آلاینده CO می‌شود (Sen, 2019).

از طرفی دیگر در همه سرعت‌های آزمایش، با افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به دیزل خالص، میزان آلاینده CO به دلیل اکسیژن موجود در سوخت بیودیزل کاهش می‌یابد (Dubey & Gupta, 2016; Noorollahi et al., 2018). همچنین بیشترین کاهش آلاینده CO برای مخلوط‌های بیودیزل و دیزل نسبت به دیزل خالص در سرعت ۱۳۰۰ rpm مشاهده شد. میزان این کاهش برای نمونه‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب ۲۶/۶۷ درصد و ۳۷/۱۱ درصد نسبت به سوخت دیزل می‌باشد.

محققان دیگری، آلاینده CO کمتر در اثر افزایش سرعت موتور و افزایش سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل را نیز گزارش نموده‌اند (Hasan et al., 2015; Noorollahi et al., 2018).

برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده CO موتور به‌ترتیب در سرعت‌های ۱۳۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm مشاهده شد. به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد حداکثر میزان خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده CO موتور برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب ۵/۶ درصد، ۵/۵ درصد و ۴/۲ درصد می‌باشد. همچنین حداقل میزان این خطا برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب برابر ۱/۸ درصد، ۱/۹۲ درصد و ۲/۲ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

یک مدل ترمودینامیکی برای تجزیه و تحلیل گشتاور، مصرف سوخت ویژه، آلاینده‌های NOx و CO مورد توسعه قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی پارامترهای عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزل چهار سیلندر تزریق مستقیم تحت بار کامل با استفاده از مخلوط‌های

References

- Ahmadipour, S., Aghkhani, M. H., & Zareei, J. (2021). The Effect of Compression Ratio and Alternative Fuels on the Performance of Turbocharged Diesel Engine by GT-POWER Software. *Journal of Agricultural Machinery*, 11, 199-212. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAM.V11I2.71613>.
- Al-Dawody, M. F. (2017). Theoretical study for the influence of biodiesel addition on the combustion, performance, and emissions parameters of single cylinder diesel engine. *Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences*, 25(5), 57-69.
- Al-Dawody, M. F., Jazie, A., & Abdulkadhim Abbas, H. (2019). Experimental and simulation study for the effect of waste cooking oil methyl ester blended with diesel fuel on the performance and emissions of diesel engine.

- Alexandria Engineering Journal*, 58, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.05.009>.
4. Armas, O., Yehliu, K., & Boehman, A. L. (2010). Effect of alternative fuels on exhaust emissions during diesel engine operation with matched combustion phasing. *Fuel*, 89, 438-456. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.022>.
5. Aydin, H., & Bayindir, H. 2010. Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. *Renewable Energy*, 35, 588-592. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.009>.
6. Bavafa, M., Tabasizadeh, M., Farzad, A., Ghobadian, B., & Eshghi, H. (2016). Effect of poultry fat oil biodiesel on tractor engine performance. *Journal of Agricultural Machinery*, 6, 14-24. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAM.V6I1.28488>.
7. Dubey, P., & Gupta, R. (2016). Study of the performance and emission characteristics for a dual fuel powered single cylinder diesel engine. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 13, 3373-3388. <https://doi.org/10.15282/ijame.13.2.2016.7.0279>.
8. Fu, J., Shu, J., Zhou, F., Liu, J., Xu, Z., & Zeng, D. (2017). Experimental investigation on the effects of compression ratio on in-cylinder combustion process and performance improvement of liquefied methane engine. *Applied Thermal Engineering*, 113, 1208-1218. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.048>.
9. Haji Heydari, M., & Hatefi Asl, N. (2019). Simulation and numerical analysis of the effect of biodiesel fuel and low rate EG on performance and pollution in marine diesel engine. *Journal of Energy Conversion*, 6, 7-12.
10. Hasan, M. M., Rahman, M. M., & Kadirgama, K. (2015). A review on homogeneous charge compression ignition engine performance using biodiesel-diesel blend as a fuel. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 11, 2199-2211. <https://doi.org/10.15282/ijame.11.2015.3.0184>.
11. Iliev, S., & Hadjiev, K. (2012). Analysis of engine speed effect on the four- stroke gdi engine performance. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 7(4).
12. Khoobakht, G. (2019). Evaluation of the Specific Fuel Costs for Combination of Diesel Fuel- Biodiesel- Bioethanol in a Diesel Engine. *Journal of Agricultural Machinery*, 9, 358-397. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.64690>.
13. Kinnal, N., Sujaykumar, G., D'costa, S. W., & Girishkumar, G. S. (2018). Investigation on Performance of Diesel Engine by Using Waste Chicken Fat Biodiesel. *Materials Science and Engineering*, 376, 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012012>.
14. Menacer, B., & Bouchetara, M. (2014). Parametric study of the performance of a turbocharged compression ignition engine. *Simulation*, 90(12), 1375-1384. <https://doi.org/10.1177/0037549714557046>.
15. Metin, G., Atila, K., Ozer, C., & FatihSahin, C. (2010). Biodiesel production from waste chicken fat-based source and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renewable Energy*, 35, 637-643. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.011>.
16. Miri, S. M. R., Mousavi Seyedi, S. R., & Ghobadian, B. (2017). Effects of biodiesel fuel synthesized from non-edible rapeseed oil on performance and emission variables of diesel engines. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3798-3808. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.082>.
17. Nabi, M. N., & Rasul, M. G. (2019). One-Dimensional Thermodynamic Model Development for Engine Performance, Combustion and Emissions Analysis Using Diesel and Two Paraffin Fuels. *Energy Procedia*, 156, 259-265. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.139>.
18. Nabi, M. N., Rasul, M. G., & Gudimetla, P. (2019). Modelling and simulation of performance and combustion characteristics of diesel engine. *Energy Procedia*, 160, 662-669. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.219>.
19. Nguyen, K. B., Dan, T., & Asano, I. (2015). Effect of double injection on combustion, performance and emissions of Jatrophia water emulsion fueled direct-injection diesel engine. *Energy*, 80, 746-755. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.033>.
20. Noorollahi, Y., Azadbakht, M., & Ghobadian, B. (2018). The effect of different diesterol (diesel biodiesel ethanol) blends on small air-cooled diesel engine performance and its exhaust gases. *Energy*, 142, 196-200. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.024>.
21. Osman Emiroğlu, A., Keskin, A., & Şen, M. (2018). Experimental investigation of the effects of turkey rendering fat biodiesel on combustion, performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Fuel*, 216, 266-273. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.026>.
22. Rahman, M. M., Mohammed, M. K., & Bakar, R. A. (2009). *Effect of Air Fuel Ratio on Engine Performance of Single Cylinder Port Injection Hydrogen Fueled Engine: A Numerical Study*. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol II IMECS 2009, March 18-20, 2009, Hong Kong, 2009.
23. Ravikumar, R., Sujaykumar, G., Divakar, S. H., & Basavaraj, K. (2017). Investigation of Effect of Chicken Biodiesel Blended Diesel on Engine Performance. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 3, 2454-8006.
24. Saravanana, A., Murugan, M., Sreenivasa Reddy, M. M., & Satyajeet, P. (2020). Performance and emission characteristics of variable compression ratio CI engine fueled with dual biodiesel blends of Rapeseed and Mahua. *Fuel*, 263, 116751. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116751>.

25. Sen, A. (2019). The influence of canola oil biodiesel on performance, combustion characteristics and exhaust emissions of a small diesel engine. *Sakarya University Journal of Science*, 23, 121-128. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.472112>.
26. Tan, P. Q., Zhi-yuan, H., Di-ming, L., & Zhi-jun, L. (2012). Exhaust emissions from a light-duty diesel engine with Jatropha biodiesel fuel. *Energy*, 39, 356-362. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.002>.
27. Vallinayagam, R., Vedharaj, S., Yang, W., Lee, P., Chua, K., & Chou, S. (2014). Pine oil-biodiesel blends: A double biofuel strategy to completely eliminate the use of diesel in a diesel engine. *Applied Energy*, 130, 466-73. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.025>.



Investigating the Effect of Increasing Nano Cellulose to Diesel Fuel on Emission and Performance of Internal Combustion Engine

A. Waismoradi¹, M. E. Khorasani Ferdavani^{2*}, H. Bahrami³, S. M. Safieddin Ardebili², H. Zakidizaji³

1- PhD Student of Agricultural Mechanization, Department of Biosystem Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz and Member of PNU, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: e.khorasani@scu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70608.1042>

Received: 26-05-2021

Revised: 03-08-2021

Accepted: 23-08-2021

Available Online: 24-08-2021

How to cite this article:

Waismoradi, A., Khorasani Ferdavani, M. E., Bahrami, H., Safieddin Ardebili, S. M., & Zakidizaji, H. (2022). Investigating the Effect of Increasing Nano Cellulose to Diesel Fuel on Emission and Performance of Internal Combustion Engine. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 575-585. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.70608.1042>

Introduction

Today, the number of diesel engines is increasing due to their high efficiency and low greenhouse gases. In the present study, the effect of adding nano cellulose as nanoparticles to diesel fuel on the performance parameters and emissions of diesel engine was investigated. Nano cellulose was provided by the Nano Novin Company in Sari. Nano cellulose values were considered at 3 levels of zero, 25 ppm and 75 ppm. Also, the tests were performed at 3 engine speed of 1600, 2000 and 2400 rpm in full load mode.

Materials and Methods

In this study, nanocellulose was used as nanoparticles to add to diesel and to evaluate the performance and emission parameters of the engine. To prevent the deposition of nano cellulose in diesel fuel, jelly type nano cellulose was used. The samples were named after adding different amounts of nano cellulose, abbreviated D100N0, D100N25 and D100N75. D100 means 100% pure diesel and N means different amounts of nano cellulose with different amounts. Ultrasound was used to obtain homogeneous samples. About 3 liters were prepared from each sample so that it could be used for at least 3 repetitions. The required tests were performed at three different speeds of 1600, 2000 and 2400 rpm in full load mode. The necessary equipment was used to measure the performance parameters and air emissions, including diesel engine connected to the dynamometer, emissions measuring device, fuel system and control room (to apply the load and provide conditions for each treatment and data collection). The air-cooled, four-stroke, compression-ignition single-cylinder engine made by the Italian company Lombardini was used. The D400 eddy current dynamometer made in Germany was used. The ability to measure power by this dynamometer is a maximum of 21 hp, a maximum speed of 10,000 rpm and a maximum torque of 80 N.m. To measure of emissions, the MAHA MGT5 emissions meter was used. This device is able to measure the values of CO, CO₂, NO_x, O₂ and UHC.

Results and Discussion

The results showed that increasing engine speed in all fuel combinations increased engine power, specific fuel consumption, carbon monoxide and unburned hydrocarbons and decreased torque. Also, increasing the amount of nano cellulose per engine speed increased the amount of power and torque, but reduced the specific fuel consumption, carbon monoxide and unburned hydrocarbons. The amount of NO_x increased with increasing engine speed, but at each engine speed the addition of 25 ppm nanocellulose to pure diesel significantly increased the amount of NO_x. But at low speed, increasing 75 ppm nanocellulose to pure diesel reduced the amount of NO_x.

Conclusion

The results of this study showed that the addition of nano cellulose as nanoparticles can improve the performance of diesel engines and also reduce the amount of emissions gases emitted from the engine. The

results also showed that increasing 25ppm nanocellulose had a greater effect on engine performance. But to reduce the amount of emissions, 75 ppm nanocellulose was better.

Keywords: Diesel engine, Nanocellulose, Nitrogen oxides, Power

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۸۵-۵۷۵

بررسی تأثیر افزودن نانوسلولز به سوخت دیزل بر عملکرد و آلایندگی موتور احتراق داخلی

امین ویسمرادی^۱، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی^{۲*}، هوشنگ بهرامی^۳، سید محمد صفی الدین اردبیلی^۴، حسن ذکی

دیزجی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

چکیده

امروزه تعداد موتورهای دیزل به دلیل داشتن بازده زیاد و تولید گازهای گلخانه‌ای کم، در حال افزایش است. در پژوهش حاضر تأثیر افزودن نانوسلولز به سوخت دیزل بر پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور دیزل مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر نانوسلولز در ۳ سطح صفر و ۲۵ppm و ۷۵ppm در نظر گرفته شد. آزمون‌های موتور در ۳ دور موتور ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه در حالت بار کامل انجام گرفت. به منظور اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور، از تجهیزات مختلفی شامل دینامومتر، دستگاه اندازه‌گیری آلاینده‌ها و سیستم کنترل موتور استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش دور موتور در تمام ترکیب‌های سوختی باعث افزایش در توان موتور، مصرف سوخت و ویژه، مونواکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته ولی مقدار گشتاور موتور، کاهش یافت. همچنین در هر دور موتور افزودن مقادیر مختلف نانوسلولز، مقدار توان و گشتاور موتور را افزایش داد، اما باعث کاهش مصرف سوخت و ویژه، مونواکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته شد. مقدار NO_x با افزایش دور موتور افزایش یافت ولی در هر دور موتور افزودن ۲۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص به میزان قابل توجهی مقدار NO_x را افزایش داد. اما در دورهای پایین، افزایش ۷۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص باعث کاهش مقدار NO_x نسبت به دیزل خالص شد، اگرچه از لحاظ آماری معنی‌دار نیست. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانوسلولز به سوخت دیزل می‌تواند سبب بهبود عملکرد و کاهش گازهای آلاینده خروجی از موتور دیزل شود. اگر چه افزودن ۲۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص به میزان قابل توجهی مقدار NO_x را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: اکسیدهای نیتروژن، توان، موتور دیزل، نانوسلولز

مقدمه

در میان تمام منابع انرژی، سوخت‌های فسیلی نقش مهمی در تولید انرژی دارند که تقریباً مصرف آن‌ها در هر سال ۲ درصد افزایش می‌یابد (Foster et al., 2017). استفاده گسترده از موتورهای دیزلی به دلیل بهره‌وری و دوام بالا، باعث افزایش انتشار کربن و دیگر آلاینده‌ها می‌شود و در نهایت سلامتی جامعه را به خطر می‌اندازد (Geng, Cao, Tan, & Wei, 2017). با توجه به اثراتی که سوخت‌های فسیلی در اثر استفاده مداوم و رو به رشد آن‌ها، بر اقلیم دارند، محققان درصدد گزینه‌هایی هستند که ضرر استفاده از سوخت‌های فسیلی در موتورهای احتراق داخلی به اکوسیستم کمتر

شود و از طرفی دیگر باعث افزایش عملکرد آن‌ها شوند (Nair, Kaviti, & Daram, 2017).

تحقیقات زیادی در مورد استفاده از ترکیب سوخت‌های دیزل و نانو افزودنی‌های مختلف در جهت بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌های موتورهای احتراق داخلی صورت گرفته است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که نانو افزودنی‌ها سرعت سوختن سوخت در محفظه احتراق را افزایش می‌دهند و به‌عنوان یک عامل اکسیداسیون‌کننده عمل می‌کنند و اکسیژن را برای اکسیداسیون مونواکسیدکربن فراهم کرده و باعث جذب اکسیژن در جهت کاستن مقدار اکسیدهای نیتروژن می‌شوند (Devaraj, Arul Prakasajothi, & Rajesh, 2017). نانوافزودنی‌ها را به‌صورت کلی می‌توان در گروه‌های مختلف مانند اکسید فلزات، فلزات و نانولوله‌های کربنی^۴ و مواد دیگر مانند گرافن^۵ طبقه‌بندی کرد (Singh & Sharma, 2015). در تحقیقات انجام گرفته توسط محققانی مانند

۱- دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز و عضو دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*نویسنده مسئول):
(Email: e.khorasani@scu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70608.1042>

4- Carbon nanotubes
5- Graphene

سال‌های اخیر و استفاده از نانوافزودنی‌های غیر فلزی، تاکنون در هیچ تحقیقی از نانوسولوز بررسی بهبود عملکرد موتور انجام نشده است که هدف اصلی این تحقیق بررسی نقش نانوسولوز در ترکیب با دیزل بر عملکرد و آلایندگی موتور است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از نانوسولوز در سه سطح صفر، ۲۵ppm و ۷۵ppm به‌عنوان یک افزودنی گیاهی جهت افزودن به سوخت دیزل و بررسی شاخص‌های عملکردی و آلایندگی موتور استفاده شد. نانوسولوز مورد نیاز از شرکت دانش بنیان نانونوین مستقر در شهر ساری استان مازندران تهیه شد. جهت جلوگیری از ته‌نشین شدن نانوسولوز در سوخت دیزل، از نانوسولوز نوع ژله‌ای استفاده شد. شکل شماره ۱ تصویری از نانوسولوز ژله‌ای را نشان می‌دهد که توسط میکروسکوپ الکترونیکی گرفته شده است.

نمونه سوخت دیزل مورد آزمایش بعد از اضافه کردن مقادیر مختلف نانوسولوز به آن، با علائم اختصاری $D_{100}N_0$ ، $D_{100}N_{25}$ و $D_{100}N_{75}$ نام گذاری شد. D به معنی دیزل خالص و N با مقادیر مختلف به معنی مقدار نانوسولوز اضافه شده به سوخت می‌باشد. از دستگاه فراصوت^۲ جهت به‌دست آوردن نمونه‌های همگن استفاده شد. آزمون‌های مورد نیاز در یک موتور تک سیلندر هواخنک، چهار زمانه، اشتعال تراکمی ساخت شرکت لمباردینی^۳ ایتالیا و در سه سرعت مختلف ۲۰۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه و در حالت تمام بار^۴ در ۳ تکرار انجام شد.

تجهیزات آزمون موتور

این پژوهش در آزمایشگاه بخش انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت. در این پژوهش به منظور اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور، از تجهیزات مختلفی شامل دینامومتر، دستگاه اندازه‌گیری آلایندگی‌ها و سیستم کنترل موتور (تنظیم بار و سرعت موتور و کنترل شرایط آزمون و ثبت داده‌های آزمایشگاهی) استفاده شد. برای بارگذاری موتور از دینامومتر جریان گردابی^۵ مدل D400 ساخت کشور آلمان استفاده شد. قابلیت اندازه‌گیری توان توسط این دینامومتر حداکثر ۲۱ اسب بخار، حداکثر دور ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه و حداکثر گشتاور ۸۰ نیوتن‌متر می‌باشد. برای اندازه‌گیری میزان آلایندگی، از دستگاه آلایندگی‌سنج MAHA MGT5 استفاده شد. این دستگاه قادر به اندازه‌گیری مقادیر مونو اکسیدکربن CO، دی‌اکسید کربن CO₂، اکسیدهای نیتروژن NO_x و

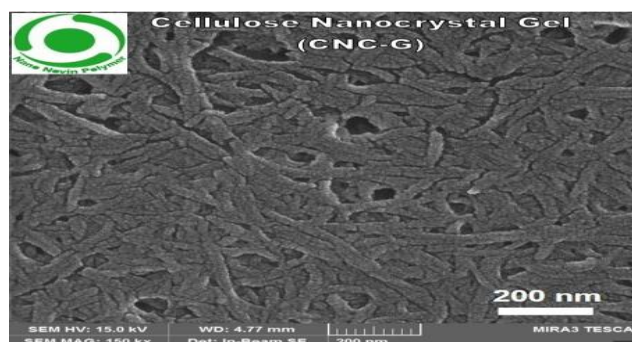
(Joshua, 2016; Naik & Kumar, 2018; Ramesh *et al.*, 2018; Prasada Rao, Victor Babu, Anuradha, & Appa Rao, 2017; Devi, 2018) از نانوافزودنی‌های فلزی مختلف جهت بهبود شاخص‌های عملکردی موتور استفاده کرده‌اند. اما اخیراً توجه محققان به مواد غیرفلزی به‌عنوان نانوافزودنی جلب شده است. در تحقیقات مختلف بر روی موتور جهت بررسی شاخص‌های عملکردی و آلایندگی موتور محققانی مانند (Mirbagheri, Safieddin, Ardebili, & Kiani Deh Kiani, 2020; Ghafari *et al.*, 2015; Hosseini, Taghizadehalisaraei, Ghobadian, & Abbaszadeh mayvan, 2017) از مواد غیر فلزی به‌عنوان نانوافزودنی استفاده کردند. در تحقیقی، مدل‌سازی اثرات نانولوله‌های کربن اضافه شده به مخلوط سوخت دیزل-بیودیزل بر عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزل با استفاده از شبکه عصبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که مصرف سوخت ویژه موتور و آلایندگی‌های مونواکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته به‌ترتیب به میزان ۳/۶۷٪، ۶۵/۷۰٪ و ۴۴/۹۸٪ درصد کاهش می‌یابد در حالی که میزان اکسیدهای نیتروژن ۲۷/۴۹٪ درصد افزایش یافت (Hosseini *et al.*, 2017). در بررسی اثر نانولوله‌های چند دیواره کربن در هنگام استفاده از سوخت ترکیبی دیزل-بیودیزل مشاهده شد که بیشترین میزان قدرت و گشتاور در بیودیزل ۲۰٪ و درصد ۳۰ppm نانولوله‌های کربن بود که مقدار قدرت ۱۷٪ و مقدار گشتاور ۱۸٪ نسبت به دیزل رایج بیشتر بود (Ghafari *et al.*, 2015). در یک پژوهش اثر افزایش نانوبیوچار^۱ به ترکیب اتانول، بیودیزل و دیزل در یک موتور دیزل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش نانوبیوچار مقدار مصرف سوخت ویژه حدود ۳٪ کاهش و توان ترمزی موتور ۱۱/۷٪ افزایش یافت. همچنین آلایندگی‌های CO، NO_x و UHC به‌ترتیب ۱۵٪، ۰/۰۳٪ و ۲۸٪ کاهش یافتند (Mirbagheri *et al.*, 2020).

سولوز یکی از فراوان‌ترین و پر استفاده‌ترین مواد طبیعی غیر فلزی در جهان است که به‌عنوان یک ماده خام تجدیدپذیر و فراوان، در توسعه مواد جدید در حال تبدیل شدن به یک منبع اقتصادی جدید است. محققان توجه زیادی به تولید و بهره‌برداری از نانوسولوز در کاربردهای مختلف پرداخته‌اند. در حال حاضر نانوسولوز پتانسیل بالایی برای کاربرد در بسیاری از زمینه‌ها مانند صنایع الکترونیکی، غذایی، گاز و نفت، کاغذ، خودروسازی، فضایی و دفاعی و محصولات بهداشتی و سلامت دارد (Ojala, Sirviö, & Liimatainen, 2016). نانوسولوز، متشکل از فیبرهای سولوز با ابعاد نانو است، که نوعاً دارای ابعاد عرضی ۲۰-۵ نانومتر و ابعاد طولی در محدوده گسترده‌ای از ده‌ها نانومتر تا چند میکرون است (Lima & Brosali, 2004; Klemm *et al.*, 2011). با توجه به تحقیقات صورت گرفته در

2- Ultrasonic
3- Lombardini
4- Full load
5- Eddy Current

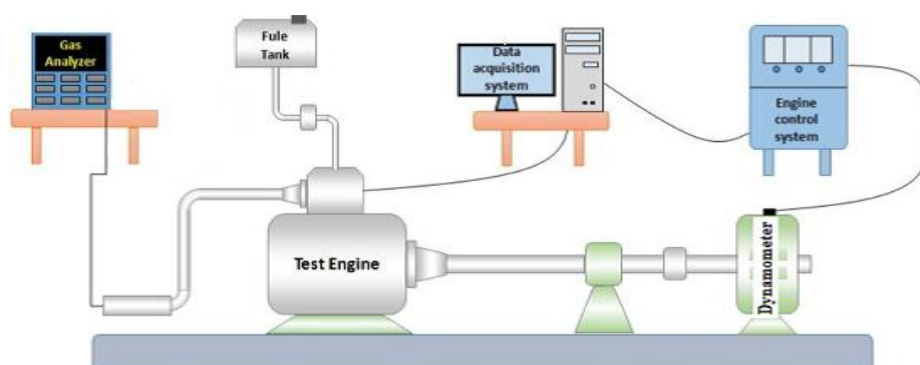
1- Nano-biochar

هیدروکربن‌های نسوخته UHC می‌باشد. شکل ۲ طرحواره تجهیزات مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- تصویربرداری نانوسلولز ژله‌ای توسط میکروسکوپ الکترونیکی

Fig. 1. Imaging of jelly Nanocellulose by Electronic Microscope



شکل ۲- تجهیزات مورد استفاده برای آزمون موتور

Fig. 2. Used instruments for engine testing (Hoseini, Najafi, Ghobadian, Yusaf, & Ebadi, 2018)

جدول ۱- تجزیه واریانس تأثیر مقادیر نانوسلولز و دور موتور بر پارامترهای عملکردی موتور

Table 1-Variance analysis of engine speed and nanocellulose values on engine performance parameters

منابع تغییرات Sources of variation	میانگین مربعات توان موتور Mean squares of engine power	میانگین مربعات گشتاور موتور Mean squares of engine torque	میانگین مربعات مصرف سوخت ویژه موتور Mean squares of engine specific fuel consumption
مقدار نانوسلولز Nanocellulose values	0.435**	8.253**	7495.368**
دور موتور Engine speed	1.061**	23.426**	8770.169**
اثر متقابل Interaction	0.018**	0.746**	91.589 ns
خطای آزمایشی Error	0.004	0.073	63.111

ns غیر معنی‌دار و ** معنی‌دار در سطح ۱٪
ns insignificant and ** Significant at 1% level.

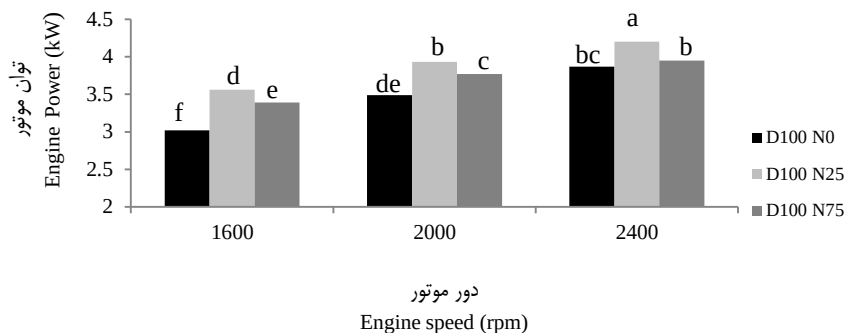
نتایج و بحث

ارائه شده‌اند. در این تحقیق آزمایش فاکتوریل با ۲ فاکتور (مقدار نانوسلولز و دور موتور) و هر فاکتور در ۳ سطح بر پایه طرح کرت‌های کاملاً تصادفی^۱ در سه تکرار مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۱ تجزیه

در این بخش نتایج اندازه‌گیری متغیرهای عملکردی و آلاینده‌گی موتور شامل توان ترمزی، گشتاور، مصرف سوخت ویژه ترمزی، مونواکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن در دورهای مختلف موتور و ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و سوخت دیزل

1- Completely Randomized Design (CRD)

سوخت دیزل در دورهای مختلف و مقایسه میانگین آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است که حروف مشابه به معنی عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. با توجه به شکل ۳ با افزایش دور موتور توان موتور در تمام حالت‌های مختلف ترکیب سوخت افزایش یافت.



شکل ۳- رابطه دور و توان موتور در ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و دیزل

Fig.3. Relationship between engine speed and power in different combinations of nanocellulose and diesel

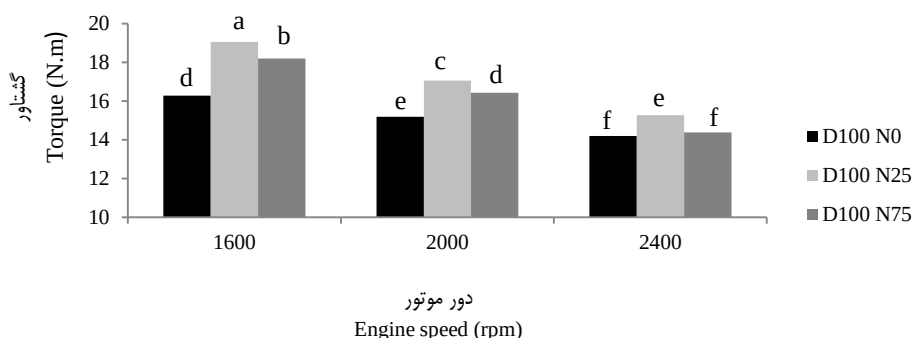
شده است که حروف مشابه به معنی عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش دور موتور، گشتاور آن کاهش یافت. این افت گشتاور به دلیل پر شدن ناقص سیلندر موتور در مرحله مکش و کاهش بازده حجمی موتور در سرعت بالاتر می‌باشد. از آنجایی که زمان کافی برای دریافت هوا و افزایش فشار در داخل سیلندر وجود ندارد، فشار در محفظه احتراق کاهش می‌یابد که این به نوبه خود باعث افزایش اینرسی قطعات متحرک موتور شده و در نتیجه گشتاور موتور را کاهش می‌دهد.

در هر دور مورد آزمون، افزودن نانوسلولز به سوخت دیزل باعث افزایش مقدار گشتاور موتور در هر دو مقدار ۲۵ppm و ۷۵ppm نانوسلولز شد. افزایش گشتاور موتور در حالت ۲۵ ppm نانوسلولز و سوخت دیزل نسبت به سوخت دیزل خالص به ترتیب در ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور در دقیقه ۱۷٪، ۱۲٪ و ۷٪ بود. میزان گشتاور موتور در دورهای مختلف، هنگام افزودن ۷۵ ppm نانوسلولز به سوخت دیزل راجع نسبت به ترکیب سوخت دیزل و ۲۵ ppm نانوسلولز کمی کاهش یافت. میزان گشتاور موتور در حالت ۷۵ ppm نانوسلولز و سوخت دیزل نسبت به سوخت دیزل خالص به ترتیب در ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور در دقیقه، ۱۱/۷۰٪، ۸٪ و ۱/۲۵٪ افزایش یافت. دلیل زیاده‌تر شدن گشتاور، با افزودن نانوسلولز، افزایش نسبت سطح به حجم نانوآفزودنی است که باعث افزایش انرژی تولید شده در داخل محفظه احتراق موتور شده و در نتیجه باعث افزایش گشتاور موتور در هر دور مورد آزمون می‌شود.

واریانس پارامترهای عملکردی موتور را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر نانوسلولز و دور موتور بر میزان توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه موتور در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشند ولی اثر متقابل آن‌ها فقط بر توان و گشتاور موتور معنی‌دار است. تغییرات توان موتور در ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و

در مقایسه با دیزل خالص، افزودن ۲۵ppm نانوسلولز سبب افزایش ۱۷/۸۸٪، ۱۲/۶۰٪ و ۸/۵۲٪ در دورهای ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ توان موتور شد. ولی افزودن ۷۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص در دورهای ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ به ترتیب ۱۲/۲۵٪، ۸/۰۲٪ و ۲/۰۶٪ توان موتور را افزایش داد. همچنین مشاهده شد که در هر دو حالت افزودن ۲۵ppm و ۷۵ppm نانوسلولز، تغییرات توان در دورهای پایین نسبت به دورهای بالاتر بیشتر بود. افزایش توان موتور بعد از افزودن نانوسلولز می‌تواند به این دلیل باشد که از یک طرف نانوسلولز باعث اختلاط بهتر سوخت و هوا به دلیل افزایش سطح تماس بین هوا و سوخت می‌شود و از طرف دیگر وجود گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در ساختار نانوسلولز با فرمول $(C_6H_{10}O_5)_n$ ، کمبود اکسیژن در محفظه احتراق جبران می‌گردد و در نهایت باعث افزایش فشار اندیکاتوری در محفظه احتراق می‌شود. این نتایج توسط محققانی مانند (Mirzajanzadeh et al., 2015; Chandrasekaran, Arthanarisamy, Nachiappan, Dhanakotti, & Moorthy, 2016; Hoseini et al., 2020) نیز گزارش شده است. اما دلیل کمتر بودن تأثیر مقدار ۷۵ppm نانوسلولز در افزایش توان می‌تواند جذب گرمای بیشتر هنگام افزودن ۷۵ppm نانوسلولز به سوخت دیزل نسبت به ۲۵ppm نانوسلولز باشد. زیرا وجود پیوندهای هیدروژنی در ساختار نانوسلولز موجب جذب شدن گرمای زیاد جهت شکستن این پیوندها و سوختن نانوسلولز می‌شود (Kord & Rohani, 2016). تغییرات گشتاور موتور در ترکیب‌های مختلف دیزل و نانوسلولز در دورهای مختلف موتور و مقایسه میانگین آن‌ها در شکل ۴ نشان داده

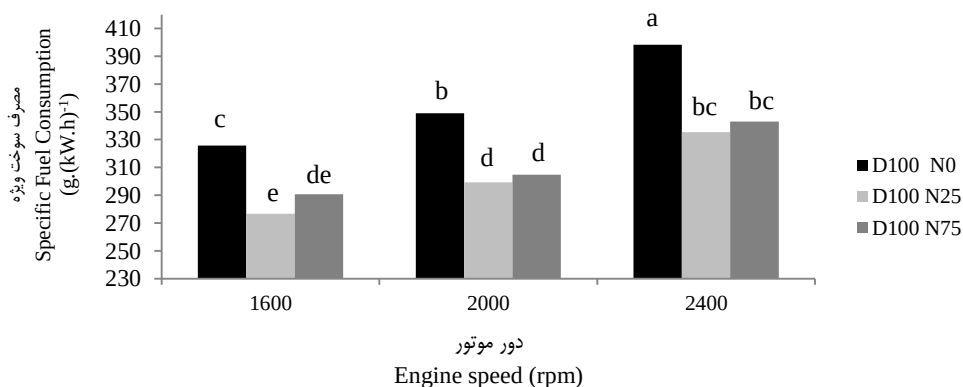


شکل ۴- رابطه دور و گشتاور موتور در ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و دیزل

Fig.4. Relationship between engine speed and torque in different combinations of nanocellulose and diesel

سوخت ویژه با افزودن ۲۵ ppm نانوسلولز به سوخت دیزل، نسبت به دیزل خالص، در ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه، به ترتیب ۱۵/۰۳٪، ۱۴/۲۶٪ و ۱۶/۵۳٪ بود. این کاهش برای سوخت‌های حاوی ۷۵ppm نانوسلولز، نسبت به دیزل خالص به ترتیب، ۱۰/۷۶٪، ۱۲/۶۶٪ و ۱۳/۹۰٪ بود. یکی از دلایل مقدار کاهش مصرف سوخت ویژه می‌تواند وجود مقدار اکسیژن در ترکیب نانوسلولز باشد که باعث بهبود فرایند احتراق می‌شود. دلیل دیگر کاهش مصرف سوخت ویژه، در هنگام افزودن نانوسلولز افزایش نسبت سطح به حجم نانوافزودنی است که باعث افزایش انرژی تولیدشده در داخل محفظه احتراق موتور شده و در نتیجه باعث کاهش مصرف سوخت ویژه موتور می‌شود.

نتایج به‌دست آمده در این قسمت با نتایج حیدری مالنی و همکاران (Heidari-Maleni, Gundoshmian, Karimi, Jahanbakhshi, & Ghobadian, 2020) مشابه است. شکل ۵ رابطه دور و مصرف سوخت ویژه موتور و مقایسه میانگین آن‌ها در ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و دیزل را نشان می‌دهد که حروف مشابه به معنی عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. با افزایش دور موتور، مقدار مصرف سوخت ویژه در تمام ترکیب‌های سوخت (حتی سوخت دیزل) افزایش یافت. با افزودن مقادیر ۲۵ppm و ۷۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص به‌طور چشمگیری مقدار مصرف سوخت ویژه را در هر دور موتور نسبت به سوخت دیزل، کاهش داد. مقدار کاهش مصرف



شکل ۵- رابطه دور موتور و مصرف سوخت ویژه موتور در ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و دیزل

Fig.5. Relationship between engine speed and specific fuel consumption in different combinations of nanocellulose and diesel

CO نسبت به تغییر دور موتور و مقادیر مختلف نانوسلولز و مقایسه میانگین آن‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است که حروف مشابه به معنی عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۲ تجزیه واریانس پارامترهای آلاینده‌ی موتور را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ مقادیر نانوسلولز و دور موتور و اثر متقابل آن‌ها بر CO، UHC و NO_x در سطح ۱٪ معنی‌دار است. تغییرات

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر مقادیر نانوسلولز و دور موتور بر پارامترهای آلاینده‌گی موتور

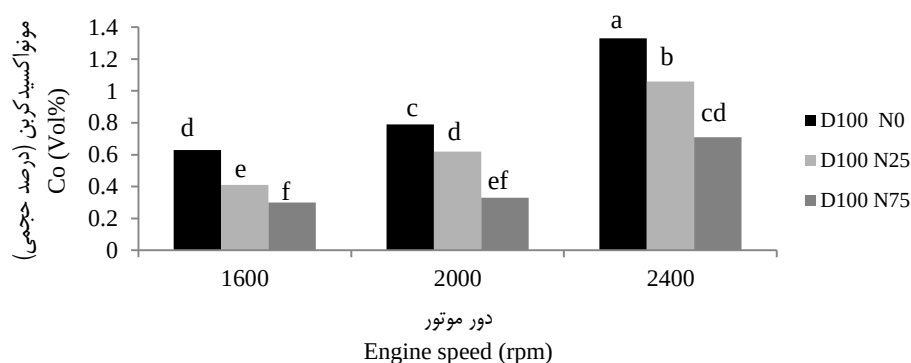
منابع تغییرات Sources of variation	میانگین مربعات مونواکسیدکربن Mean squares of carbon monoxid	میانگین مربعات هیدروکربن‌های نسوخته Mean squares of Unburned hydrocarbons	میانگین مربعات مصرف اکسیدهای نیتروژن Mean squares of Nitrogen oxides
مقدار نانوسلولز Nanocellulose values	0.495**	13300.259**	7495.368**
دور موتور Engine speed	0.858**	8062.259**	7200.333**
اثر متقابل Interaction	0.019**	849.204**	10.794**
خطای آزمایشی Error	0.002	37.630	63.111

** Significant at 1% level.

** معنی‌دار در سطح ۱٪

انژکتور تزریق می‌شود. اگر زمان احتراق، اکسیژن به مقدار کافی برای تبدیل همه کربن‌ها به دی‌اکسیدکربن (CO_2) وجود نداشته باشد، احتراق به‌طور کامل انجام نمی‌گیرد و باعث افزایش مقدار CO می‌شود (Tan, Hu, & Lou, 2009; Meng & Niu, 2011). از دلایل کاهش مقدار CO، می‌توان به وجود اکسیژن در ساختار نانوسلولز اشاره کرد که در نهایت می‌تواند به بهبود فرایند احتراق کمک کند. افزودن مقدار ۷۵ ppm نانوسلولز نسبت به ۲۵ ppm نانوسلولز به سوخت دیزل، به علت داشتن سطح بیشتر، باعث اختلاط بهتر سوخت دیزل و هوای ورودی به موتور می‌شود و در نتیجه تاخیر در اشتعال را کاهش می‌دهد و باعث بهبود احتراق و کاهش CO می‌شود (Hoseini et al., 2020).

با توجه به شکل ۶ با افزایش دور موتور در تمام ترکیب‌های سوخت مقدار CO به دلیل کاهش بازده حجمی موتور و زمان لازم جهت انجام احتراق افزایش یافت. از طرف دیگر، با افزودن مقادیر مختلف نانوسلولز به سوخت دیزل در هر دور موتور میزان CO به دلیل افزایش مقدار اکسیژن در فرایند احتراق کاهش یافت. نسبت به سوخت دیزل خالص، مقدار آلاینده CO با افزودن ۲۵ ppm نانوسلولز به دیزل خالص در ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه به‌ترتیب به میزان ۳۵٪، ۲۱/۴۹٪ و ۲۰/۳۰٪ کاهش یافت. همچنین افزودن ۷۵ ppm نانوسلولز به دیزل رایج در دوره‌های مذکور به‌ترتیب ۳۸/۵۲٪، ۲۲/۵۸٪ و ۴۶/۶۱٪ میزان CO را کاهش داد. زمانی که موتور در بار کامل کار می‌کند، مقدار سوخت بیشتری توسط پمپ



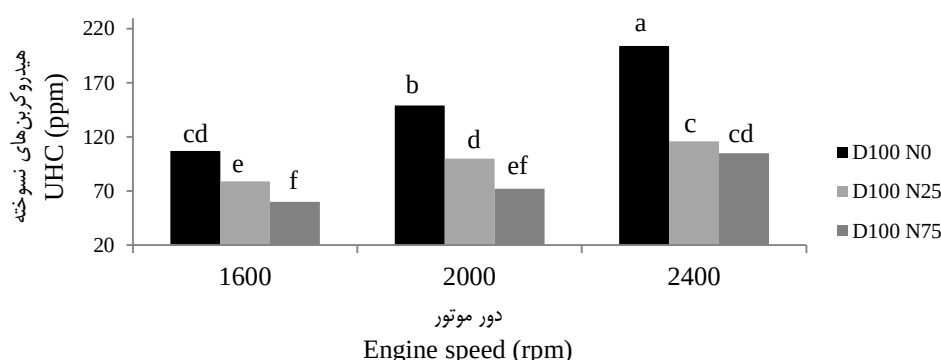
شکل ۶- رابطه دور موتور و مونواکسیدکربن در ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و دیزل

Fig.6. Relationship between engine speed and carbon monoxid in different combinations of nanocellulose and diesel

سوخت مقدار UHC افزایش یافت. با افزودن مقادیر مختلف نانوسلولز به سوخت دیزل در هر دور موتور، میزان UHC کاهش یافت. مقدار کاهش UHC در ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه با افزودن ۲۵ ppm نانوسلولز به دیزل خالص به‌ترتیب، ۱۶/۲۶٪، ۸۸/۳۲٪ و

تغییرات هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) نسبت به تغییرات دور موتور و مقادیر نانوسلولز و مقایسه میانگین آن‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است که حروف مشابه به معنی عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. با توجه به شکل ۷ با افزایش دور موتور در تمام ترکیب‌های

سوخت بستگی دارد (Sayin, 2010). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود اکسیژن در نانوسلولز می‌تواند دلیل بهبود احتراق در موتور باشد و مقدار UHC کاهش دهد. تغییرات اکسیدهای نیتروژن (NO_x) نسبت به تغییرات دور و مقادیر مختلف نانوسلولز و مقایسه میانگین آن‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است که حروف مشابه به معنی عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود روند منظمی در این نمودار وجود ندارد. مقدار آلایند NO_x با افزودن ۲۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص در ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب ۲۴/۷۶٪، ۵۱/۸۸٪ و ۵۴/۷۴٪ افزایش داشت.



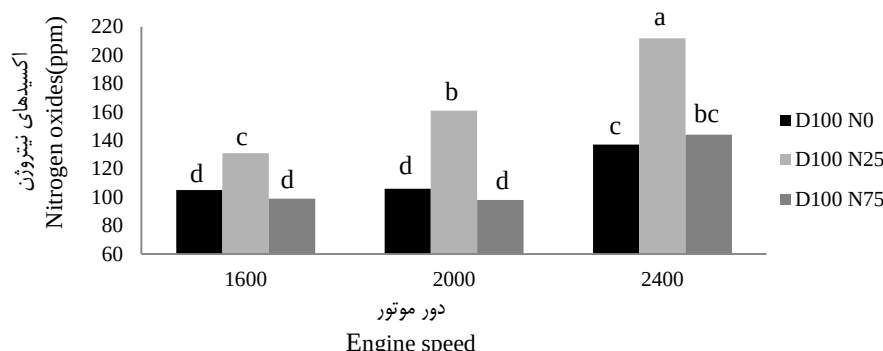
شکل ۷- رابطه دور موتور و هیدروکربن‌های نسوخته در ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و دیزل

Fig.7. Relationship between engine speed and unburned hydrocarbons in different combinations of nanocellulose and diesel

مقداری آب وجود دارد که این آب باعث کاهش مقدار دما در محفظه احتراق می‌شود. اما با ۲۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص روندی افزایشی در تمام دورها به صورت چشمگیر مشاهده شد. در سرعت ۲۴۰۰ دور بر دقیقه مقدار اکسیدهای نیتروژن برای سوخت دیزل حاوی مقادیر مختلف نانوسلولز نسبت به سوخت دیزل خالص، افزایش را نشان داد. افزودن نانوافزودنی‌ها به سوخت دیزل باعث بهبود احتراق در موتور و افزایش دمای محفظه احتراق می‌شود و در نهایت باعث بیشتر شدن مقدار NO_x می‌شود (Arul Mozhi Selvan, Anand, & Udayakumar, 2014). از دیگر دلایل احتمالی می‌توان به مقدار گرمای جذب شده توسط نانوسلولز در فرایند احتراق اشاره کرد. در غلظت پایین نانوسلولز گرمای کمتری از محیط به وسیله آن جذب می‌شود و انرژی آزاد شده بیشتری در محفظه احتراق به وجود می‌آید و توان افزایش یابد. به همین دلیل است که نسبت ۲۵ ppm سبب افزایش NO_x شده است در حالی که در ۷۵ ppm نانوسلولز سبب کاهش NO_x می‌شود.

این در حالی است مقادیر کاهش UHC با افزودن ۷۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص در دورهای مذکور به ترتیب، ۴۳/۹۲٪، ۵۱/۶۷٪ و ۴۸/۵۲٪ بود. با توجه به مقادیر کاهش UHC در دورهای مختلف موتور و مقادیر متفاوت نانوسلولز می‌توان نتیجه گرفت که در دورهای بالاتر افزایش مقدار بیشتر نانوسلولز خیلی تأثیری بر کاهش مقدار UHC ندارد. در گازهای خروجی از اگزوز موتور وجود UHC به معنی این است که احتراق کامل صورت نگرفته است و وجود این نوع آلایند در حالت کلی به نوع سوخت، دمای احتراق، طراحی ساختمان موتور و مقدار اکسیژن موجود در ساختار

مقدار این آلایند با افزودن ۷۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص در دورهای ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ به ترتیب ۵/۷۱٪، ۷/۵۴٪ نسبت به دیزل خالص کاهش داشت اما در ۲۴۰۰ دور به دقیقه ۵/۱۰٪ افزایش را نشان داد. مقدار NO_x در یک موتور به عواملی مانند نسبت تراکم، مقدار اکسیژن موجود در ترکیب سوخت، دمای محفظه احتراق و زمان لازم برای احتراق ترکیب سوخت در درون سیلندر بستگی دارد (Hoseini et al., 2020). در دورهای بالای موتور زمان کافی برای ورود هوا به سیلندر وجود ندارد بنابراین نسبت هوا به سوخت کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند سبب احتراق ناقص و افزایش دمای محفظه احتراق شود. در نتیجه افزایش دما در محفظه احتراق باعث تشکیل NO_x بیشتر در موتور می‌شود. با افزایش دور موتور از ۱۶۰۰ به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه در هنگام مصرف دیزل خالص تقریباً مقدار NO_x یکسان است. حتی در هنگام افزودن ۷۵ppm نانوسلولز به دیزل خالص مقدار NO_x با تغییر دور از ۱۶۰۰ به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه روندی کاهشی دارد به طوری که مقدار NO_x در این دو دور حتی کمتر از میزان دیزل خالص است اگرچه از لحاظ آماری معنی‌دار نیست و دلیل آن نقش نانوسلولز از نوع ژله‌ای است که در ساختار آن



شکل ۸- رابطه دور موتور و اکسیدهای نیتروژن در ترکیب‌های مختلف نانوسلولز و دیزل

Fig.8. Relationship between engine speed and nitrogen oxides in different combinations of nanocellulose and diesel

سپاسگزاری

نتیجه‌گیری

از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز بابت حمایت مالی از این پژوهش در قالب پژوهانه به شماره ۱۸۲۸۷/۰۲/۳/۹۹ و پرسنل آزمایشگاه موتور پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تربیت مدرس، مدیریت محترم شرکت دانش بنیان نانو نوین شهر ساری و دکتر حکمت ربانی دانشیار گروه بیوسیستم دانشگاه رازی کرمانشاه تشکر و قدردانی می‌شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانوسلولز به سوخت دیزل می‌تواند سبب بهبود عملکرد و کاهش گازهای آلاینده خروجی از موتور دیزل شود. بررسی مقادیر مختلف نانوسلولز نیز نشان داد که استفاده از نسبت ۲۵ ppm به نسبت ۷۵ ppm در افزایش عملکرد موتور موثر است. از طرف دیگر، مقدار ۷۵ ppm نانوسلولز کاهش قابل توجه در گازهای آلاینده خروجی را به دنبال داشت.

References

1. Arul Mozhi Selvan, V., Anand, R. B., & Udayakumar, M. (2014). Effect of Cerium Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes as fuel-borne additives in Diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine. *Fuel*, 130, 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.034>
2. Chandrasekaran, V., Arthanarisamy, M., Nachiappan, P., Dhanakotti, S., & Moorthy, B. (2016). The role of nano additives for biodiesel and diesel blended transportation fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.015>
3. Devaraj, A., Arul Prakasajothi, M., & Rajesh, D. A. P. (2017). Review of Nanocatalyst as Additive Fuel in Diesel Engine. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 10(1), 270-274.
4. Devi, V. R. (2018). Experimental Investigations on CI Diesel Engine With Varied Combustion Chamber Designs (HCC and SDCC) Using Neem Biodiesel and Calcium Carbonate (Caco3) Nano Fluid Additive. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(3), 2167-2172.
5. Foster, E., Contestabile, M., Blazquez, J., Manzano, B., Workman, M., & Shah, N. (2017). The unstudied barriers to widespread renewable energy deployment: Fossil fuel price responses. *Energy Policy*, 103, 258-264. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.050>
6. Geng, P., Cao, E., Tan, Q., & Wei, L. (2017). Effects of alternative fuels on the combustion characteristics and emission products from diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 523-534. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.080>
7. Ghafoori, M., Ghobadian, B., Najafi, G., Layeghi, M., Rashidi, A., & Mamat, R. (2015). Effect of nano-particles on the performance and emission of a diesel engine using biodiesel-diesel blend. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 12, 3097-3108. <https://doi.org/10.15282/ijame.12.2015.23.0258>
8. Heidari-Maleni, A., Gundoshmian, T. M., Karimi, B., Jahanbakhshi, A., & Ghobadian, B. (2020). A novel fuel based on biocompatible nanoparticles and ethanol-biodiesel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions. *Fuel*, 276, 118079. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118079>
9. Hoseini, S., Najafi, G., Ghobadian, B., Yusaf, T. F., & Ebadi, M.-T. (2018). The Effects of Camelina "Soheil" as a Novel Biodiesel Fuel on the Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine. *Applied Sciences*, 8, 1010. <https://doi.org/10.3390/app8061010>

10. Hoseini, S. S., Najafi, G., Ghobadian, B., Ebadi, M. T., Mamat, R., & Yusaf, T. (2020). Biodiesels from three feedstock: The effect of graphene oxide (GO) nanoparticles diesel engine parameters fuelled with biodiesel. *Renewable Energy*, 145, 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.020>
11. Hosseini, S. H., Taghizadehalisaraei, A., Ghobadian, B., & Abbaszadeh mayvan, A. (2017). Modeling the effects of carbon nanotubes added to diesel-biodiesel fuel blends on performance and emissions of a diesel engine using artificial neural network. *Fuel and Combustion*, 10(2 #A00254), 1-16.
12. Joshua, M., & Gowdham, D. (2016). Emission characteristics of cerium oxide nanoparticle blended emulsified biodiesels. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, 4(2), 155-158.
13. Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 50, 5438-5466. <https://doi.org/10.1002/anie.201001273>
14. Kord, B., & Roohani, M. (2016). Thermal properties and fire behavior of PLA nanocomposite films. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 23(supplement 2), 185-201.
15. Lima, M., & Borsali, R. (2004). Rodlike Cellulose Microcrystals: Structure, Properties, and Applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 25, 771-787. <https://doi.org/10.1002/marc.200300268>
16. Meng, M., & Niu, D. (2011). Modeling CO₂ emissions from fossil fuel combustion using the logistic equation. *Energy*, 36(5), 3355-3359. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.032>
17. Mirbagheri, S. A., Safieddin Ardebili, S. M., & Kiani Deh Kiani, M. (2020). Modeling of the engine performance and exhaust emissions characteristics of a single-cylinder diesel using nano-biochar added into ethanol-biodiesel-diesel blends. *Fuel*, 278, 118238. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118238>
18. Mirzajanzadeh, M., Tabatabaei, M., Ardjmand, M., Rashidi, A., Ghobadian, B., Barkhi, M., & Pazouki, M. (2015). A novel soluble nano-catalysts in diesel-biodiesel fuel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions. *Fuel*, 139, 374-382. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.008>
19. Naik, J. V., & Kumar, K. K. (2018). Performance and emission characteristics of diesel engines with Al₂O₃ and CuO nanoparticles as additives. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(2), 791-798.
20. Nair, J. N., Kaviti, A. K., & Daram, A. K. (2017). Analysis of performance and emission on compression ignition engine fuelled with blends of Neem biodiesel. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(4), 927-931. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.09.005>
21. Ojala, J., Sirviö, J. A., & Liimatainen, H. (2016). Nanoparticle emulsifiers based on bifunctionalized cellulose nanocrystals as marine diesel oil-water emulsion stabilizers. *Chemical Engineering Journal*, 288, 312-320. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.113>
22. Prasada Rao, K., Victor Babu, T., Anuradha, G., & Appa Rao, B. V. (2017). IDI diesel engine performance and exhaust emission analysis using biodiesel with an artificial neural network (ANN). *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(3), 593-600. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.08.006>
23. Ramesh, D. K., Dhananjaya Kumar, J. L., Hemanth Kumar, S. G., Namith, V., Basappa Jambagi, P., & Sharath, S. (2018). Study on effects of Alumina nanoparticles as additive with Poultry litter biodiesel on Performance, Combustion and Emission characteristic of Diesel engine. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1114-1120. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.190>
24. Sayin, C. (2010). Engine performance and exhaust gas emissions of methanol and ethanol-diesel blends. *Fuel*, 89(11), 3410-3415. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.02.017>
25. Singh, G., & Sharma, S. G. (2015). *Effects of cerium oxide on the performance and emission characteristic of variable compression ratio ignition engine using Biodiesel from waste mustard oil*. Thapar University, Patiala. India.
26. Tan, P.-Q., Hu, Z.-Y., & Lou, D.-M. (2009). Regulated and unregulated emissions from a light-duty diesel engine with different sulfur content fuels. *Fuel*, 88(6), 1086-1091. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.031>



Investigating the Interaction between Soil and Cultivator Blade by Numerical Simulation and Validation of Results by Soil Bin Tests

H. Mahboub Yangeje¹, A. Mardani Korani^{2*} 

1- PhD 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: a.mardani@urmia.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70572.1041>

Received: 25-05-2021

Revised: 28-08-2021

Accepted: 22-09-2021

Available Online: 25-09-2021

How to cite this article:

Mahboub Yangeje, H., & Mardani Korani, A. (2022). Investigating the Interaction between Soil and Cultivator Blade by Numerical Simulation and Validation of Results by Soil Bin Tests. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 587-599. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.70572.1041>

Introduction

Seedbed preparation, seeding, and transplanting are usually based on mechanical soil tillage. Tillage by cutting, mixing, overturning, and loosening the soil can modify the physical, mechanical, and biological properties of soil. These days, because of soil protection, the use of tillage tools is less and less recommended, and some implements such as cultivators are preferred to primary tillage tools such as plows.

Experimental study of soil-tool interaction and field measurements of the mechanics of tillage tools are usually time-consuming and costly. On the other hand, the variety of variables and uncontrolled conditions add other dimensions to the complexity of this method. Also, the experimental and analytical methods do not have a comprehensive view of stress distribution and soil deformation in the soil-tool interaction process.

Materials and Methods

The main purpose of this study is to validate the results of numerical simulations in two phases of experimental tests: in soil bin environment and in finite element computer simulations. Experimental tests were performed in the soil bin environment of the Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, which has a soil bin facility with dimensions of length and width of 24 and 2 m, respectively, and has clay loam soil.

Before experimental tests, soil preparation was performed by using some special tillage implements (harrow, leveler, and roller) which were attached to the soil bin (Figure.1).

For experimental tests, a mechanism set consisting of two cultivator blades with a width of 15cm, a length of 20cm, and at a spacing of 35cm from each other was prepared and constructed. The relevant mechanism is designed to have the ability to change the tillage depth. Data were collected at three different soil depth levels of 6, 10, and 14cm in the soil bin with three replications. Data recording was performed using a 10-channel data logger with load cell connectivity and data storage ability.

Also, in this study, the Drucker-Prager model as a finite element simulation method was used to calculate the stress during the soil-tool relationship. ABAQUS 6.10.1 software was used to simulate the cultivator tine. To solve the problem, the soil parameters were defined as presented in Table 1, and then the interaction between the soil-tool model and the necessary constraints, including boundary conditions, were defined. In the next step, meshing was applied to the constructed model.

Results and Discussion

In the results section, first, the results related to the amount of traction force required for the tillage tine in the simulation were calculated and then compared with the soil bin experimental tests. The traction force of the finite element simulation results for three tillage depths of 6, 10, and 14 cm in three principal directions is shown in Figure 4. A comparison of simulation and experimental results showed that there is a good agreement between them. In comparison, the simulation error range of the three depths of 6, 10, and 14 cm has shown 7.3, 5.6, and 4.16% at a speed of 2.5 kmh⁻¹, respectively, as the velocity studied in this research.

In the next section, the results of stress distribution contours in the soil and finally the overlap of the blade effect were discussed. Figure 6 shows the status of stress contours at three depths. By increasing the depth of the tine at the three depth levels studied, the stress range is shifted from the soil surface to its depth. For this

purpose, at the maximum depth studied in this study (14 cm), it shows that the stress propagation to the soil surface is less than at other depths. Also, with decreasing depth, for a depth of 6 cm, the maximum stress was on the top soil surface, in other words, more deformation was seen on the soil surface.

Conclusion

Comparing the simulation results for predicting traction force with the results of experimental tests has led to relatively acceptable results and the maximum traction force prediction error at different depths has been about 7.3%.

The distribution of stress in the soil was observed due to the tine depth. The highest intensity of stress propagation was observed at the soil surface; and the highest soil surface deformation at a depth of 6 cm. With increasing depth, both parameters of stress and soil surface deformation have decreased.

According to the results of the studied blades, it is better to use these types of tillage tools only at lower depths. Also, in evaluating the overlap of the soil loosening zone in the side-by-side tines, it proves the superiority of the tine performance at lower depths.

Keywords: Chisel plow, Finite element method (FEM), Soil bin, Soil- tine interaction

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۸۷-۵۹۹

بررسی برهم‌کنش خاک و تیغه پنجه‌غازی توسط شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی نتایج با آزمون‌های انبار خاک

هوشنگ محبوب ینگجه^۱، عارف مردانی کرانی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

چکیده

در این مطالعه به بررسی نیروی کششی تیغه پنجه‌غازی در دو بخش شبیه‌سازی به روش اجزای محدود با تحلیل اویلرین- لاگرانژی و آزمون‌های تجربی در محیط انبار خاک پرداخته شد. از دو تیغه با فاصله ۳۵ cm و در سه عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متری با سرعت ۲/۵ کیلومتر بر ساعت استفاده شد. نیروی کششی تیغه طی شبیه‌سازی در عمق‌های ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر به ترتیب ۰/۶، ۲/۵ و ۳ کیلونیوتن بوده و نسبت به نتایج انبار خاک دارای محدوده خطای ۷/۳، ۵/۶ و ۴/۱۶ درصد بود. بیشترین تنش ایجاد شده در خاک در سه عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر به ترتیب در حدود ۶۸، ۶۹ و ۶۹ کیلوپاسکال بوده است. در عمق ۶ سانتی‌متر با توجه به نرم بودن خاک، نیروی عمودی وارده بر تیغه متاثر از وزن خاک بوده است. همچنین بررسی گسترش تنش در خاک حاکی از آن بوده است که با افزایش عمق کار، مقدار به‌هم‌خوردگی سطحی خاک و همچنین انتشار تنش به سطح خاک کاهش می‌یابد. علاوه بر چگونگی تغییرات تنش، هم‌پوشانی دو تیغه مجاور نیز با افزایش عمق کار از نظر به‌هم‌خوردگی خاک، کمتر می‌شود. با توجه به افزایش نیروی کششی تیغه در عمق‌های بالاتر، عمق کار بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر بر اساس نتایج مربوط به چگونگی توزیع تنش در خاک توصیه نمی‌شود. در همین رابطه، توان مصرفی هر تیغه در عمق کمتر از ۱۰ سانتی‌متر در حدود ۰/۴ کیلو وات بوده است در حالی که در عمق‌های بالا در حدود ۲ کیلو وات برای هر تیغه توان لازم است.

واژه‌های کلیدی: برهم‌کنش خاک-تیغه، خاک‌ورزی، روش المان محدود، کولتیواتور

مقدمه

خاک‌ورزی حفاظتی استفاده می‌شود. پنجه‌غازی‌ها نیز یکی از ادوات کشاورزی مورد استفاده در کشاورزی حفاظتی هستند که ضمن شکستن لایه‌های خاک، از فرسایش بادی و آبی جلوگیری کرده و به نفوذ بهتر آب در بافت خاک کمک می‌کنند که نتیجه آن افزایش عملکرد محصول است (Shao et al., 1993; Busari, Kukal, Kaur, Bhatt, & Dulazi, 2015). آماده کردن زمین زراعی مستلزم برش خاک، برگرداندن و خرد کردن خاک است. عملیات اولیه آماده کردن زمین زراعی توسط ادواتی مثل گاواهن برگردان‌دار، گاواهن بشقابی، گاواهن چپزل و زیرشکن‌ها انجام می‌گیرد. از جمله وظایف مهم خاک‌ورزها حفظ کیفیت مطلوب خاک، باروری، کاهش اثرات زیان‌بار تراکم خاک، کنترل علف‌های هرز و تثبیت بقایای گیاهی در خاک و همچنین جلوگیری از تأثیر تغییرات آب و هوایی است. همچنین محققان زیادی بر این امر تأکید می‌کنند که اختلالات مکانیکی بر روی خاک می‌تواند منجر به از دست دادن مواد آلی خاک و ایجاد خسارت از جمله بدتر شدن ظرفیت باربری و کارایی خاک شود (Birka's, 2009; Smatana, Macák, & Demjanová, 2010).

خاک یکی از منابع طبیعی است که ساختار و عملکرد بسیار متغیر داشته و به‌طور پویا تحت بازسازی و یا تخریب قرار می‌گیرد (Várallyay, 2010). از جمله تخریب‌های ایجاد شده توسط روش‌های خاک‌ورزی مرسوم به دلیل جابه‌جایی زیاد و زیر و رو شدن خاک می‌توان به از بین رفتن کانال‌ها و مجاری ساخته شده توسط موجودات داخلی خاک اشاره نمود. این امر باعث کاهش نفوذپذیری آب و هوا به عمق زیر ۱۵ cm خاک شده و در نهایت منجر به کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک گشته و تنفس ریشه گیاه را با مشکل مواجه می‌کند. برای به حداقل رساندن این تخریب‌ها از روش‌های

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: a.mardani@urmia.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70572.1041>

از طرف دیگر علاوه بر عملکرد و کیفیت فرایند خاک‌ورزی، نیروی کششی دنباله‌بندها و یا به عبارتی انرژی مصرفی در خاک‌ورزها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. به لحاظ مصرف انرژی، آماده‌سازی زمین زراعی همیشه برای محققان، طراحان، تولیدکنندگان و کشاورزان یک مسئله مهم بوده است. همچنین عملیات خاک‌ورزی در حدود نیمی از انرژی مکانیکی مورد استفاده در تولید محصول را به خود اختصاص می‌دهد (Kushwaha & Zhang, 1998). از این‌رو، پیش‌بینی دقیق نیروهای اعمالی بر تیغه خاک‌ورز و بهینه‌سازی طراحی ابزار خاک‌ورز، به بهبود بهره‌وری انرژی کمک خواهد کرد.

بررسی تجربی رابطه خاک-ابزار و اندازه‌گیری‌های تجربی معمولاً زمان‌بر و پرهزینه است و از این‌رو، معمولاً پس از انجام آزمایش‌ها ابزار موردنظر تولید می‌گردد. در این شرایط، ارزیابی مخلوط کردن خاک و پیش‌بینی نیروهای وارده بر خاک‌ورزها، تنها به صورت آزمایشی و با اندازه‌گیری‌های دشوار امکان‌پذیر است. بررسی تحلیلی برهم‌کنش خاک و ابزار ممکن است با استفاده از روش‌های تحلیلی-تجربی مانند معادله عمومی خاک‌برداری انجام گردد و از لحاظ در برداشتن ثابت‌های زیاد و دشواری در تعیین پارامترهای موجود در این معادلات، چندان نمی‌توان به آن‌ها متکی بود (McKyes, 1985). در کنار پرهزینه بودن این روش‌ها، تنوع متغیرها و محیط پیچیده شامل خاک و ابزار، ابعاد دیگری را به پیچیدگی این روش اضافه می‌کند. همچنین مهم‌ترین قسمت ادوات خاک‌ورزی که با خاک درگیر بوده و عمل برش و نرم کردن خاک را انجام می‌دهد، تیغه ادوات است. پژوهشگران بر اساس فرم شکست خاک توسط تیغه‌های خاک‌ورز، آن‌ها را به دو گروه تیغه‌های باریک و تیغه‌های پهن تقسیم کرده‌اند (Godwin, 1978). یکی از روش‌های متداول که امروزه با پیشرفت توانایی پردازش کامپیوترها در کنار روش‌های تجربی، رایج شده است شبیه‌سازی‌های عددی برهم‌کنش خاک-ابزار است. روش تجربی و تحلیلی، دیدگاه فراگیر و جامعی از توزیع تنش در تماس خاک و ابزار درگیر با خاک و همچنین تغییر شکل‌ها را ندارد. بر این اساس، محققان از روش‌هایی چون المان محدود برای شبیه‌سازی چنین فرایندهای پیچیده‌ای در کنار اعتبارسنجی و ارزیابی آن‌ها توسط آزمون‌های تجربی بهره جسته و در این راستا از نرم‌افزارهای المان محدود و یا المان گسسته استفاده می‌کنند (Kešner et al., 2021; Liu, Liu, Ma, Ni, & Gu, 2021; Ucgul & Saunders, 2020; Azimi-Nejadian, Karpavarfar, Naderi-Boldaji, & Rahmanian-Koushkaki, 2019; Ibrahimi, Bentaher, Hamza, Maalej, & Mouazen, 2015).

روش‌های تحلیلی در مطالعه تعامل خاک-ابزار تنها برای پیش‌بینی نیروی ابزار استفاده می‌شود. بنابراین روش‌های عددی ازجمله روش المان محدود (FEM) و روش المان گسسته (DEM) نیز برای شبیه‌سازی تعامل بین خاک و ابزارهای خاک‌ورزی

استفاده شده است (Kešner et al., 2021; Asaf, Rubinstein, & Shmulevich, 2007). مطابق گزارش‌های ارائه‌شده، این روش‌ها نه تنها قادر به محاسبه نیروی ابزار، بلکه قابلیت شبیه‌سازی به هم خوردگی خاک را نیز دارا هستند (Mouazen & Neményi, 1999; Kushwaha & Shen, 1995; Kešner et al., 2021; Liu et al., 2021; Ucgul & Saunders, 2020).

قابلیت روش المان گسسته برای مدل‌سازی برهم‌کنش خاک-ابزار در یک فرآیند خاک‌ورزی توسط شمولویچ و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی برهم‌کنش تیغه برشی پهن-خاک بررسی شده و چهار شکل متفاوت تیغه انتخاب گردید و همبستگی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی المان مجزا و نتایج آزمایشگاهی برای منحنی شکست به دست آمد (Shmulevich, Asaf, & Rubinstein, 2007).

هدف از این مطالعه، بررسی تجربی مقدار نیروی کششی مورد نیاز تیغه‌های پنجه‌غازی در محیط انبار خاک و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود همین فرایند در نرم‌افزار آباکوس^۱ در سه عمق متفاوت است. بیشتر مطالعات انجام‌شده از این دست شامل بررسی عملکرد یک تیغه است که در مطالعه حاضر، آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی هم‌زمان دو تیغه مجاور به منظور بررسی هم‌پوشانی عرضی آن‌ها در نظر گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

انبار خاک و آزمایش‌های تجربی

آزمون‌های تجربی این پژوهش، در محیط انبار خاک گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه با نوع بافت خاک رسی لومی انجام شد. انبار خاک یک محیط کنترل‌شده از خاک برای انجام تحقیقاتی از این دست است که امکان شبیه‌سازی محیط واقعی خاک-ابزار را در اختیار محققان قرار می‌دهد. انبار خاک مورد استفاده دارای کانالی به ابعاد طول و عرض به ترتیب ۲۴ و ۲ متر و ارتفاع لایه خاک ۱ متر است. همچنین دارای کشنده به توان ۳۰hp بوده و امکان فرآوری خاک مورد آزمایش توسط دنباله‌بندهای ویژه در آن پیش‌بینی شده است (Mardani, Shahidi, & Karim-Maslak, 2010). عملیات آماده‌سازی و همگن‌سازی خاک برای آزمایش‌ها در شرایط یکسان انجام گرفت. برای نرم کردن خاک کانال از یک چنگه مخصوص آماده‌سازی که قابل اتصال به کشنده انبار خاک است، استفاده گردید. فرایند نرم کردن خاک به گونه‌ای بود که لایه‌ای از خاک تا عمق تقریبی ۲۰ cm شخم زده شد و سپس به خوبی باهم مخلوط می‌گردید. بعد از چنگه‌زنی، خاک نرم شده توسط ماله متصل به کشنده انبار خاک هموار گردید (شکل ۱). مشخصات مکانیکی

مصالح تیغه و خاک انباره برای انجام آزمایش‌ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- مراحل فرآوری خاک انباره خاک برای انجام آزمایش‌ها

Fig. 1. Soil preparing steps for tests

جدول ۱- خصوصیات خاک انباره خاک برای تحلیل المان محدود

Table 1- Soil mechanical properties in soil bin for FEM analysis

پارامتر خاک Soil parameter	واحد Unit	مقدار Value
شن Sand	%	43
سیلت Silt	%	22
رس Clay	%	35
مدول یانگ Young's modulus	(MPa)	0.04
ضریب پواسون Poisson's ratio	(--)	32
چگالی Density	(kgm ⁻³)	1900
تنش تسلیم Yield stress	(MPa)	0.035
زاویه اصطکاک داخلی Friction angle of the material(ϕ)	(deg)	35
ضریب تنش جریان Flow stress coefficient (K)	(--)	.8
زاویه اتساع Dilatancy angle (ψ)	(deg)	1

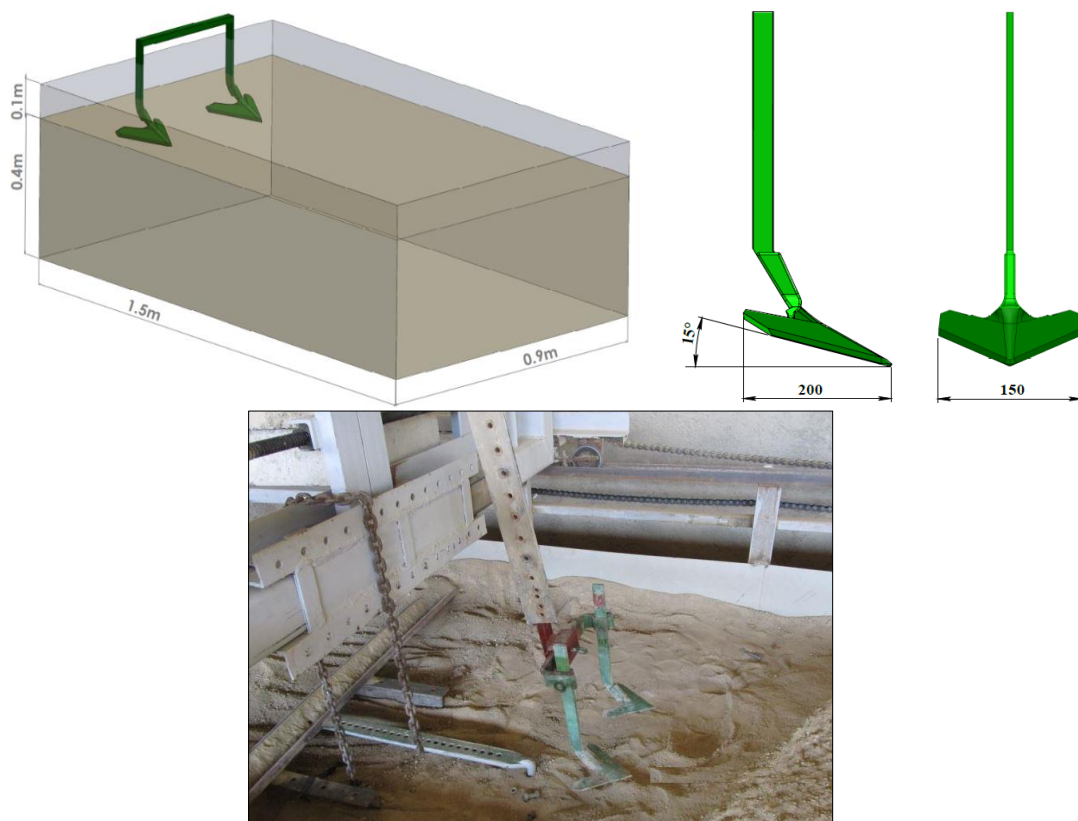
جدول ۲- خواص مکانیکی تیغه شبیه‌سازی شده

Table 2- Mechanical Properties of simulated tine

پارامتر Parameter	واحد Unit	مقدار Value
مدول یانگ Young's modulus	(GPa)	205
تنش نهایی کششی Ultimate stress	(MPa)	520
ضریب پواسون Poisson ratio	-	0.29
وزن مخصوص Density	(kgm ⁻³)	7870

عمق را دارا باشد زیرا در آزمایش‌ها، پارامتر عمق یکی از پارامترهای مستقل است. پس از نهایی شدن طرح مکانیسم پنجه‌گذاری، مدل سه‌بعدی آن نیز در نرم‌افزار SolidWorks2016 طراحی گردید. در شکل ۲ نمایی از پنجه‌گذاری سوار شده بر روی کشنده انبار خاک و همچنین مدل کامپیوتری به‌صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است.

برای انجام آزمایش‌ها، مجموعه‌ای شامل دو تیغه پنجه‌گذاری با عرض ۱۵ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر همراه با ساقه پنجه‌گذاری به فاصله ۳۵ سانتی‌متر از همدیگر آماده شد که به همراه یک قاب با قابلیت تنظیم تیغه‌ها و اتصال مجموعه به انبار خاک استفاده شد (شکل ۲). مکانیسم مربوطه به نحوی طراحی گردیده که قابلیت تغییر



شکل ۲- شکل و مدل سه‌بعدی پنجه‌گذاری

Fig. 2. Figure and 3D model of the tine

(مواد گرانوله مانند خاک) توسعه یافته‌اند. در نتیجه بر اساس مطالعات محققان و فرمول‌های پایه‌ای، مدل دراگر-پراگر برای هر دو رفتار حجمی و برشی استفاده می‌شود (Mouazen & Neményi, 1999). مدل هندسی خاک-پنجه‌غازی (شکل ۲) طراحی و مونتاژ شده در نرم‌افزار سالیدورکس، شامل قسمت‌هایی چون خاک، ناحیه اوپلری و تیغه پنجه‌غازی می‌باشد. پس از طراحی مدل، از آن توسط نرم‌افزار سالیدورک خروجی با پسوند (x.t) گرفته شده تا بتوان مدل طراحی شده را در نرم‌افزار آباکوس فراخوان کرد. ابعاد خاک به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است تا تأثیری در نتایج از نظر شرایط مرزی نداشته باشد. در شکل ۱ ابعاد مدل خاک-ابزار به همراه ناحیه لاگرانژی و اوپلری نشان داده شده است.

برای حل مسئله، ابتدا به تعریف پارامترهای خاک که در جدول ۱ ارائه شد، اقدام گردید و سپس برهم‌کنش بین مدل خاک-ابزار و قیدهای لازم از جمله شرایط مرزی لحاظ شد. در این مطالعه، شرایط مرزی شامل سرعت حرکت تیغه در عمق‌های مختلف و تعریف دیواره‌های کانال بود که مطابق آزمایش‌های تجربی در نرم‌افزار تعریف شد. در مرحله بعد، شبکه‌بندی (مش‌بندی) برای مدل ساخته شده اعمال گردید، که طی فرایند تعیین مش بهینه برای تعیین میزان درشتی و ریز بودن، بر اساس شرایط مسئله و قدرت سیستم پردازش مدنظر قرار گرفت. در این مطالعه، برای صرفه‌جویی‌های زمانی در حل مسئله، در بخش مربوط به ایجاد شبکه مدل هندسی، برای شبیه‌سازی مدل از چهار سطح شبکه ۱۷۴، ۱۴۰، ۲۵۸، ۴۸۳ و ۹۱۵۳ برای آزمون استقلال شبکه بهره گرفته شد.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تفاوت بین نتایج نیرو در بین سطوح شبکه‌بندی سوم و چهارم (به ترتیب ۲۳۱۴۸۳ و ۴۸۹۱۵۳ المان) کم‌تر از ۳٪ بود. بنابراین، برای صرفه‌جویی‌های زمانی در حل، شبکه با تعداد ۲۳۱۴۸۳ المان به عنوان شبکه پایه در این مطالعه استفاده گردید. ناحیه اوپلری که خاک مدل شده در آن تطبیق داده می‌شود از المان‌های مکعبی شکل ۸ گرهی و در مدل پنجه‌غازی از المان‌های مثلثی استفاده شده است. طرح‌واره‌ای از شبکه‌بندی انجام شده مدل خاک-ابزار در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۳ ارائه شده است.

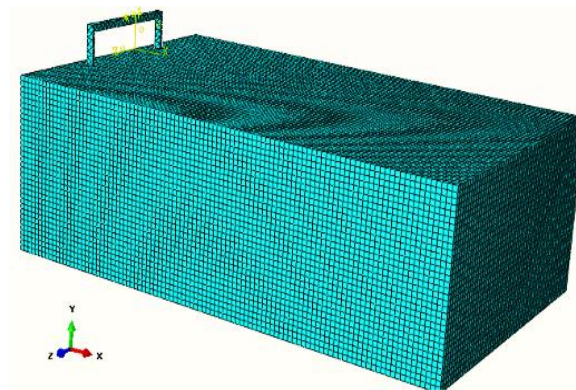
طی مراحل پایانی که شامل حل مسئله و پردازش می‌باشد، نرم‌افزار، مسئله را طبق شرایط تعریف شده حل کرده و نتایج را به صورت کانتورهای رنگی و نمودارهایی که برای نتایج مسئله در نظر گرفته شده نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که برای شبیه‌سازی‌ها از یک رایانه با پردازشگر Intel core i5 و حافظه رم ۱۶ مگابایت استفاده گردید.

مکانیسمی که برای نصب تیغه‌ها بر روی کشنده انباره خاک طراحی گردید، شامل اتصالاتی لولایی شکل است که علاوه بر قابلیت نصب بر روی کشنده انباره خاک، قابلیت نصب یک نیرو سنجش را نیز دارا است. در واقع، اتصالات به گونه‌ای می‌باشد که شاسی پنجه‌غازی یک درجه آزادی در راستای حرکت تیغه را دارد. درجه آزادی در نظر گرفته شده در راستای حرکت تیغه، توسط یک نیروسنجش S شکل محدود شده است که در نهایت، اندازه‌گیری و سنجش نیروی وارده به تیغه‌ها را میسر سازد. سیستم تحصیل داده شامل یک دیتالاگر است که با فرکانس ۵۰ هرتز، داده‌های مربوط به نیروی به وجود آمده در نیروسنج را در یک حافظه جانبی و همین‌طور در یک لپ‌تاپ ذخیره می‌کند. روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی در مناطق مختلف، متفاوت است که برحسب نوع خاک و گیاه و میزان بقایای محصول قبلی تا عمق کافی (۸-۱۵ سانتی‌متر) برای قرار دادن کود و بذر و مخلوط کردن بقایا با لایه سطحی انجام می‌گیرد (Sadeghnejad & Islami, 2006). بنابراین، داده‌برداری‌ها در این محدوده یعنی در سه عمق مختلف ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متری خاک در انباره خاک با سه تکرار انجام گرفت. ثبت داده‌ها با استفاده از یک دیتالاگر ۱۰ کاناله با قابلیت اتصال لودسل و ذخیره داده‌ها به انجام رسید. داده‌های سنجیده شده توسط لودسل بر روی حافظه جانبی توسط دیتالاگر ذخیره گردید. سپس داده‌ها به محیط اکسل کامپیوتر منتقل شد.

شبیه‌سازی

تغییر شکل خاک، به‌طور عمده هنگامی که به بیشتر از تنش عملکرد برسد به جریان پلاستیکی منجر می‌شود. بنابراین، استفاده از معیار عملکرد مناسب برای تجزیه و تحلیل رفتار پلاستیک خاک بسیار مهم است. در این تحقیق، از مدل دراگر-پراگر^۱ برای محاسبه تنش رابطه خاک-ابزار استفاده شد. به منظور شبیه‌سازی، مدل طراحی شده پنجه‌غازی-خاک در نرم‌افزار سالیدورکس به محیط آباکوس فراخوانی شد. فرمول‌بندی و روش تحلیل مسئله و شبیه‌سازی عددی، با استفاده از بسته نرم‌افزار المان محدود ABAQUS 6.10.1 و با تحلیل‌های دینامیکی به انجام رسید. با استفاده از این بسته نرم‌افزار می‌توان تغییر شکل‌های بزرگ را با تحلیل اوپلری لاگرانژی^۲ مدل کرد. در فرمول‌بندی این تحقیق، صفحه فشاردهنده لاگرانژی به صورت صلب و تغییر شکل ناپذیر در نظر گرفته شد و خاک هم در ناحیه اوپلری تعریف گردید. شبیه‌سازی به روش المان محدود از شرط تسلیم موهر-کلمب توسط شرط تسلیم دراگر-پراگر تقریب زده شده است. مدل‌های توسعه یافته دراگر-پراگر برای مدل کردن مواد اصطکاکی

1- Prager-Drucker
2- Eulerian-Lagrangian

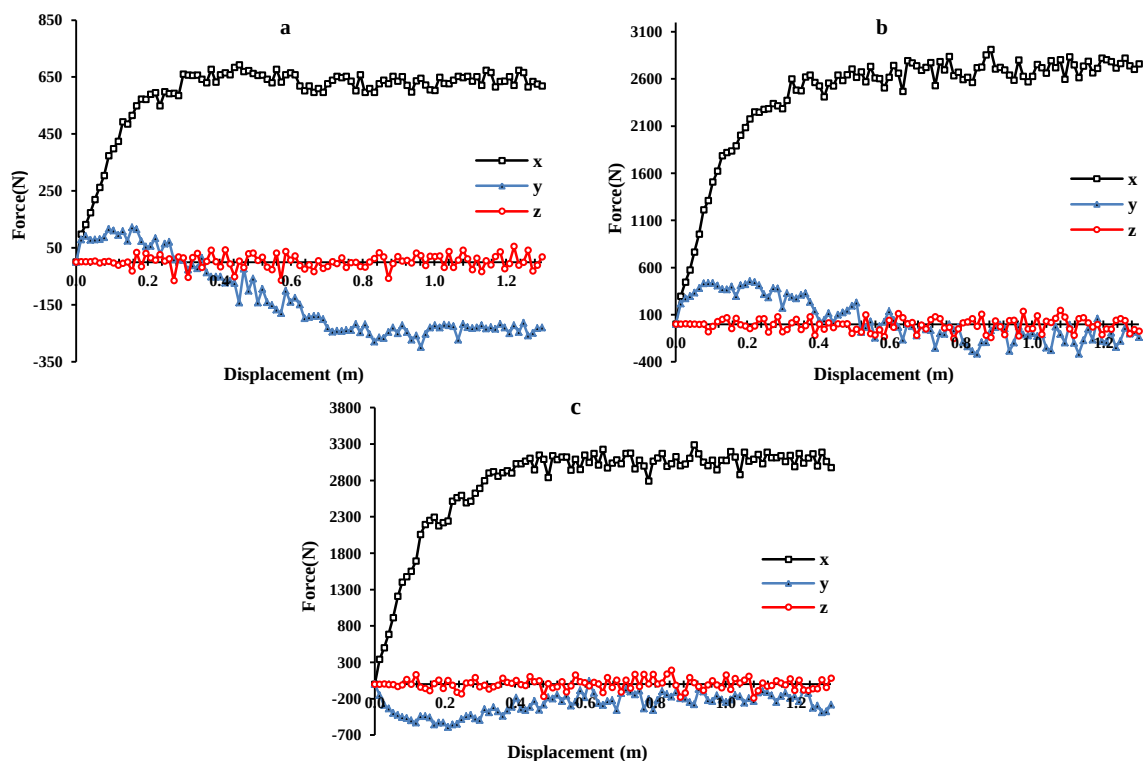


شکل ۳- شبکه‌بندی مدل خاک-پنجه‌غازی در نرم‌افزار آباکوس
Fig. 3. Meshing of soil- tine in ABAQUS software

نتایج و بحث

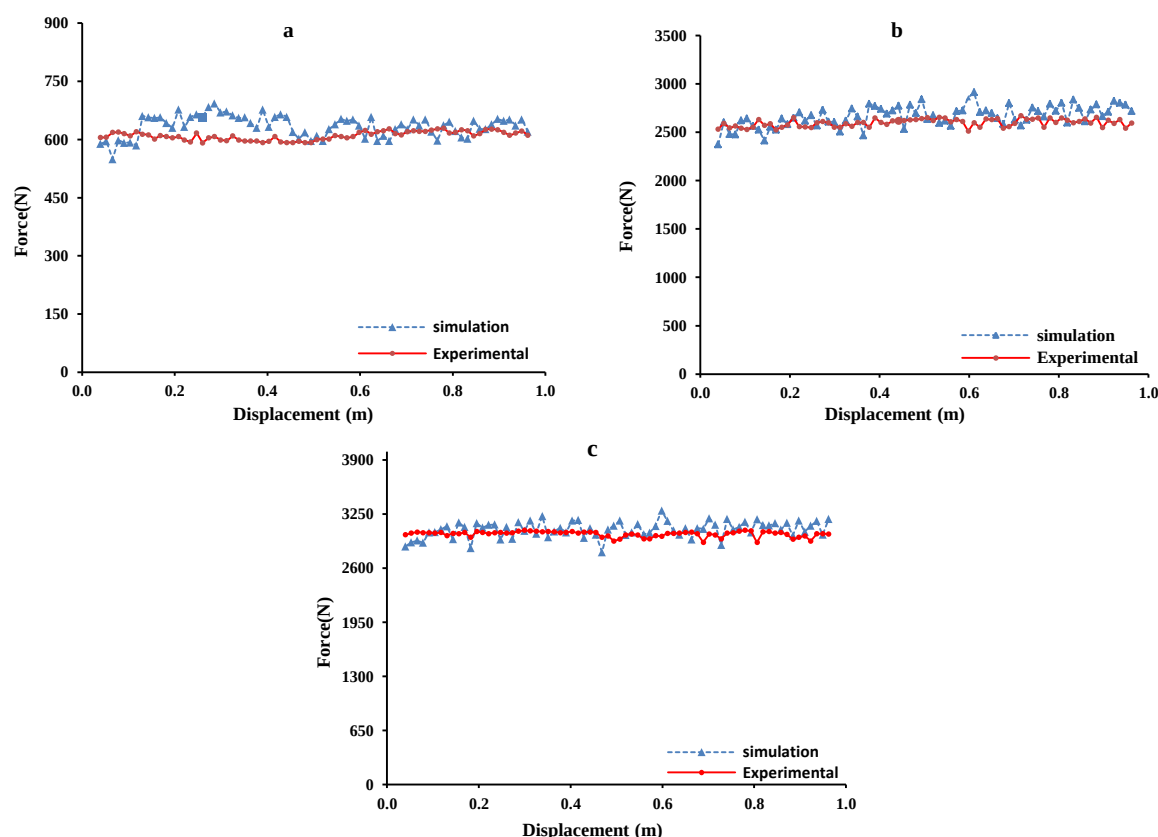
در شبیه‌سازی و سپس مقایسه با آزمون تجربی پرداخته می‌شود. در ادامه نتایج، در مورد اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نتایج تجربی، بررسی کانتورهای توزیع تنش در خاک و در نهایت با توجه به مدل‌سازی هم‌زمان دو تیغه مجاور که امکان بررسی همپوشانی اثر تیغه‌های مجاور را فراهم کرده است، بحث می‌گردد.

فرایند این مطالعه شامل آزمون‌های تجربی و تعیین نیروی کشش پنجه‌غازی در سه سطح عمق کاری است و همه آزمون‌ها در سطح سرعت ۲/۵ کیلومتر بر ساعت انجام گردید. سپس شبیه‌سازی‌های اجزای محدود در تمام شرایط فوق در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. در این بخش، ابتدا به نتایج مربوط به اندازه نیروی کششی مورد نیاز تیغه



شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی به صورت نمودار نیرو-جابجایی در عمق‌های تعریفی شبیه‌سازی: (a) عمق ۶ سانتی‌متر، (b) عمق ۱۰ سانتی‌متر و (c) عمق ۱۴ سانتی‌متر

Fig. 4. Simulation results in the form of force- displacement diagrams at the defined depths of the simulation: a) 6 cm, b) 10 cm and c) 14 cm



شکل ۵- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و تجربی نیرو-جاب‌جایی در راستای حرکت تیغه در عمق‌های: (a) عمق ۶ سانتی‌متر، (b) عمق ۱۰ سانتی‌متر و (c) عمق ۱۴ سانتی‌متر

Fig. 5. Validation of simulation and experimental results of force- displacement in the direction of tine movement at depths: a) 6 cm, b) 10 cm and c) 14 cm

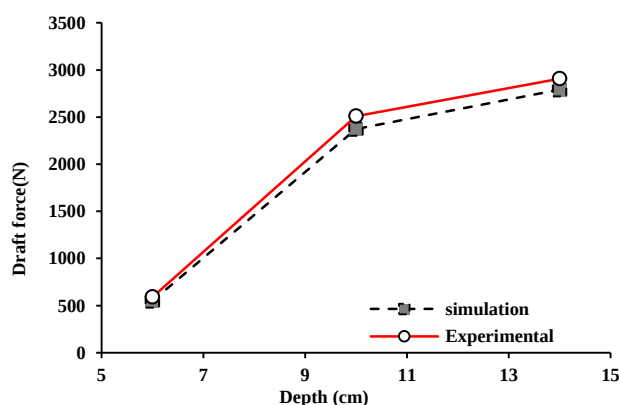
از یک همخوانی منطقی برخوردار است. شکل ۵ نتایج تطبیق شبیه‌سازی و تجربی را به صورت هم‌زمان نشان می‌دهد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان داد که انطباق نسبتاً مناسبی بین آن‌ها برقرار است. محدوده خطای شبیه‌سازی سه عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر نسبت به آزمون‌های تجربی به ترتیب ۷/۳، ۵/۶ و ۴/۱۶ درصد مشاهده شده است. در مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های انبار خاک برای تیغه‌های چیزل، در پژوهشی دیگر بهترین شرایط محدوده خطا را ۱۲-۴ درصد برای سرعت‌های پیشروی ۰/۵-۲/۴ متر بر ثانیه گزارش کرده‌اند (Tamás, Jóri, & Mouazen, 2013). نیروی کشش در شروع حرکت تیغه صفر است و با رسیدن سرعت تیغه به سطح تعیین شده، تقریباً تثبیت شده و در دامنه محدودی قرار می‌گیرد. بر اساس مشاهدات، تغییرات مولفه نیروی وارده بر تیغه در راستای عمود، در عمق‌های بیشتر، مقدار چندانی ندارد و از ثبات بیشتری نیز برخوردار است. در عمق ۶ سانتی‌متر، این نیرو به طرف پایین ظاهر شده است که به نظر می‌رسد به خاطر نرم بودن خاک سطحی، واکنش بین خاک و ابزار، بیشتر

اندازه نیروی کششی هر تیغه بر اساس نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود برای سه عمق کاری ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر در سه راستای متعامد شامل راستای حرکت تیغه، امتداد عمود بر زمین و راستای عرضی در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقدار نیروی کششی با افزایش عمق تیغه، روند افزایشی به خود گرفته است که به دلیل افزایش عمق تیغه و درگیری بیشتر تیغه با حجم خاک بیشتر است. در همین راستا کمترین و بیشترین مقدار نیروی کششی در عمق ۶ و ۱۴ سانتی‌متر ایجاد شده است.

به منظور قابل اعتماد بودن شبیه‌سازی‌های المان محدود، اعتبارسنجی این نتایج در مقایسه با نتایج تجربی در پیش گرفته شد. با توجه به این‌که در آزمون‌های تجربی صرفاً نیروی کشش در راستای حرکت تیغه اندازه‌گیری گردید، مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای نیروی کششی در راستای حرکت به انجام رسیده است. در یک نگرش کلی، نیروی کشش تیغه با آغاز حرکت تیغه، شروع به افزایش داشته و در یک سطح نسبتاً یکنواخت، تثبیت شده است که این روند با شرایط واقعی حرکت تیغه از حالت سکون و افزایش تدریجی نیروی کششی

است که البته با توجه به پیچیدگی فرایند مورد مطالعه، تفاوت بین شبیه‌سازی و نتایج تجربی، کمتر از ۵ درصد و نسبتاً قابل قبول به نظر می‌رسد. مطالعات مشابه، اختلافی در حدود ۱۵ درصد را نیز به‌عنوان نتایج قابل ارائه گزارش کرده‌اند (Shmulevich et al., 2007). از طرفی، نتایج حاکی از آن است با افزایش عمق، مقدار نیروی کشش دارای یک روند افزایشی است و همچنین افزایش نیروی کشش تیغه از عمق ۱۰ cm به عمق ۱۴ cm چندان زیاد نیست که البته این نقطه نظر، در روند کلی ارائه‌شده در منابع دیگر نیز به‌صورت مشابهی گزارش شده است (McKyes, 1985; Mouazen & Neményi, 1999). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده و با احتساب سرعت پیشروی، توان لازم برای کشیده شدن هر تیغه در عمق کاری ۶ تا ۱۴ سانتی‌متر در محدوده ۰/۵-۲/۵ کیلووات است.

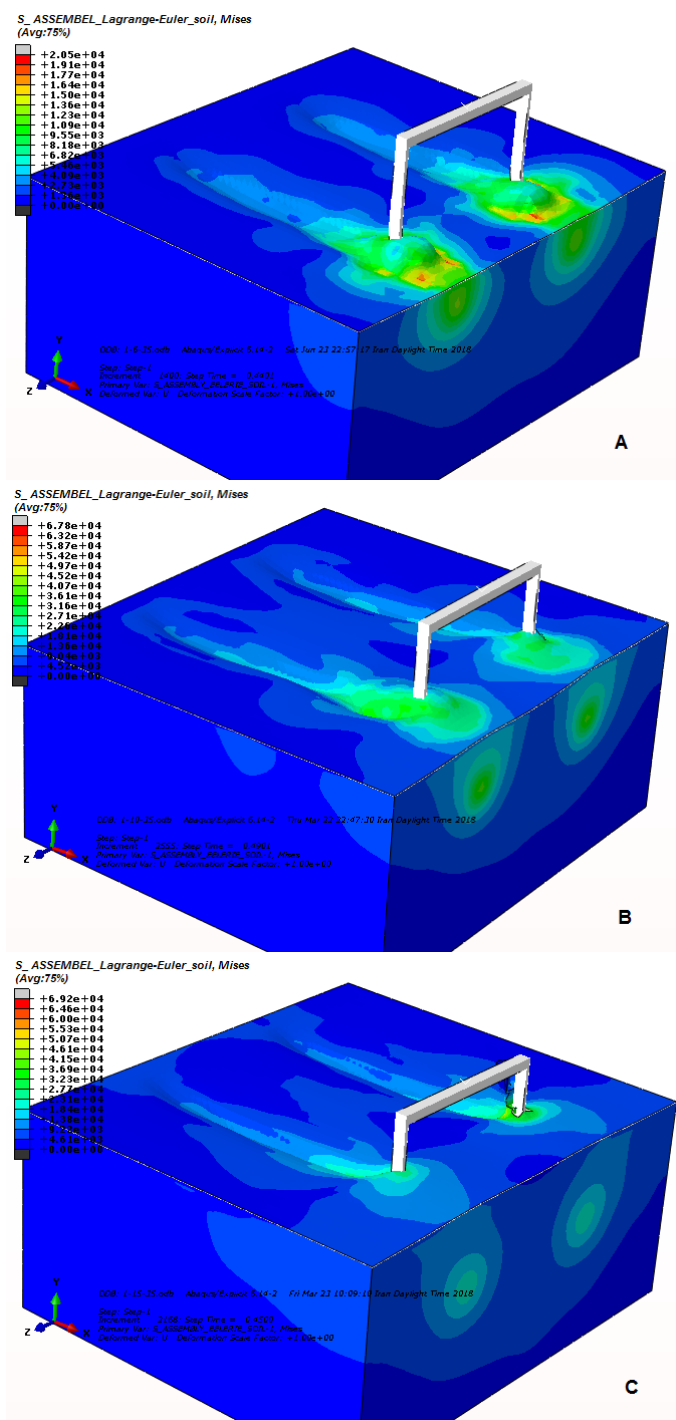
متاثر از وزن خاک است. این در حالی است که در عمق‌های بالاتر در راستای عمودی، بین نیروهای به بالا و به پایین، تعادل نسبی برقرار شده است. این توجیه در برخی مطالعات برهم‌کنش خاک و تیغه نیز مشابه نتایج پژوهش حاضر گزارش شده است (Kešner et al., 2013; Tamás et al., 2021). شکل ۶ مقایسه نتایج نیروی کشش برحسب عمق تیغه در شرایط شبیه‌سازی و آزمون‌های انبار خاک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نتایج، از تطابق نسبتاً خوبی با مشاهدات تجربی برخوردار بودند. البته به‌صورت جزئی در عمق ۱۴ cm تطابق کمتری نسبت به بقیه عمق‌ها دیده شده است. به نظر می‌رسد که در شرایط تجربی با حضور عواملی مانند اینرسی خاک و ملاحظات دینامیکی که در شبیه‌سازی لحاظ نشده‌اند، شرایط دشوارتری برای حرکت تیغه در خاک برقرار بوده و از این‌رو، مقدار نیروی پیش‌بینی شده، کمتر از حالت واقعی است. این تفاوت در عمق‌های بیشتر، قابل ملاحظه‌تر



شکل ۶- تغییرات نیروی کشش در ارتباط با عمق تیغه در شرایط شبیه‌سازی و آزمون‌های انبار خاک
Fig. 6. Traction force changes in relation to tine depth in simulation and soil bin tests

به‌وجود آمده در خاک در سه عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر به‌ترتیب در حدود ۲۰، ۶۸ و ۶۹ کیلوپاسکال مشاهده شده است. افزایش چشمگیر تنش در عمق‌های ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر نسبت به عمق ۶ سانتی‌متر در حالی دیده می‌شود که این دو سطح از عمق کار، تفاوت اندکی را از نظر تنش ایجاد شده با یکدیگر داشته‌اند. به عبارتی، با افزایش عمق کار از ۱۰ به ۱۴ سانتی‌متر با وجود افزایش بدیهی نیروی کششی تیغه، تفاوت چندان از نظر افزایش تنش در خاک دیده نمی‌شود که به نوبه خود، تأییدی بر توصیه به کارگیری پنجه‌غازی‌ها در عمق‌های کاری پایین است. همچنین پوش‌های تنش در عمق ۶ سانتی‌متر تا سطح خاک گسترده شده است و حاکی از گسیختگی سطح خاک است در حالی که در عمق‌های بیشتر و به‌ویژه در عمق ۱۴ سانتی‌متر، پوش‌های تنش در زیر سطح خاک محبوس شده است و به نظر می‌رسد با احتمال ایجاد تراکم در لایه‌های زیرین، هدف ایجاد تخلخل و گسست خاک را با چالش همراه کرده است.

در کنار نتایج مربوط به نیروی کشش تیغه‌ها در اثنای شبیه‌سازی، بررسی نتایج تنش و تغییر شکل در خاک نیز به‌عنوان خروجی‌های دیگر این مطالعه موردبررسی قرار گرفت. شکل ۷ وضعیت پوش‌های تنش را در سه عمق نشان می‌دهد. بررسی اولیه گسترش تنش در خاک حاکی از آن است که با افزایش عمق تیغه در سه سطح عمق موردبررسی، گستره تنش از سطح خاک به عمق آن جابه‌جا شده است. بدین منظور، در حداکثر عمق مورد مطالعه در این پژوهش (۱۴ cm)، تنش در خاک به وضعیت عمق بحرانی تیغه نزدیک شده و شدت انتشار تنش به سطح خاک، کمتر از عمق‌های دیگر است. میزان تنش خاک سطحی با کاهش عمق یعنی عمق ۶ cm کاهش یافته، به‌طوری‌که بیشترین تنش در سطح خاک دیده می‌شود و به بیان دیگر، تغییر شکل بیشتری در سطح خاک پدیدار شده است. راستاهای x، y و z به‌ترتیب راستای حرکت تیغه، راستای عمود بر سطح خاک و راستای عمود بر مسیر حرکت تیغه است. تنش بیشینه



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی به صورت پوش‌های تنش در عمق‌های تعریفی شبیه‌سازی: (A) عمق ۶ سانتی‌متر، (B) عمق ۱۰ سانتی‌متر و (C) عمق ۱۴ سانتی‌متر

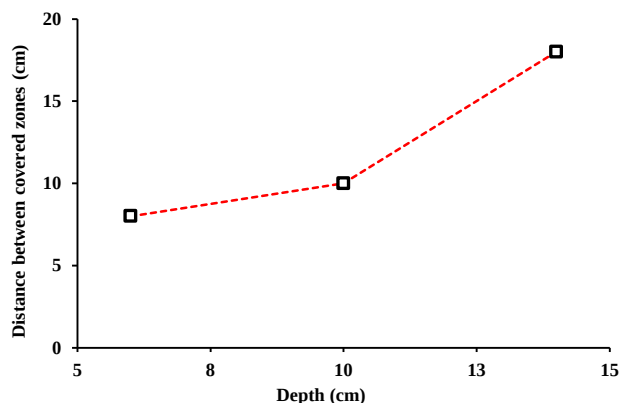
Fig. 7. Simulation results of stress contours at the defined depths of the tine: A) 6 cm, B) 10 cm and C) 14 cm

قابل‌دسترس است. بررسی ابعادی مربوط به همپوشانی تنش در فضای بین دو تیغه مجاور در قالب نمودار در شکل ۸ ارائه شده است.

با توجه به فلسفه کاربردی کولتیواتورها، این موضوع نشان از آن دارد عملکرد بهتر تیغه‌های کولتیواتور، بیشتر در عمق‌های کم

از ۱۰ cm با ایجاد فاصله بیشتر بین ناحیه اثر دو تیغه، گزینه مناسبی نخواهد بود که البته در این میان باید فاصله تیغه‌ها را نیز در نظر داشت.

بر اساس نتایج حاصله با افزایش عمق تیغه، ناحیه همپوشانی به هم‌خوردگی خاک کاهش یافته و نشان می‌دهد که اگر هدف از عملیات خاک‌ورزی، پوشش کامل سطح خاک باشد، عمق‌های بیشتر



شکل ۸- فاصله بین ناحیه تحت تاثیر تیغه‌های مجاور در عمق‌های مختلف
Fig.8. Distance between covered zones of tines in different depths

اساس عمق کار مشاهده گردید. بیشترین شدت گسترش تنش در سطح خاک و همچنین بیشترین تغییر شکل سطحی خاک در عمق ۶ cm مشاهده گردید و با افزایش عمق، هر دو پارامتر تنش و تغییر شکل سطحی خاک کاهش یافت که از این جهت به نظر می‌رسد به کارگیری تیغه‌هایی مشابه تیغه‌های مورد مطالعه، بهتر است تنها در عمق‌های کمتر مدنظر قرار گیرد. ارزیابی همپوشانی ناحیه به هم‌خوردگی خاک در تیغه‌های مجاور نیز، برتری عملکرد تیغه‌ها در عمق‌های کمتر را گواهی می‌نماید.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت مقدار نیروی کشش تیغه‌های درگیر با خاک در کنار عملکرد آن‌ها و همچنین امکان تکیه کردن بر شبیه‌سازی اندرکنش خاک-ابزار، مطالعه حاضر در دو بخش تجربی و شبیه‌سازی به انجام رسیده است. مقایسه تطبیق نتایج شبیه‌سازی برای پیش‌بینی نیروی کششی با نتایج آزمون‌های تجربی منجر به نتایج مطلوبی گردیده است و حداکثر خطای پیش‌بینی نیروی کششی در عمق‌های مختلف ۷/۳ درصد بوده است. انتشار تنش در خاک بر اثر تردد تیغه بر

References

- Asaf, Z., Rubinstein, D., & Shmulevich, I. (2007). Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2): 227-242. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.006>
- Azimi-Nejadian, H., Karparvarfard, S. H., Naderi-Boldaji, M., & Rahmadian-Koushaki, H. (2019). Combined finite element and statistical models for predicting force components on a cylindrical mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, 186, 168-181. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.07.007>
- Birkás, M. (2009). Classic cultivation requirements and the need of reducing climatic damage. *Növénytermelés*, 58(2): 123-134. <https://doi.org/10.1556/novenyterm.58.2009.2.8>
- Busari, M. A., Kukal, S. S., Kaur, A., Bhatt, R., & Dulazi, A. A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(2), 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
- Godwin, R. J., & Spoor, G. 1977. Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(3), 213-228. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(77\)90044-0](https://doi.org/10.1016/0021-8634(77)90044-0)
- Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hamza, E., Maalej, A., & Mouazen, A. M. (2015). Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 2. Experimental validation with soil bin test. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.004>
- Kešner, A., Chotěborský, R., Linda, M., Hromasová, M., Katinas, E., & Sutanto, H. (2021). Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element

- methods and validate by experiment. *Biosystems Engineering*, 209, 125-138. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.012>
8. Kushwaha, R. L., & Shen, J. (1995). Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool. *Transactions of the ASAE*, 38(5), 1315-1319. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=27953>
9. Kushwaha, R. L., & Zhang, Z. X. (1998). Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review. *Journal of Terramechanics*, 35(2), 69-86. [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(98\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(98)00013-5)
10. Liu, Z., Liu, K., Ma, Z., Ni, F., & Gu, L. (2021). Mechanical responses and fracture mechanism of rock with different free surfaces under the chisel pick cutting. *Engineering Fracture Mechanics*, 247, 1-16.
11. Mardani, A., Shahidi, K., & Karim-Maslak, H. (2010). An indoor traction measurement system to facilitate research on agricultural tires. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8(2), 642-646.
12. McKyes, E. (Ed.). (1985). *Soil cutting and tillage*. Elsevier. p 216.
13. Mouazen, A. M., & Neményi, M. (1999). Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 51(1-2), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00015-X)
14. Sadeghnejad, H., & Islami, K. (2006). Comparison of wheat yield by changing the tillage method. *Agricultural Sciences*, 12(1), 103-112. (in Persian).
15. Shao, Y., Xie, Y., Wang, C., Yue, J., Yao, Y., Li, X., ... & Guo, T. (2016). Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dry-land regions of North China. *European Journal of Agronomy*, 81, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.014>
16. Shmulevich, I., Asaf, Z., & Rubinstein, D. (2007). Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil and Tillage Research*, 97(1), 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.009>
17. Smatana, J., Macák, M., & Demjanová, E. (2010). The influence of different tillage practices on soil physical characteristics. *Research Journal of Agricultural Science*, 42(3), 315-319.
18. Tamás, K., Jóri, I. J., & Mouazen, A. M. (2013). Modelling soil-sweep interaction with discrete element method. *Soil and Tillage Research*, 134, 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.001>
19. Ucgul, M., & Saunders, C. (2020). Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, 190, 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.022>
20. Várallyay, G. (2010). The role of soil resilience in sustainable development. *Növénytermelés*, 59 (Supplement): 173-176.



Evaluation of Mechanical and Chemical Parameters of Okra with Chitosan Coating in Nano Packaging Films and Atmospheric Modified Conditions

A. Heydarian¹, E. Ahmadi^{2*}, F. Dashti³, A. Normohammadi⁴

1- M.Sc Student, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Associate Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agricultural, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

4- Ph.D Student, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*- Corresponding Author Email: eahmadi@basu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69257.1027>

Received: 06-03-2021

Revised: 15-07-2021

Accepted: 28-08-2021

Available Online: 30-08-2021

How to cite this article:

Heydarian, A., Ahmadi, E., Dashti, F., & Normohammadi, A. (2022). Evaluation of Mechanical and Chemical Parameters of Okra with Chitosan Coating in Nano Packaging Films and Atmospheric Modified Conditions. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4): 600-612. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69257.1027>

Introduction

The quick deterioration of fruit and vegetables has led researchers to find a solution to increase the shelf life. Foodstuff packaging is a vital technology to maintain freshness, prevent deterioration, and physiological and mechanical damages, and increase the shelf life of fresh products. Employing various post-harvest technologies prevent light, heat, and humidity transmission and control the microorganism activity, thereby reducing the cost and maintaining the quality of fresh and processed products during storage. Fresh okra has a shelf life of 10 days and is stored at 1-10 °C due to high respiration rate and moisture loss. Today, the use of nanotechnology in the packaging industry is developed and expanded. The aim of the packaging is to increase the shelf life and prevent bacterial and shipping damages, as well as control the humidity and gases transmission, thereby reducing food spoilage. Modified atmospheric packaging (MAP) is one of the famous methods for increasing the shelf life of fresh products in which the aging process is reduced by increasing CO₂ and decreasing. Decreasing the respiration rate, producing ethylene, and metabolic reactions in the modified atmosphere lead to a reduction in product deterioration. The use of coatings and edible films is being increased in order to maintain sensitive features like flavors, fragrances, and the appearance of different products and increase the shelf time of fruits and vegetables. Chitosan edible coating is a non-fragrance and non-flavor polysaccharide with a high molecular weight that is widely used because of its antifungal, biological, and biochemical properties. Chitosan is a natural polymer obtained from chitin, which is abundantly found in crustacean shells. The aim of the present study is to evaluate the effect of packaging films and chitosan coating under the modified atmosphere storage condition on qualitative and quantitative parameters of okra during storage.

Materials and Methods

The process of present research was performed in the Laboratory of Mechanical Properties and Rheology of the Biosystem Engineering Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, in 2016. Okra cv. Kano Dwarf was selected due to its short post-harvest life and provided by farms in Kermanshah Province. Okras were handpicked and they were free of any spots, contamination, or decay, with the almost same size and shape, without any mechanical and microbial damage. The treatments of the present study were chitosan covering, modified atmosphere by a gas mixture of 5% O₂ + 10% CO₂ + 85% N₂, three types of packaging films including silicone nano-emulsion (Nano Bespar Aytak Co.), nano-polyethylene, and light polyethylene (LFO200), as well as two temperature levels of 1 ± 4 °C (refrigerator) and 1 ± 25 °C (room temperature). The influence of modified atmospheric treatments, chitosan coatings, and packaging films at two storage temperatures on chemical factors (pH and TSS) and mechanical properties including shear stress (TB), shear force (FB), shear modulus (GK) were evaluated at the end of 12 days of storage in a completely randomized design with a factorial experiment in three replications on Okra.

Results and Discussion

Among the films used, silicon nano emulsion film and chitosan coating were more able to maintain TSS. The pH value decreased due to the control of respiratory rate and corruption under modified atmospheric conditions. The mechanical properties of the samples showed that the shear stress changes of the coated sample were

significantly less than the untreated ones compared to the beginning of the maintenance period. The sample stored at 4°C had less shear force during the storage period than similar specimens at 25°C. The modified atmosphere caused the shear modulus to decrease with increasing storage time compared to the beginning of the storage period.

Conclusion

The results of the present research revealed that silicon nano-emulsion film has a higher capability in preserving the qualitative and quantitative properties of okra compared to other studied films. Between the two studied temperatures, 4°C storage temperature had better performance in preserving qualitative and quantitative properties of the okra compared to 25°C. The controlled atmosphere increases okra's shelf life due to reduced respiration rate. In general, maintenance of the products in a modified atmosphere package preserves the quality of the products and extends their shelf life.

Keywords: Chitosan, Modified atmosphere, Nano packaging film, Okra

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۶۱۲-۶۰۰

بررسی خواص فیزیکوشیمیایی و مکانیکی محصول بامیه تحت پوشش کیتوزان در فیلم‌های بسته‌بندی نانویی و شرایط اتمسفر اصلاح شده

آزاده حیدریان^۱، ابراهیم احمدی^{۲*}، فرشاد دشتی^۳، احمد نور محمدی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

چکیده

تأثیر تیمارهای اتمسفر اصلاح شده ($5\%CO_2 + 10\%O_2 + 85\%N_2$)، پوشش کیتوزان و فیلم‌های بسته‌بندی در دو دمای نگهداری ۴ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر فاکتورهای فیزیکوشیمیایی (pH و TSS) و خواص مکانیکی شامل تنش برشی (TB)، نیروی برشی (FB)، مدول برشی (GK) محصول بامیه در پایان ۱۲ روز از زمان نگهداری تحت آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین تغییرات TSS در نمونه‌های با پوشش فیلم نانو پلی‌اتیلن رخ داد که از ۰/۶ به ۱ افزایش یافته است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب پوشش کیتوزان همراه با فیلم نانو امولسیون در حفظ و تثبیت مواد جامد محلول می‌باشد. تغییرات pH برای نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد کمتر بود، این امر ناشی از کنترل شدت تنفس محصول و ایجاد اتمسفر مطلوب بود. بیشترین pH در فیلم پلی‌اتیلن سبک (۶/۶) و کمترین pH مربوط به فیلم نانو امولسیون سیلیکونی (۶/۴) بود. مقدار pH به دلیل کنترل شدت تنفس و فسادپذیری در شرایط اتمسفر اصلاح شده کاهش یافت. در بررسی خواص مکانیکی مشخص شد که تغییرات تنش برشی نمونه‌های با پوشش نسبت به نمونه‌های بدون پوشش در مقایسه با ابتدای دوره نگهداری بسیار کمتر بود. حداقل تغییرات نیروی برشی مربوط به نمونه‌های با پوشش فیلم پلی‌اتیلن سبک و نمونه‌های با پوشش فیلم نانو امولسیون سیلیکونی به مقدار ۰/۵۷ و ۱/۲۸ درصد گزارش شد و حداکثر تغییرات برای نمونه‌های بدون پوشش فیلم نانو پلی‌اتیلن، ۲۴/۸۵ درصد بود. نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های مشابه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد دارای میزان نیروی برشی کمتری در طول دوره نگهداری بودند. اتمسفر اصلاح شده موجب گردید، مقدار مدول برشی با پایان زمان انبارداری در مقایسه با ابتدای دوره نگهداری از ۲۶۰/۹ کیلوپاسکال به ۲۱۹/۸ کیلوپاسکال کاهش یابد. به‌طور کلی پوشش‌های پلی‌اتیلن و نانو امولسیون سیلیکونی بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی (pH و TSS) و مکانیکی بامیه تأثیری نداشتند و نسبت به روز اول بسته‌بندی کم‌ترین تغییر را ثبت کردند. این نشان می‌دهد که پوشش‌های بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده کیفیت بامیه بسته‌بندی شده را حفظ می‌کنند. بنابراین فیلم‌های نانو امولسیونی، پوشش کیتوزان به همراه اتمسفر اصلاح شده می‌تواند به‌عنوان یک تکنیک بالقوه برای کاربردهای فعال بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: اتمسفر اصلاح شده، بامیه، فیلم بسته‌بندی نانو، کیتوزان

مقدمه

امروزه تقاضای مصرف‌کنندگان برای استفاده از محصولات تازه و

با ارزش غذایی بالا، بدون افزودنی شیمیایی و نگه‌دارنده در حال افزایش است (Caleb, Mahajan, Al-Said, & Opara, 2013). محصولات تازه به دلیل داشتن رطوبت و شدت تنفس بالا پس از برداشت محیط مناسبی برای رشد میکروارگانیسم‌ها هستند (Salarbashi et al., 2013). بامیه یکی از سبزی‌های گرمسیری شناخته‌شده در رژیم غذایی است که عدم کنترل دمایی و رطوبتی پس از برداشت این محصول موجب از دست دادن کیفیت و زردی در آن می‌شود. بامیه محصولی فرازگرا، با شدت تنفس بالا و فسادپذیر است که این وضعیت پس از برداشت تشدید می‌شود. بامیه به دلیل تنفس بالا دارای عمر انبارمانی کوتاهی حدود ۱۰ روز است (Finger,

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
 - ۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
 - ۳- دانشیار گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
 - ۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
- (*)- نویسنده مسئول:
Email: eahmadi@basu.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69257.1027>

گزارش شد (Zahoorullah, Dakshayani, Rani, & Venkateswerlu, 2017). تاثیر بسته‌بندی و شرایط دمایی مختلف بر طول عمر و کیفیت بامیه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت (Ngure, Aguyoh, & Gaoquiong, 2009). بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده باعث افزایش pH، کاهش اسید آسکوربیک و حفظ خصوصیات حسی اسفناج شد و افزایش سطح دی‌اکسید کربن در بسته موجب کاهش افت تازگی محصول گردید (Darani, Fazel, & Keramat, 2015). همچنین نتایج تحقیقاتی نشان داد که میزان رطوبت، مواد جامد محلول، pH و رشد باکتری و قارچی بامیه‌های بسته‌بندی‌شده در فیلم‌های LDPE (پلی‌اتیلن با دانسیته پایین) و پوشش داده‌شده با کیتوزان حفظ شد (Al-Naamani et al., 2018). با توجه به میزان بالای ضایعات محصولات کشاورزی در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، کاهش ضایعات در میوه‌ها و سبزی‌ها برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین استفاده از روش‌های نوین برای نگهداری و بسته‌بندی محصولات کشاورزی امری ضروری است. این پژوهش از این جهت اهمیت دارد که تاکنون تحقیق جامعی در زمینه تأثیر اتمسفر اصلاح‌شده، فیلم‌های بسته‌بندی و پوشش کیتوزان بر روی محصول بامیه در کشور صورت نگرفته است. هدف این بررسی اثر پوشش خوراکی کیتوزان، فیلم‌های بسته‌بندی بر تغییرات مواد جامد محلول، pH و خواص مکانیکی بامیه تحت نگهداری در شرایط اتمسفر اصلاح‌شده است.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

بامیه رقم پاکوتاه کانو به دلیل طول عمر کوتاه پس از برداشت، از مزارع استان کرمانشاه تهیه گردید. بامیه‌ها با دست چیده شدند و سعی شد نمونه‌ها دارای اندازه و شکل یکسان و بدون هیچ آسیب‌دیدگی مکانیکی و میکروبی باشند. تیمارهای این آزمایش شامل پوشش خوراکی کیتوزان، اتمسفر اصلاح‌شده با مخلوط گازهای $5\% \text{CO}_2 + 10\% \text{O}_2 + 85\% \text{N}_2$ سه نوع فیلم بسته‌بندی شامل دو نوع نانویی یکی از جنس نانو امولسیون سیلیکونی تولید شرکت نانو بسپار آیتک با ضخامت ۶۰ میکرون و یک نوع دیگر از جنس نانو پلی‌اتیلن با ضخامت ۴۰ میکرون و یک فیلم معمولی از جنس پلی‌اتیلن سبک (LFO200) با ضخامت ۳۰ میکرون و دو سطح دمایی 1 ± 4 و 1 ± 25 سلسیوس (یخچال) و 25 ± 1 سلسیوس (محیط) بود. جهت اعمال تیمارها ابتدا محلول حاوی کیتوزان با غلظت ۱ درصد جهت پوشش‌دهی به نمونه‌ها تهیه گردید. علت استفاده از کیسه‌های

(Della-Justina, Casali, & Puiatti, 2008). بامیه حاوی ذخایر ارزشمندی از کربوهیدرات‌ها، ویتامین‌ها، مواد معدنی و دارویی است. همچنین سرشار از اسید فولیک، ویتامین A و C است (Fan et al., 2014). در راستای افزایش عمر ماندگاری محصولات تازه، حفظ کیفیت، کاهش تلفات و افزایش ماندگاری محصولات راهکارهایی از جمله استفاده از فناوری اتمسفر اصلاح‌شده، پوشش‌های خوراکی و فیلم‌های بسته‌بندی پیشنهاد می‌شود. استفاده از پوشش‌های خوراکی برای محصولات تازه یک راه برای افزایش عمر محصول، با کاهش تغییرات متابولیکی محصول است. پوشش خوراکی به عنوان لایه نازک از موادی است که برای مصرف‌کننده قابل خوردن بوده و به صورت‌های مختلف استفاده می‌شود و همچنین به عنوان مانعی در مقابل انتقال گازها و بخار آب عمل می‌کند (Wu, Weller, Hamouz, Cuppett, & Schnepf, 2002). امروزه پوشش کیتوزان به دلیل دارا بودن خصوصیتی از قبیل غیرسمی، سازگار با طبیعت و تجدیدپذیر بودن، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. تجزیه‌پذیری، غیر سمی بودن و خاصیت ضد میکروبی و از ویژگی‌های کیتوزان برای توسعه در بسته‌بندی مواد غذایی است (Pereira, De Arruda, & Stefani, 2015). یکی از تکنولوژی‌هایی که نتایج بسیار مطلوبی را در زمینه افزایش ماندگاری محصولات به همراه داشته است. بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده یا به اختصار (MAP)^۱ است. در بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده ترکیب گازی اطراف محصول از حالت معمول تغییر داده می‌شود تا اتمسفری برای افزایش زمان ماندگاری و حفظ کیفیت غذا تهیه شود (Zhuang, Barthm, & Cisneros-Zevallos, 2013). استفاده از فیلم‌های بسته‌بندی نقش مهمی در ایمنی و کیفیت مواد غذایی ایفا می‌کند و مانع فسادپذیری محصول ناشی از شرایط محیطی بیرونی، آلودگی توسط پاتوژن‌ها و میکروارگانیسم می‌شود در نتیجه فرایند پیری و خراب شدن را کاهش و به تأخیر می‌اندازد (Abad, 2014; Grinstead, 2016). مطالعات متعددی در زمینه تأخیر در رسیدن و افزایش عمر انبارمانی میوه‌ها و سبزی‌های تیمار شده با کیتوزان توسط محققین گزارش شده است (Romanazzi, Feliziani, Baños, & Sivakumar, 2017). کارایی فیلم‌های بسته‌بندی LDPE (پلی‌اتیلن با دانسیته پایین) و پوشش داده‌شده با کیتوزان برای حفظ کیفیت بامیه توسط (Al-Naamani, Dutta, & Dobretsov, 2018) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده اثربخشی پوشش‌های نانوکامپوزیتی برای کاهش رشد قارچ و باکتری و حفظ میزان رطوبت، مواد جامد محلول، pH در نمونه‌های بامیه پس از ۱۲ روز ذخیره‌سازی بود. اثر مثبت پوشش کیتوزان بر ویژگی‌های فیزیکی و کیفی بادمجان مانند میزان افت وزن، سفتی، pH و میزان مواد جامد محلول (TSS)

زیپ‌کیپ نانو به دلیل استفاده از پلیمرهای سیلیکونی به کار گرفته در آن می‌باشد زیرا باعث می‌شود که ورود و خروج اکسیژن و دی‌اکسیدکربن کنترل و به حداقل سطح برسد. برای تهیه محلول ۱ درصد، ۱۰ گرم از پودر کیتوزان درون ۵۰ میلی‌لیتر استیک اسید قرار داده شد سپس ۴۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیرشده به آن اضافه گردید. پوشش‌دهی به روش غوطه‌وری انجام گرفت. نمونه‌ها درون محلول کیتوزان غوطه‌ور شدند، سپس از درون محلول خارج گردیدند و به مدت ۲ ساعت در محیط آزاد با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، جهت خشک شدن رطوبت اضافی قرار گرفتند. در نهایت نمونه‌های پوشش‌دهی شده و بدون پوشش به ترتیب درون فیلم‌های بسته‌بندی نانو امولسیون سیلیکونی و نانو پلی‌اتیلنی و فیلم معمولی از جنس پلی‌اتیلن قرار داده شدند و تزریق گاز با مخلوط گازی ذکرشده پس از مکش هوای داخل بسته توسط کپسول گاز تهیه شده از شرکت سپاهان اصفهان انجام پذیرفت. صورت گرفت و پس از دوخت حرارتی جهت نگهداری در محیطی با دمای ۲۵ درجه و درون یخچالی با دمای 4 ± 1 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۵ درصد قرار داده شدند. در دوره‌های زمانی دو روز خواص فیزیکی، مکانیکی و رئولوژیکی نمونه‌ها مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

اندازه‌گیری مواد جامد محلول کل

برای تعیین میزان مواد جامد محلول از دستگاه رفاکتومتر آناگو مدل PAL-1 ساخت کشور ژاپن استفاده گردید. محصول توسط یک رنده دستی آب‌گیری و عصاره آن گرفته شد. مقداری از عصاره محصول روی منشور رفاکتومتر قرار گرفت سپس عدد نمایش داده شده (شاخص بریکس) برحسب درصد قرائت و ثبت گردید (Nourmohammadi, Ahmadi, & Heshmati, 2021). اندازه‌گیری TSS در تمامی نمونه‌ها در سه تکرار انجام گرفت.

اندازه‌گیری pH

برای تعیین pH ابتدا مقدار ۵ گرم از نمونه رنده شده با ۲۰ سی‌سی آب مقطر مخلوط و توسط هاون دستی ساییده شد تا با یکدیگر مخلوط شوند. سپس به مدت ۵ دقیقه با دور ۴۰۰۰ دور در دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ قرار داده شد. pH نمونه‌ها با دستگاه پی‌هاش‌متر مدل PHS-BW ساخت کشور ایتالیا که قبلاً با بافر ۴ و ۷ کالیبره شده بود اندازه‌گیری و الکتروود آن پس از هر بار قرائت عدد به‌دست‌آمده با آب مقطر شست‌وشو شد. اندازه‌گیری pH در در تمامی نمونه‌ها در سه تکرار انجام گرفت.

خواص مکانیکی (آزمون وارنر)

آزمون وارنر یکی از آزمون‌های برشی مواد غذایی است که در آن،

یک تیغه فولادی ضد زنگ بر روی پروب مربوطه نصب شده و با سرعت ثابتی که توسط فک متحرک اعمال می‌شود، عمل برش روی محصول را انجام می‌دهد. به دلیل قابلیت تکرارپذیری خوب نتایج، از این آزمون به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. آزمون وارنر با استفاده از دستگاه تست مواد غذایی (Zowick/roell 14) مجهز به لودسل (X Force Hp nominal Force: 500 N Capacity) ساخت کشور آلمان موجود در آزمایشگاه گروه بیوسیستم دانشگاه بوعلی صورت پذیرفت (شکل ۱). آزمون وارنر یکی از آزمون‌های برشی مواد غذایی است که در آن، یک تیغه فولادی ضد زنگ بر روی پروب مربوطه نصب شده و با سرعت ثابتی که توسط فک متحرک اعمال می‌شود، عمل برش روی محصول را انجام می‌دهد. عمل برش توسط تیغه فولادی بر قسمت میانی بامیه صورت پذیرفت. سرعت آزمون ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه بود. ویژگی‌های بافتی محصول نظیر تنش برشی (TB)، نیروی برشی (FB) و مدول برشی (GK) که برابر است با نسبت تنش برشی به کرنش برشی) توسط نرم‌افزار دستگاه (Test Xpert) در قالب منحنی نیرو-جابجایی رسم گردید (شکل ۲). پارامترهای تنش برشی، نیروی برشی و مدول برشی نیز مستقیماً در قسمت نتایج محیط نرم‌افزار دستگاه تعیین گردیدند. آزمون وارنر برای هر نمونه در سه تکرار صورت پذیرفت.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل آماری، داده‌های حاصل از آزمون‌ها ابتدا با نرم‌افزار Minitab ۱۴ نرمال‌سازی شدند و سپس با نرم‌افزار SAS آنالیز داده‌ها صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون توکی انجام شد و کلیه نمودارها با Excel ۲۰۱۶ رسم شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثرات پوشش، نوع فیلم بسته‌بندی و دوره نگهداری بر روی صفات مورد بررسی بامیه در طول ۱۲ روز دوره نگهداری در دو دمای ۴ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد در جداول ۴ و ۲ آورده شده است. نتایج نشان داد که برخی اثرات اصلی و متقابل بر روی صفات اندازه‌گیری شده در سطح احتمال ۵٪ یا ۱٪ معنی‌دار است.

مواد جامد محلول (TSS)

با توجه به نتایج تجزیه واریانس جدول ۱ مشخص شد که اثر دوره نگهداری، بسته‌بندی و اثر متقابل بسته‌بندی $\times$ دوره نگهداری بر تغییرات مواد جامد محلول در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد از نظر آماری

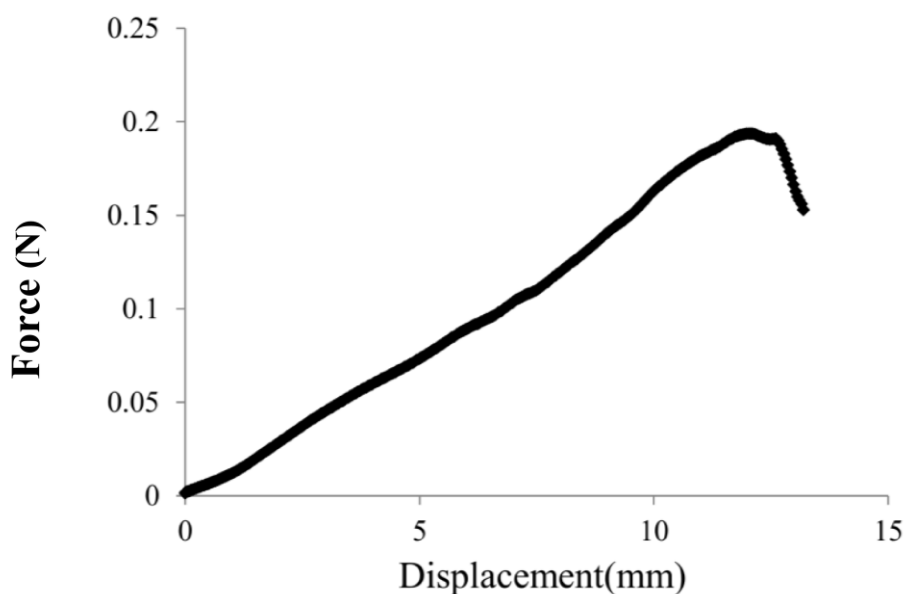
دوازدهم کمترین مقدار تغییرات TSS در مقایسه با روز صفر در نمونه‌های با پوشش بسته‌بندی شده در فیلم نانو امولسیون سیلیکونی ۵/۶ درصد بوده که از مقدار ۱/۵ به ۱ کاهش یافته است و دلیل آن کنترل بهتر تنفس، کاهش تلفات آب‌میوه و تبادلات گازی محصول در طی زمان نگهداری می‌باشد.

در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بودند. اثر متقابل سه‌گانه بسته‌بندی $\times$ پوشش $\times$ دوره نگهداری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). شکل ۳ روند تغییرات TSS در طول دوره نگهداری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. بر اساس آن مقدار TSS در پایان دوره نگهداری در تمام تیمارها به جز نمونه‌های با پوشش فیلم نانو امولسیون سیلیکونی نسبت به روز اول افزایش داشت. در روز



شکل ۱- آزمون وارنر با استفاده از دستگاه تست محوری

Fig. 1. Varner test using axial testing machine



شکل ۲- منحنی نیرو- جابه‌جایی که توسط دستگاه تست محوری رسم شده است

Fig. 2. The force-displacement curve drawn by an axial testing machine

جدول ۱- تجزیه واریانس خواص کیفی و کمی بامیه تحت اتمسفر اصلاح شده در دمای ۲۵°C تا مدت ۱۲ روز**Table 1-** Variance analysis of qualitative and quantitative properties of okra under modified atmosphere at 25°C until 12th day

Variations sources منابع تغییرات	DF	TSS مواد جامد محلول	PH اسیدیته	TB (N mm ⁻²) تنش برشی	FB (N) نیروی برشی	GK (kpa) مدول برشی
Packaging بسته‌بندی	2	0.26 ^{ns}	0.13 ^{**}	11785 ^{**}	829.4 ^{**}	145762 ^{**}
Coating پوشش	1	0.79 ^{ns}	0.00 ^{ns}	3893 ^{ns}	4.6 ^{ns}	30169 [*]
Period دوره زمانی	6	0.20 ^{ns}	1.70 ^{**}	3342 [*]	355.4 ^{**}	20040 ^{**}
Packaging × Coating بسته‌بندی × پوشش	2	0.54 ^{ns}	0.01 ^{ns}	1291 ^{ns}	119.5 ^{ns}	2142 ^{ns}
Packaging × Period بسته‌بندی × دوره	12	0.30 ^{ns}	0.03 ^{**}	3589 ^{**}	152.7 ^{ns}	10354 ^{**}
Coating × Period پوشش × دوره	6	0.217 ^{ns}	0.07 ^{**}	3331 [*]	96.4 ^{ns}	1313 ^{ns}
Packaging × Coating × Period بسته‌بندی × پوشش × دوره	12	0.24 ^{ns}	0.04 ^{**}	5548 [*]	87.3 ^{ns}	5727 ^{ns}
Error خطا	82	0.23	0.01	1433	107.6	3383

Notes: * Significant at $p \leq 0.05$, ** Significant at $p \leq 0.01$, and ns not significant.**جدول ۲- تجزیه واریانس خواص کیفی و کمی بامیه تحت اتمسفر اصلاح شده در دمای ۴°C تا مدت ۱۲ روز****Table 2-** Variance analysis of qualitative and quantitative properties of okra under modified atmosphere at 4 °C until 12th day

Variations sources منابع تغییرات	DF	TSS مواد جامد محلول	PH اسیدیته	TB (N mm ⁻²) تنش برشی	FB (N) نیروی برشی	GK (kpa) مدول برشی
Packaging بسته‌بندی	2	0.323 ^{**}	0.072 ^{ns}	13882 ^{**}	567.61 ^{**}	19372 ^{**}
Coating پوشش	1	0.005 ^{ns}	2.608 ^{**}	9620 ^{**}	130.7 ^{ns}	6548 ^{ns}
Period دوره زمانی	6	0.138 ^{**}	2.401 ^{**}	3212 ^{ns}	1149.85 ^{**}	11716 ^{**}
Packaging × Coating بسته‌بندی × پوشش	2	0.043 ^{ns}	0.004 ^{ns}	18 ^{ns}	125.77 ^{ns}	823 ^{ns}
Packaging × Period بسته‌بندی × دوره	12	0.087 ^{**}	0.917 ^{**}	2177 ^{ns}	940.76 ^{ns}	2135 ^{ns}
Coating × Period پوشش × دوره	6	0.033 ^{ns}	1.664 ^{**}	5193 ^{**}	262.53 ^{ns}	14492 ^{**}
Packaging × Coating × Period بسته‌بندی × پوشش × دوره	12	0.044 [*]	0.433 ^{ns}	4018 ^{**}	853.56 ^{ns}	3058 ^{ns}
Error خطا	82	0.020	0.265	1619	4245.28	3960

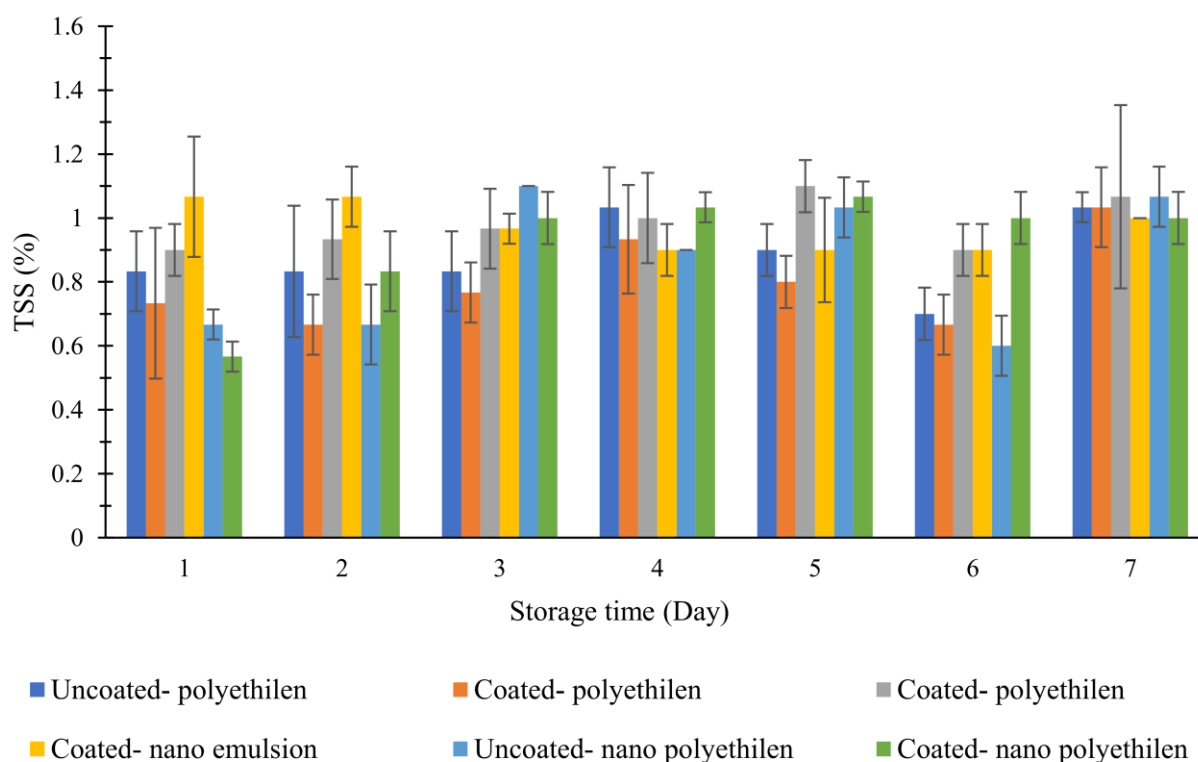
* Significant at $p \leq 0.05$, ** Significant at $p \leq 0.01$, and ns not significant.

نانو پلی‌اتیلن رخ داد که از ۰/۶ به ۱ افزایش یافته است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب پوشش کیتوزان همراه با فیلم نانو

همچنین با کنترل فعالیت‌های متابولیکی زمان رسیدگی محصول به تأخیر افتاد. بیشترین تغییرات TSS در نمونه‌های با پوشش فیلم

میوه گواوا به دلیل کند کردن سرعت تنفس و فعالیت‌های متابولیکی را گزارش کردند (Hong, Xie, Zhang, Sun, & Gong, 2012). النعمانی و همکاران (Al-Naamani et al., 2018) گزارش دادند که مقدار کل مواد جامد محلول در نمونه‌های بامیه در طی دوره نگهداری افزایش یافت. همچنین مقدار TSS در نمونه‌های با پوشش نانوکامپوزیت کیتوزان پس از ۱۲ روز ذخیره‌سازی، به‌طور قابل‌توجهی نسبت به نمونه شاهد پایین‌تر بود که با نتایج تحقیق مطابقت داشت. در همین راستا (Gholammipour Fard, Kamari, 2010) گزارش دادند که پوشش کیتوزان تأثیر معنی‌دار بر حفظ مواد جامد محلول فلفل داشت.

امولسیون در حفظ و تثبیت مواد جامد محلول می‌باشد درحالی‌که به علت عملکرد پایین فیلم نانو پلی‌اتیلن تأثیر پوشش کیتوزان در حفظ مواد جامد محلول از بین رفته و به دلیل هضم پلی ساکاریدهای دیواره سلولی این فاکتور افزایش یافته است. جدول ۲ تجزیه واریانس بیانگر آن است که هیچ‌یک از تیمارهای بسته‌بندی و پوشش و دوره و اثرات متقابل آن‌ها تفاوت معنی‌داری بر مواد جامد محلول نمونه‌های دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نداشته است (جدول ۲). می‌توان بیان کرد مواد جامد محلول به دلیل کنترل میزان تنفس در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بهتر از دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد حفظ شده است. نتایج مشابهی از تأثیر پوشش کیتوزان بر کاهش روند افزایش مواد جامد محلول در



شکل ۳- تغییرات Tss در طول نگهداری در دمای ۲۵ °C
Fig. 3. The changes of TSS during storage at 25 °C

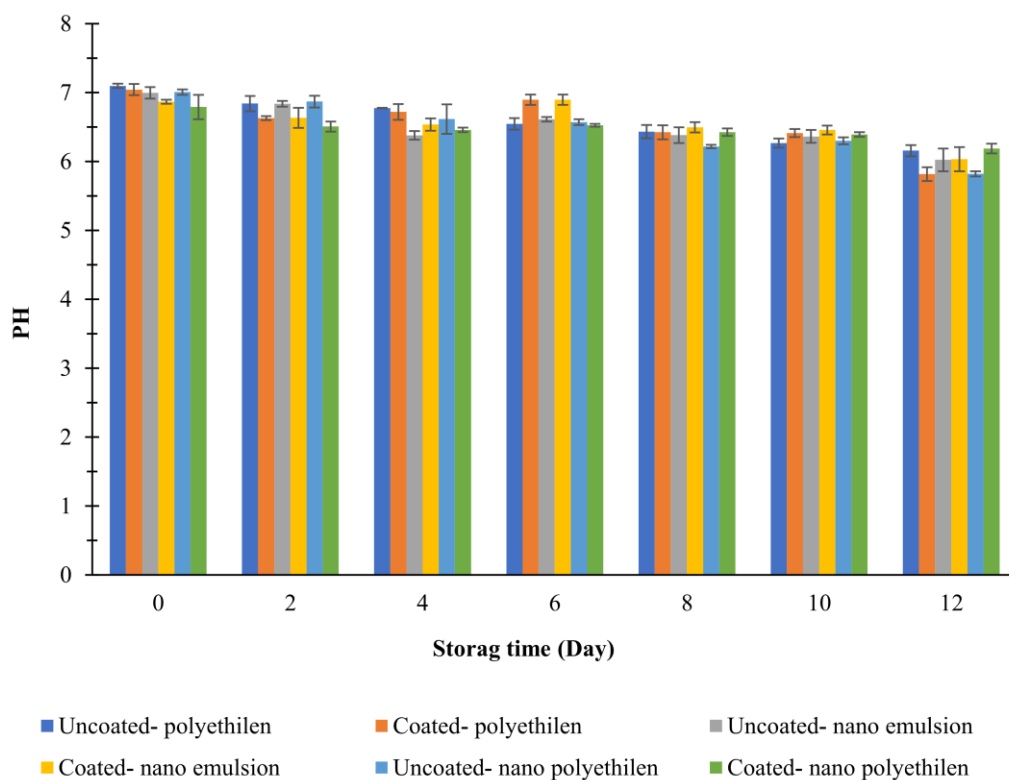
درجه سانتی‌گراد دارای اثر معنی‌دار در سطح ۱ درصد بود. در طی دوره نگهداری تغییرات pH تمام تیمارها و اثرات متقابل آن‌ها روند کاهشی داشت. تغییرات pH برای نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد کمتر بود این امر ناشی از کنترل شدت تنفس محصول و ایجاد اتمسفر مطلوب بود. مقدار pH نهایی برای دمای ۲۵ و ۴ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۶ و ۶/۲ مشاهده گردید. اثر اصلی بسته‌بندی نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین سه فیلم بسته‌بندی می‌باشد. بدین شکل که بیشترین pH در فیلم پلی‌اتیلن سبک ۶/۶ و کمترین pH مربوط به فیلم نانو امولسیون سیلیکونی ۶/۴ بود. نتایج

تغییرات pH

مطابق جداول ۱ و ۲ تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای بسته‌بندی، دوره نگهداری و اثرات متقابل دوگانه بسته‌بندی × دوره و پوشش × دوره برای هر دو دمای ۴ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر pH نهایی محصول در سطح احتمال ۹۹٪ معنی‌دار بود ($P < 0/01$). اثر اصلی پوشش در دمای ۴ درجه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد درحالی‌که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین اثر متقابل سه‌گانه بسته‌بندی × پوشش × دوره در دمای ۲۵

می‌یابد اما استفاده از کیتوزان می‌تواند مانع افزایش pH گردد (Ghasemnezhad, Shiri, & Sanavi, 2010). همچنین نفوذپذیری پایین فیلم نانو امولسیون سیلیکونی نسبت به دو فیلم دیگر هم مانند پوشش کیتوزان از عوامل مؤثر در کاهش pH و به دنبال آن کنترل فسادپذیری و به تأخیر انداختن تغییرات کیفی در طول دوره نگهداری شده است. نتایج تحقیق (Babarinde & Fabunmi, 2009) در بررسی اثر بسته‌بندی و دمای ذخیره‌سازی بر روی کیفیت عمر قفسه‌ای بامیه کاهش میزان pH از ۶/۷ به ۵/۵ را نشان داد که با این نتایج مطابقت دارد. طباطبایی و همکاران (Tabatabai Color, 2016) تأخیر تغییرات pH گوچه در ترکیب گازی و پوشش مناسب را گزارش نمودند.

مقایسه میانگین اثرات متقابل سه گانه بسته‌بندی $\times$ پوشش $\times$ دوره در شکل ۴ نشان داده شده است و بیانگر آن است که مقدار pH در تمام تیمارها کاهش یافته و بیشترین مقدار در پایان دوره نگهداری مربوط به نمونه بدون پوشش پلی اتیلن سبک ۶/۲ و کمترین مقدار در نمونه با پوشش همین فیلم و نمونه بدون پوشش فیلم نانو امولسیون سیلیکونی ۵/۸ می‌باشد. افزایش pH نشان‌دهنده رسیدگی و فاسدشدن، به دلیل تنفس بالا و مصرف بیشتر اسیدهای آلی محصول در طی دوره نگهداری می‌باشد. در پژوهش حاضر پایین بودن pH در نمونه پوشش داده شده نسبت به نمونه بدون پوشش نشان‌دهنده تأثیر مثبت پوشش کیتوزان در کاهش تنفس محصول، کنترل فسادپذیری، حفظ کیفیت و به دنبال آن افزایش ماندگاری محصول است. نتایج حاکی از آن است که در طول دوره نگهداری pH محصول افزایش



شکل ۴- تغییرات pH در طول نگهداری در دمای ۲۵ °C

Fig. 4. The changes of pH during storage at 25 °C

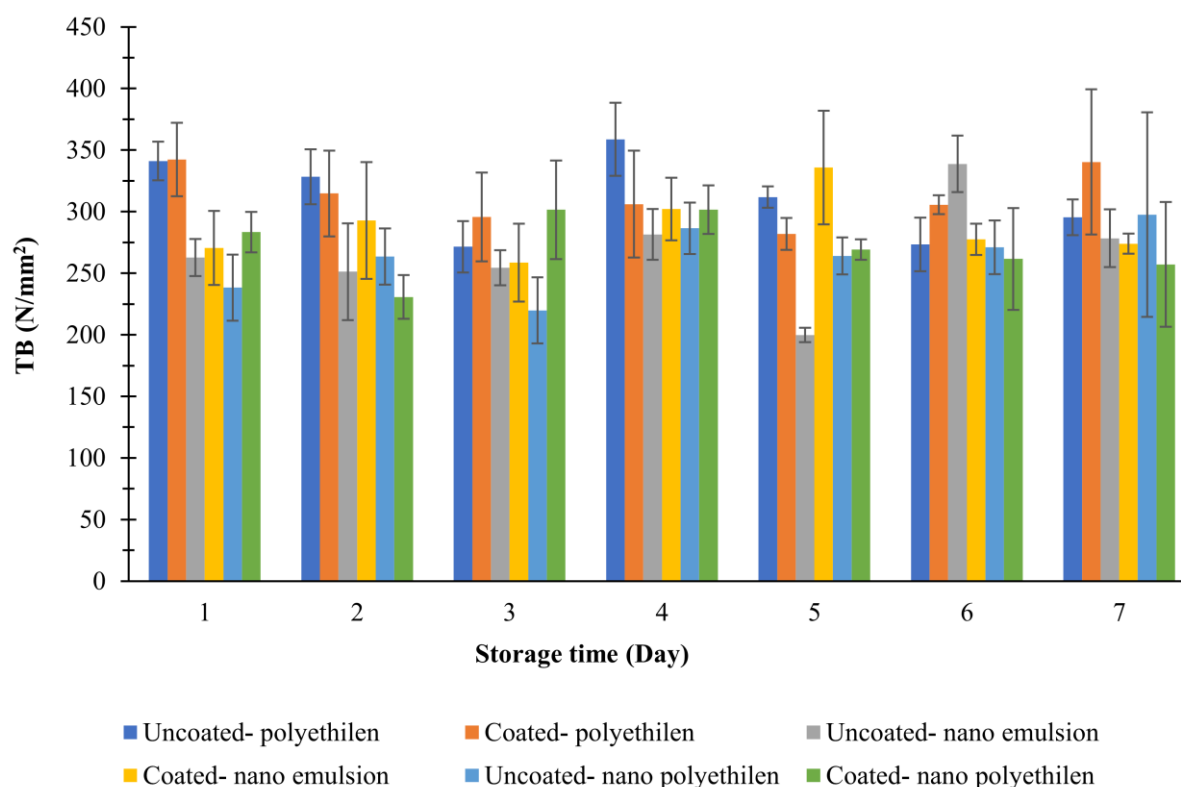
و (۲۸۵ (kpa) مشاهده گردید. اثر اصلی دوره هم بر تغییرات تنش برشی و هم بر تغییرات مدول برشی دارای تأثیر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد بود که تنش برشی روند مشخصی در طول دوره نگهداری نداشت و از ۲۹۱/۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع در ابتدای دوره نگهداری به بیشترین میزان ۳۰۸/۸ نیوتن بر میلی‌متر مربع در روز آخر رسیده است. این در حالی است که مدول برشی کاهش یافت. اثر

نتایج تنش برشی، نیروی برشی و مدول برشی

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس آزمون وارنری تیمارها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد که با توجه به آن اثر اصلی بسته‌بندی بر هر سه پارامتر تنش برشی، نیروی برشی و مدول برشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. در نمونه‌های فیلم پلی اتیلن سبک بیشترین تنش برشی و مدول برشی با مقادیر $(30.5 \text{ (N mm}^{-2})$

مقایسه با ابتدای دوره نگهداری بسیار کمتر می‌باشد. روند تغییرات تنش برشی در شکل ۵ نشان داده شده است. بین تمام تیمارها، حداقل تغییرات نیروی برشی مربوط به نمونه‌های با پوشش فیلم پلی‌اتیلن سبک و نمونه‌های با پوشش فیلم نانو امولسیون سیلیکونی ۰/۵۷ و ۱/۲۸ درصد می‌باشد. که دلیل آن تغییرات کم در بافت و اجزای دیواره سلولی شامل سلولز و پکتین است. حداکثر تغییرات برای نمونه‌های بدون پوشش فیلم نانو پلی‌اتیلن ۲۴/۸۵ درصد می‌باشد. که علت آن را نفوذپذیری و شدت تنفس بالا و افزایش از دست‌دهی رطوبت محصول طی زمان انبارداری توجیه کرد.

اصلی پوشش تنها بر پارامتر مدول برشی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است. از بین اثرات متقابل اثر دوگانه بسته‌بندی × دوره و پوشش × دوره به ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد دارای تأثیر معنی‌دار بر تنش برشی بودند. همچنین اثر متقابل سه‌گانه بسته‌بندی × پوشش × دوره از نظر آماری در سطح ۵ درصد بر تنش برشی معنی‌دار شد. بررسی اثر سه‌گانه بسته‌بندی × پوشش × دوره نشان داد روند تغییرات مشخصی برای تیمارها وجود ندارد به طوری که در بعضی روزها افزایشی و در بعضی روزها کاهشی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد تغییرات تنش برشی نمونه‌های با پوشش نسبت به نمونه‌های بدون پوشش در



شکل ۵- تغییرات TB (تنش برشی) در طول نگهداری در دمای ۲۵°C

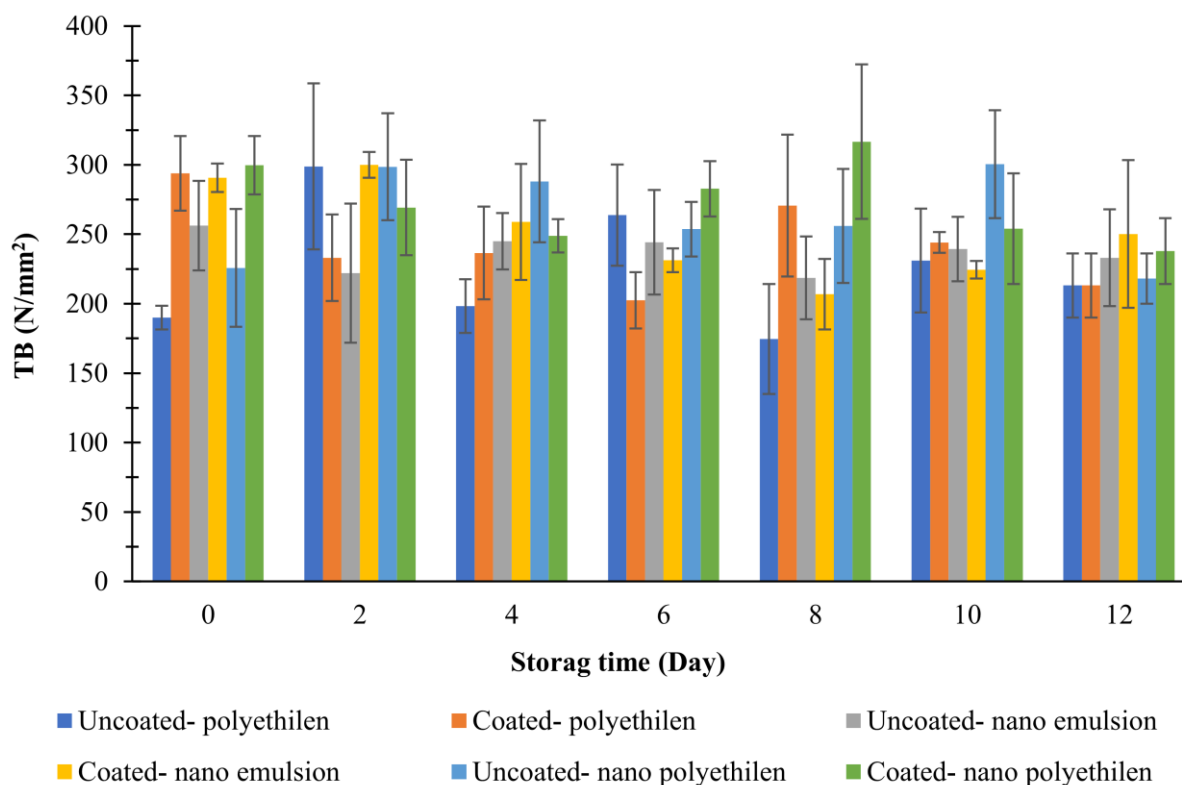
Fig. 5. The changes of TB during storage at 25°C

برشی در طول دوره نگهداری روند کاهشی داشته است که نیروی برشی از مقدار ۶۵/۸ به ۵۷/۹ در انتهای دوره نگهداری رسیده است. همچنین مقدار مدول برشی با گذشت زمان از ۲۶۰/۹ کیلوپاسگال به ۲۱۹/۸ کیلوپاسگال کاهش یافته است. اثر اصلی پوشش تنها بر پارامتر تنش برشی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است. از بین اثرات متقابل اثر دوگانه پوشش × دوره در سطح ۱ درصد دارای تأثیر معنی‌دار بر تنش برشی و مدول برشی بود. نتایج نشان داد کمترین و بیشترین مقدار مدول برشی در تیمارهای با پوشش ۳۰۰/۲ و ۱۸۶/۹ کیلوپاسگال می‌باشد. به طور کلی مقدار مدول برشی در نمونه‌های با

با توجه به نتایج جدول ۲ تجزیه واریانس آزمون وارنری تیمارها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد اثر اصلی بسته‌بندی بر هر سه پارامتر تنش برشی، نیروی برشی و مدول برشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. میانگین اثر اصلی فیلم نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین سه نوع بسته‌بندی وجود دارد که در نمونه‌های فیلم نانو پلی‌اتیلن بیشترین مقدار فاکتورهای تنش برشی و نیروی برشی مشاهده گردید و حداکثر مقدار مدول برشی مربوط به نمونه‌های فیلم پلی‌اتیلن سبک بود. اثر اصلی دوره بر تغییرات نیروی برشی و مدول برشی دارای تأثیر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد بود. تغییرات نیروی برشی و مدول

آزمایش‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی و همچنین مسئول نرم کردن میوه هستند، نقش دارد. استفاده از کیتوزان با سایر روش‌های نگهداری از جمله اتمسفر اصلاح‌شده کارایی بیشتری در مقایسه با استفاده از پوشش کیتوزان به‌تنهایی وجود دارد. به‌طوری‌که به‌عنوان یک مانع در برابر انتقال گاز فعالیت می‌کند (Yu & Ren, 2013). همچنین در پژوهشی قیصریگی و همکاران (Gheysarbighi et al., 2014)، اثر کیتوزان بر حفظ کیفیت و انبارمانی لیموشیرین را مورد بررسی قرار دادند، که نتایج آن با نتایج تحقیق مطابقت دارد. سفتی محصول به میزان تبخیر، تعرق، تنفس و در نتیجه از دست دادن آب بستگی دارد. در دمای پایین سرعت فرآیندهای ذکر شده کاهش یافته در نتیجه سرعت رسیدگی و پیری در محصول به تأخیر افتاده و بافت محصول بهتر حفظ می‌شود.

پوشش بیشتر از نمونه‌های بدون پوشش می‌باشد. اثر متقابل سه‌گانه بسته‌بندی × پوشش × دوره از نظر آماری در سطح ۵ درصد بر تنش برشی معنی‌دار شد. با توجه به مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه بسته‌بندی × پوشش × دوره، به‌جز نمونه بدون پوشش فیلم پلی‌اتیلن سبک مقدار تنش برشی همه نمونه‌ها در روز آخر نگهداری افزایش داشته است. بیشترین تغییر تنش برشی در نمونه‌های بدون پوشش، مربوط به نمونه‌های فیلم نانو امولسیون سیلیکونی ۹/۰۴ درصد و در نمونه‌های با پوشش، مربوط به فیلم نانو پلی‌اتیلن ۲۰/۶۱ درصد می‌باشد. به‌طور کلی میزان تنش برشی در نمونه‌های بدون پوشش فیلم نانو امولسیون کمترین مقدار را داشت که روند تغییرات در شکل ۶ نشان داده شده است. کیتوزان در کاهش فعالیت آنزیم‌های بتا-گالاکتوزیداز، پلی‌گالاکتوروناز و پکتین متیل استراز که مهم‌ترین



شکل ۶- تغییرات TB (تنش برشی) در طول نگهداری در دمای ۴°C

Fig. 6. The changes of TB during storage at 4°C

گردید. مقدار pH در شرایط اتمسفر اصلاح‌شده کاهش یافت. تغییرات تنش برشی نمونه‌های با پوشش به‌خصوص فیلم نانو امولسیون نسبت به نمونه‌های بدون پوشش در مقایسه با ابتدای دوره نگهداری بسیار کمتر می‌باشد. به‌طور کلی از داده‌های به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که بهترین شرایط نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با پوشش کیتوزان و در بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده می‌باشد که

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده عملکرد مناسب پوشش کیتوزان، فیلم‌های بسته‌بندی و اتمسفر اصلاح‌شده در حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری محصول بود. مقدار مواد جامد محلول در تیمارهای مورد استفاده از فناوری اتمسفر اصلاح‌شده همراه با پوشش کیتوزان حفظ

بدین وسیله از دانشگاه بوعلی سینا که در تأمین مالی هزینه‌های این پژوهش ما را یاری نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

باعث افزایش زمان ماندگاری با حفظ خصوصیات کیفی محصول می‌شود.

سیاسگزاری

References

1. Abad, M. A. (2014). *Development of silver based antimicrobial films for coating and food packaging applications*. Ph.D. Thesis, University of Valencia, Valencia, Spain.
2. Al-Naamani, L., Dutta, J., & Dobretsov, S. (2018). Nanocomposite Zinc Oxide-Chitosan Coatings on Polyethylene Films for Extending Storage Life of Okra (*Abelmoschus esculentus*). *Nanomaterials*, 8(7), 479-492. <https://doi.org/10.3390/nano8070479>
3. Babarinde, G. O., & Fabunmi, O. A. (2009). Effects of packaging materials and storage temperature on quality of fresh okra (*Abelmoschus esculentus*) fruit. *Agricultura Tropica Et Subtropica*, 42(4), 151-156.
4. Caleb, O. J., Mahajan, P. V., Al-Said, F. A. J., & Opara, U. L. (2013). Modified Atmosphere Packaging Technology of Fresh and Fresh-cut Produce and the Microbial Consequences-A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 303-329. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0932-4>
5. Darani, S., Fazel, M., & Keramat, J. (2015). Investigation of the impact of atmospheric packaging on some physicochemical properties of spinach during storage. *Journal of Modern Nutrition Sciences and Technologies*, 3, 67-69. <https://doi.org/10.22104/JIFT.2014.43>
6. Fan, S., Zhang, Y., Sun, Q., Yu, L., Li, M., Zheng, B., & Huang, C. (2014). Extract of okra lowers blood glucose and serum lipids in high-fat diet-induced obese C57BL/6 mice. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 25(7), 702-709. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2014.02.010>
7. Finger, F. L., Della-Justina, M. E., Casali, V. W. D., & Puiatti, M. (2008). Temperature and modified atmosphere affect the quality of okra. *Scientia Agricola*, 65(4), 360-364.
8. Ghasemnezhad, M., Shiri, M. A., & Sanavi, M. (2010). Effect of chitosan coatings on some quality indices of apricot (*Prunus armeniaca* L.) during cold storage. *Environmental Science*, 8, 25-33.
9. Gheysarbigi, Sh., Ramin, A. A., & Amini, F. (2014). Effect of chitosan coating on fruit quality and storage life of sweet lime (*Citrus limetta*). *Journal of Crop Production and Processing*, 5, 153-162. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.18.153>
10. Gholammipour Fard, K., Kamari, S., Ghasemnezhad, M., & Ghazvini, R. F. (2010). Effect of chitosan coating on weight loss and postharvest quality of green pepper. *Acta Horticulturae*, 877, 821-826. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.109>
11. Grinstead, D. (2016). *Antimicrobial food packaging: Breakthroughs and benefits that impact food safety*. In Proceedings of the International Association for Food Protection (IAFP) Annual Meeting, St. Louis, MO, USA, 31.
12. Hong, K., Xie, J., Zhang, L., Sun, D., & Gong, D. (2012). Effects of chitosan coating on postharvest life and quality of guava (*Psidium guajava* L.) fruit during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 144, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.07.002>
13. Ngure, J. W., Aguyoh, J. N., & Gaoquiong, L. (2009). Interactive effects of packaging and storage temperatures on the shelf-life of okra. *ARNP Journal of Agricultural and Biological Science*, 4, 44-49.
14. Nourmohammadi, A., Ahmadi, E., & Heshmati, A. (2021). Optimization of physicochemical, textural, and rheological properties of sour cherry jam containing stevioside by using response surface methodology. *Food Science and Nutrition*, 9(5), 2483-2496. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2192>
15. Pereira, V. A., De Arruda, I. N. Q., & Stefani, R. (2015). Active chitosan/PVA films with anthocyanins from Brassica oleraceae (Red Cabbage) as time-temperature indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids* 43: 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.014>
16. Romanazzi, G., Feliziani, E., Baños, S. B., & Sivakumar, D. (2017). Shelf life extension of fresh fruit and vegetables by chitosan treatment. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57, 579-601. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.900474>
17. Salarbashi, D., Tajik, S., Ghasemlou, M., Shojaei-Aliabadi, S., Shahidi Noghabi, M., & Khaksar, R. (2013). Characterization of soluble soybean polysaccharide film incorporated essential oil intended for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 98, 1127-1136. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.031>
18. Tabatabai Color, R., Ebrahimian, A., & Hashemi, J. (2016). The effect of temperature, packaging type and modified atmosphere on the qualitative characteristics of tomato. *Food Science and Technology*, 13(51), 1-13.
19. Wu, Y., Weller, C. L., Hamouz, F., Cuppett, S. L., & Schnepf, M. (2002). *Development and application of multicomponent edible coatings and films: A review*.
20. Yu, Y., & Ren, Y., (2013). Effect of chitosan coating on preserving character of post-harvest fruit and vegetable: a review. *Journal of Food Processing and Technology*, 4(8). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000254>

21. Zahoorullah, S. M., Dakshayani, L., Rani, A. S., & Venkateswerlu, G. (2017). Effect of chitosan coating on the physicochemical characteristics of brinjal quality during storage. *Journal of Advances in Biology and Biotechnology*, 13(3), 1-9. <https://doi.org/10.9734/JABB/2017/34733>
22. Zhuang, H., Barthm, M. M., & Cisneros-Zevallos, L. (2013). Modified atmosphere packaging for fresh fruits and vegetables. *Innovation in Food Packaging*, 445-464.



Economic Analysis and Evaluation of Grain Losses of Two Common Straw Collecting Combine Harvester: A Case Study, Azna County, Lorestan, Iran

H. Amiri¹, A. Asakereh^{2*}, M. Soleymani²

1- MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

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

(*- Corresponding Author Email: A.asakereh@scu.ac.ir)<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70758.1045>

Received: 01-06-2021

Revised: 28-07-2021

Accepted: 08-08-2021

Available Online: 10-08-2021

How to cite this article:

Amiri, H., Asakereh, A., & Soleymani, M. (2022). Economic Analysis and Evaluation of Grain Losses of Two Common Straw Collecting Combine Harvester: A Case Study, Azna County, Lorestan, Iran. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 613-626. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.70758.1045>

Introduction

Wheat, is the most important crop in the world. In Iran, wheat is the most important and strategic agricultural crop, due to its vital role in providing food and feeding livestock. Because wheat harvesting operation has a significant share of total grain losses, it is considered as the most important and sensitive stage of production. Recently, in Iran, the need for straw to feed livestock has increased sharply, and since wheat is the main source of straw production, changes have been made in the configuration of the grain combine harvester so that in addition to collecting grain, it can crush and collect straw. These combine harvesters are known as straw collecting combine harvesters. The growing need for straw, along with the high cost and difficulty of straw collecting, has made straw collecting combine harvesters more popular, especially in areas where animal husbandry is common alongside agriculture. Despite facilitating and increasing the possibility of straw collection by this type of combine harvesters, in many cases grain losses have increased. Therefore, it is necessary to investigate the amount of grain losses in this type of combine harvester and determine the factors affecting its losses.

Materials and Methods

This study was conducted to investigate the effect of ground speed and wheat yield on grain loss in a straw collecting combine harvester. The use of this type of harvester was also analyzed economically. Two models of JD-1055 and JD-1165 combine harvesters were considered for evaluation. The experiments were performed in a split factorial design in the form of a randomized complete block design. Grain yield (at three yield levels: less than 2 Ton ha⁻¹, 2 to 5 Ton ha⁻¹, and more than 5 Ton ha⁻¹) was the main factor and the other two treatments, the model of combine harvester and the ground speed (with three levels: 1, 1.5 and 3 km h⁻¹) were factorially placed in subplots. Loss components including head loss, combine harvester body loss, end loss, threshing unit loss, cleaning unit loss, and quality losses were measured and compared with that of a conventional grain combine harvester. Field capacity and harvesting cost were also measured for both types of combine harvesters. Finally, based on cost-benefit analysis, the straw collecting combine harvester was compared with the conventional combine harvester economically.

Results and Discussion

The results showed that in addition to the main effects, the two-way and three-way interactions were also significant for the studied factors on head loss, body loss, end loss, threshing unit loss, cleaning unit loss, and quality losses of straw collecting combine harvester. The losses of the straw collecting combine harvester are strongly affected by the ground speed and the grain yield. The percentage of grain loss in low yields (less than 2 Ton ha⁻¹) was significantly higher than that of medium (2 to 5 Ton ha⁻¹) and high yields (more than 5 Ton ha⁻¹). The average loss of JD-1055 was less than JD-1165, mainly because of more loss in threshing and cleaning units. The highest total losses, with a rate of 10.54%, were related to JD-1165 in low yields, while the lowest percentage of total losses, at a rate of 2.54%, was related to JD-1055 in medium grain yield and low speed (1 km h⁻¹). The total grain losses of conventional combine harvesters obtained about 3.22% while the total grain losses of straw collecting combine harvesters were approximately 5.44%. In general, the losses of straw collecting combine harvester were about 2.22% more than that of the conventional combine harvester. The economic evaluation showed that in the region where animal farming is common along with agriculture, the use

of straw collecting combine harvester is more economical than a conventional combine harvester.

Conclusion

Combine harvester model, grain yield, as well as ground speed of the combine harvester affects the grain losses in different units of a straw collecting combine harvester as well as total losses. As the grain yield and the feed rate increase, the total losses of this combine decrease at first but increase again in high yields. Adjusting the feed rate helps reduce the end losses and total losses of straw collecting combine harvester. In the study area, using a straw collecting combine harvester is more economical than a conventional combine harvester.

Keywords: Economic evaluation, Quality loss, Straw, Wheat yield

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۶۲۶-۶۱۳

تحلیل اقتصادی و ارزیابی افت دو نمونه کمباین کاه‌کوب متداول در کشور

مطالعه موردی: شهرستان ازنا (استان لرستان)

حسین امیری^۱، عباس عساکره^{۲*}، محسن سلیمانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

چکیده

این مطالعه به منظور بررسی اثر سرعت پیشروی کمباین و عملکرد مزارع گندم بر میزان افت کمباین کاه‌کوب و تحلیل اقتصادی استفاده از این نوع کمباین‌ها، در شهرستان ازنا انجام شد. کمباین‌های مورد بررسی، مدل‌های جاندر ۱۰۵۵ و ۱۱۶۵ بودند. آزمایش‌ها به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام شدند که عملکرد مزارع گندم به عنوان عامل اصلی و دو تیمار مدل کمباین کاه‌کوب و سرعت پیشروی کمباین‌ها به صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. ظرفیت کمباین و اختلاف درآمدهای حاصل از برداشت با کمباین کاه‌کوب و معمولی محاسبه گردید. نتایج نشان داد علاوه بر اثرات اصلی، اثر متقابل دوگانه و سه‌گانه تیمارها نیز بر صفات ریزش دماغه، افت‌های بدنه کمباین، انتهای کمباین، واحد کوبنده، واحد تمیزکننده، افت کل کمباین و افت کیفی کمباین کاه‌کوب معنادار می‌باشد. افت کمباین کاه‌کوب به شدت متأثر از سرعت پیشروی و عملکرد مزارع (تغذیه) است. در مجموع، میزان افت کمباین کاه‌کوب حدود ۲/۲۲٪ بیش‌تر از کمباین معمولی به دست آمد که بیش‌ترین افت مربوط به افت انتهای کمباین کاه‌کوب بود. بررسی اقتصادی نشان داد که در مناطقی که دامپروری در کنار زراعت رواج دارد و کاه ارزش اقتصادی بالایی دارد، استفاده از کمباین کاه‌کوب اقتصادی‌تر از کمباین معمولی است.

واژه‌های کلیدی: افت کیفی، بررسی اقتصادی، عملکرد گندم، کاه

مقدمه

بسیار سخت، زمان‌بر و مستلزم صرف هزینه‌های زیاد است. همچنین تردد زیاد ماشین‌ها و فشرده‌سازی احتمالی لایه‌های زمین از جمله مشکلات دیگر در جمع‌آوری کاه می‌باشد. این مشکلات باعث شده است که کمباین‌داران برای برآورده ساختن نیاز کشاورزان، تغییراتی در کمباین خود بدهند تا علاوه بر دانه بتوانند کلش را به کاه تبدیل و در مخزن مخصوص کاه که بر روی کمباین تعبیه شده است؛ جمع‌آوری کنند. در این کمباین‌ها که به کمباین کاه‌کوب معروف هستند، برداشت گندم و جو از پایین‌ترین قسمت ساقه و در صورت نبود موانع، از سطح خاک انجام می‌شود. به دلیل افزایش نیاز به کاه، هزینه و سختی زیاد جمع‌آوری آن، این نوع کمباین‌ها به خصوص در مناطق با نظام دامپروری-زراعت با استقبال بسیار زیاد کشاورزان مواجه شده‌اند به طوری که حتی شرکت‌های تولیدکننده بزرگ کمباین کشور اقدام به تولید کمباین کاه‌کوب کرده‌اند. کمباین کاه‌کوب علاوه بر انبار دانه، دارای انبار ذخیره کاه نیز می‌باشد که هم‌زمان دانه و تمامی کاه را در مخازن جداگانه انبار می‌کند. کمباین کاه‌کوب با دارا بودن قابلیت جمع‌آوری حجم زیادی از بقایای گیاهی مزرعه و عدم مزاحمت برای آماده‌سازی بستر و آبیاری کشت دوم و کاهش تردد به داخل زمین، به

گندم مهم‌ترین محصول کشاورزی دنیا با بیش‌ترین سطح زیر کشت است (FAO, 2019) و در کشور ایران، به دلیل نقش اساسی که در تأمین مواد غذایی و تغذیه دام‌ها دارد، مهم‌ترین و راهبردی‌ترین محصول کشاورزی نیز می‌باشد (Khosravani & Rahimi, 2006). در اکثر مناطق کشور، کشاورزان در کنار زراعت و باغبانی به مشاغل دیگری همچون دامپروری نیز می‌پردازند که برای تغذیه دام خود به کاه نیازمند هستند. همچنین افزایش دامپروری‌ها (صنعتی و غیر صنعتی) در کشور، نیاز به علوفه و کاه را افزایش داده است. این موضوع در کنار خشک‌سالی‌های اخیر، موجب افزایش قیمت کاه شده است. جمع‌کردن کلش و تبدیل آن به کاه، کاری

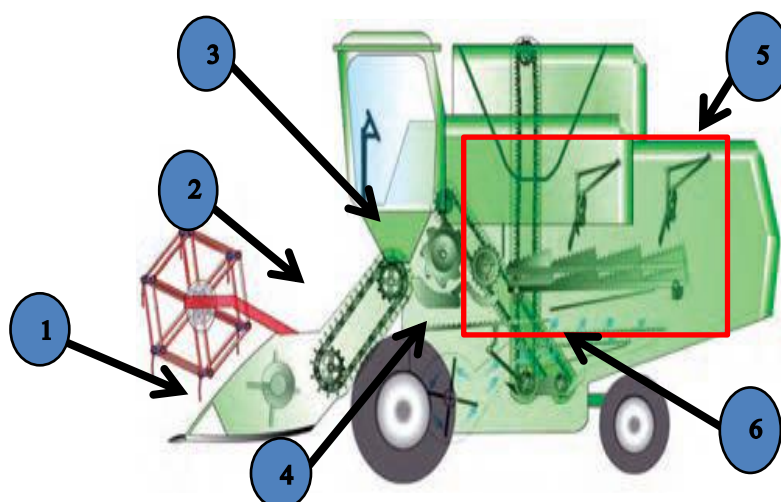
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: A.asakereh@scu.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70758.1045>

زیاد بین کوبنده و ضد کوبنده و نیز چکشی بودن کوبنده، سیستم کوبش با خسارت کم‌تری مواجه می‌شود و به همین دلیل کاربر بدون نگرانی از ورود سنگ به داخل کمباین، می‌تواند محصول را از پایین‌ترین حد ممکن درو کند. در این نوع کمباین، ضربه‌زن (استوانه کلش‌کش) حذف شده است و برخلاف کمباین معمولی، کل کاه همراه با دانه از سوراخ‌های ضد کوبنده عبور می‌کند و بر روی سینی دانه می‌ریزد. به دلیل تغییر نوع کوبنده و محدودیت فضا، ارتفاع سینی دانه کاهش می‌یابد و هم‌سطح الک بالایی می‌شود (شماره ۴). از تغییرات مهم دیگری که در کمباین کاه‌کوب صورت گرفته است، حذف کاه‌برها، انگشتی‌های تکان‌دهنده و پرده و جایگزین کردن مخزن کاه به جای آن‌ها است (شماره ۵). کاه خرد شده همراه دانه از سوراخ‌های ضد کوبنده بر روی سینی دانه می‌ریزند و به سمت الک‌ها حرکت می‌کنند. در انتهای الک‌ها فن مکنده-دمنده نسبتاً قوی اضافه شده است که کاه‌ها را مکیده و به مخزن کاه انتقال می‌دهد (شماره ۶). در این کمباین‌ها خروجی کاه از انتهای کمباین وجود ندارد. دانه‌ها همانند کمباین‌های معمولی از الک بالایی و پایینی عبور کرده و به مخزن دانه انتقال می‌یابند. همچنین، تغییرات دیگری مانند حذف انتقال نیرو به کاه‌برها، افزودن سیستم انتقال نیرو و پولی‌ها جهت به حرکت درآوردن فن مکنده-دمنده، جک و سیستم تخلیه مخزن کاه نیز صورت گرفته است.

سرعت مورد اقبال کشاورزان قرار گرفته است. تبدیل کمباین‌های معمولی به کمباین‌های کاه‌کوب و استفاده از این نوع کمباین‌ها برای برداشت غلات به‌ویژه گندم در تمام مدل‌های کمباین (موجود در کشور) در حال افزایش است. یکی از مراحل بسیار مهم و حساس در زراعت گندم، مرحله برداشت است که سهم قابل‌توجهی از تلفات کل گندم تولیدی و همچنین هزینه‌های تولید را به خود اختصاص می‌دهد. ورود کمباین‌های کاه‌کوب هرچند موجب افزایش و راحتی تولید کاه شده است ولی در بسیاری از موارد افت دانه (دانه باقی‌مانده با کاه یا دانه شکسته شده) را افزایش داده است (Rostami, Lotfalian, & Hoseinzadeh-Samani, 2018). تغییرات در کمباین‌های معمولی جهت تبدیل به کمباین کاه‌کوب در کارگاه‌های محلی و با حداقل امکانات فنی و مهندسی صورت می‌گیرد و به‌صورت تجربی می‌باشد. بخش‌های عمده کمباین معمولی که تغییراتی جهت تبدیل شدن به کمباین کاه‌کوب در آن صورت می‌گیرد در شکل ۱ نشان داده شده است. در بیش‌تر کمباین‌های کاه‌کوب جهت کاهش فشار بر موتور کمباین، عرض برش دماغه (شماره ۱) و تعداد تسمه‌های نقاله تغذیه (شماره ۲) کاهش داده می‌شود. در سیستم کوبش کمباین کاه‌کوب، کوبنده نوع چکشی (انگشتی)، جایگزین کوبنده سوهانی می‌شود (شماره ۳). تعداد انگشتی‌های کوبنده، تقریباً ۶۰ عدد می‌باشند که هر کدام به‌طور جداگانه به سیلندر کوبنده پیچ شده‌اند. در این سیستم، با ورود احتمالی سنگ به داخل کوبنده و ضد کوبنده، به خاطر فاصله



شکل ۱- قسمت‌های مختلف کمباین معمولی که در کمباین کاه‌کوب تغییر داده می‌شود، ۱: دماغه، ۲: تسمه تغذیه، ۳: واحد کوبنده، ۴: سینی دانه، ۵: واحد جداکننده، ۶: واحد تمیزکننده

Fig. 1. Different parts of a conventional combine that are changed in a straw collecting combine, 1: Header, 2: Feeder conveyor, 3: Threshing unit, 4: Grain pan, 5: Separating unit, 6: Cleaning unit

بررسی و مقایسه تلفات برداشت کمباین‌های کاه‌کوب و معمولی از نوع جان‌دیر ۹۵۵ و کلاس ۷۶ در استان فارس نشان داد که افت واحد

بر اساس برخی گزارش‌ها، کمباین‌های کاه‌کوب دارای نواقص و ایرادات زیادی بوده که نیاز به بررسی و ارزیابی آن‌ها می‌باشد. نتایج

تلفات دانه در این نوع کمباین بررسی و عوامل مؤثر بر آن تعیین گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

طبق اطلاعاتی که از کارشناسان، مراکز خدمات کشاورزی و جهاد کشاورزی چندین استان به دست آمد، استقبال از کمباین کاه کوب در مناطق با نظام دامپروری-زراعت بسیار بیش تر می باشد. بر این اساس استان لرستان و شهرستان ازنا به عنوان منطقه ای با نظام دامپروری-زراعت انتخاب گردید. بخش وسیعی از این شهرستان را دشت های حاصلخیز و مزارع کشاورزی تشکیل می دهند به طوری که مقام اول تولید گندم در استان لرستان را به خود اختصاص داده است (Jahad Agricultural Organization of Lorestan, 2020). این شهرستان در ۴۹ درجه و ۲۷ دقیقه طولی و ۳۳ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است.

اندازه گیری ریزش

این مطالعه در دو بخش، شامل اندازه گیری میزان ریزش کمباین و بررسی ظرفیت زراعی و مسائل اقتصادی مرتبط انجام شد. در بخش اول، میزان ریزش کمباین کاه کوب در عملکردهای مختلف گندم و سرعت های پیشروی متفاوت کمباین اندازه گیری شد. عملکرد مزارع به سه دسته مزارع با عملکرد کم (کمتر از ۲ تن در هکتار)، عملکرد متوسط (بین ۲ الی ۵ تن در هکتار) و عملکرد بالا (بیش تر از ۵ تن در هکتار) تقسیم شدند. سرعت پیش روی کمباین نیز در سه سطح کم، متوسط و زیاد که به ترتیب ۱، ۱/۵ و ۲ کیلومتر بر ساعت بودند، در نظر گرفته شد. تقسیم بندی مزارع از نظر عملکرد، بر اساس اندازه گیری های اولیه انجام شد. برای این منظور در ابتدا عملکرد مزارع با شیب و رقم کشت شده یکسان (رقم میهن)، با نمونه برداری به وسیله قاب های یک مترمربعی از قسمت های مختلف مزرعه، به صورت تصادفی و در چهار تکرار تعیین گردید. به طور کلی سعی گردید حتی الامکان از مزارعی استفاده شود که تمام سطح زمین یکدست و دارای شرایط یکسانی باشند و آبیاری کل زمین در فصل کشت در کمترین اختلاف زمانی در بین قسمت های مختلف آن انجام شده باشد. همچنین مزارعی انتخاب شدند که در برابر تنش ها و امراض نیز شرایط یکسانی داشتند. زمان برداشت و اندازه گیری ریزش کمباین کاه کوب از ۱۷ تیرماه ۱۳۹۹ تا ۱۴ مردادماه همان سال انجام شد. طول و عرض کرت های مورد استفاده به ترتیب ۴۰ و ۱۵ متر در نظر گرفته شد.

انتخاب کمباین با توجه به بیشترین درصد فراوانی کمباین موجود در کشور انجام گرفت و بر این اساس دو مدل جاندر ۱۰۵۵ و

برش، واحد کوبش و جدایش در کمباین کاه کوب به طور معنی داری بیش تر از کمباین معمولی است. مجموع تلفات کمباین معمولی و کاه کوب به ترتیب ۲/۳٪ و ۱۳/۳٪ اندازه گیری شد. مواد غیر دانه ای در مخزن دانه کمباین کاه کوب ۲/۷٪ بود در حالی که در کمباین معمولی ۰/۵٪ بود. بیشترین تلفات کمباین کاه کوب جاندر در بخش مخزن و به میزان ۴/۱۶٪ و در کمباین کاه کوب کلاس در واحد کوبش و جدایش، به میزان ۸/۱۳٪ دیده شد (Rostami et al., 2018). با این وجود در مطالعه دیگری، اختلاف معناداری بین کمباین کاه کوب و معمولی از نظر افت واحد برش مشاهده نگردید ولی افت انتهای کمباین و میزان شکستگی دانه در مخزن دانه در کمباین کاه کوب، به طور معنی داری کم تر از کمباین معمولی بود. نتایج این مطالعه نشان داد که در رطوبت بیش تر، کمباین کاه کوب عملکرد بسیار بهتری از کمباین معمولی دارد (Gheleshkhani, 2017). مطالعات بسیار زیادی در زمینه اندازه گیری ریزش کمباین های معمولی و عوامل مؤثر بر آن ها انجام شده است. اندازه گیری افت برداشت گندم با کمباین در سه شهرستان مرودشت، اقلید و داراب نشان داد که میانگین کل ضایعات گندم در مرحله برداشت ۴/۸٪ است و بیشترین مقدار این ضایعات (۶۸٪) مربوط به افت دماغه کمباین است (Khosravani & Rahimi, 2006). تلفات برداشت گندم با کمباین در شهرستان خرم آباد ۴/۵۶٪ گزارش شده است (Rahmati, Razdari, Izadi, & Yoosefian, 2015). نتایج بررسی اثر پارامترهای طراحی بر جدا شدن دانه در کوبنده برای کمینه کردن افت جداکننده کمباین نشان داد که اثر عوامل ارتفاع برش ساقه، میزان تغذیه و نسبت لقی کوبنده بر روی میزان جداسازی و در نتیجه، افت واحد جداکننده معنادار است (Mirzazadeh, Abdollahpour, & Moghadam, 2011). اثر سرعت حرکت چرخ و فلک، ارتفاع برش محصول و سرعت پیشروی (Mohd, Omar, Mutasim, & Mamou, 1997; Khosravani & Rahimi, 2006; Patel & Varshney, 2007; Jalali & Abdi, 2014; Sotnar, Pospisil, Marecek, Dokukilova, & Novotny 2018; Karmulla Chaab, Karpavarfar, Rahmanian-Koushkaki, Mortezaei, & Mohammadi, 2020)، سرعت دورانی کوبنده، فاصله بین کوبنده و ضد کوبنده، اندازه سوراخ الک ها، رطوبت محصول و تنظیم پروانه ی دمنده (Rahama et al., 1990; Sabir, Iqbal, & Yasin, 2005; Patel & Varshney, 2007)، تاریخ برداشت (Sheraddin & Ghulan, 1991)، میزان تغذیه و خوراک دهی به کمباین، میزان رطوبت محصول و سرعت پیشروی کمباین (Patel & Varshney, 2007) از مواردی می باشد که به طور گسترده بررسی شده اند.

با این وجود، علی رغم افزایش چشمگیر تعداد کمباین های کاه کوب در کشور، مطالعات اندکی در رابطه با آن ها انجام شده است. بنابراین با توجه به گسترش این نوع کمباین ها و اهمیت محصول گندم و عملیات برداشت آن در میزان تلفات، ضروری است میزان

تولید نمی‌شود به همین دلیل مدل ۱۰۵۵ جهت اندازه‌گیری ریزش انتخاب شد. سعی گردید کمباین‌هایی که از نظر عمر، تلفات و عمر مفید، شرایط مشابهی دارند و به استانداردهای برداشت اداره فناوری‌های مکانیزاسیون استان لرستان نزدیک‌تر باشند، انتخاب شوند. مشخصات کمباین‌های مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

۱۱۶۵ که به‌طور گسترده به کمباین کاه‌کوب تبدیل شده‌اند، انتخاب شدند. متداول‌ترین مدل‌های کمباین شرکت جان‌دیر در ایران که به کاه‌کوب تبدیل شده‌اند، مدل‌های ۹۵۵، ۱۰۵۵ و ۱۱۶۵ هستند. اختلاف کمباین ۱۰۵۵ با کمباین ۹۵۵ تنها در مدل و توان موتور است که در مدل ۱۰۵۵، موتور با قدرت ۱۲۰ اسب بخار جایگزین موتور ۹۷ اسب بخار شده است. با توجه به این‌که کمباین جان‌دیر ۹۵۵ در کشور

جدول ۱- مشخصات کلی کمباین‌های مورد استفاده

Table 1- The general specifications of the studied combine harvesters

	کمباین ۱۰۵۵ JD1055	کمباین ۱۱۶۵ JD1165
عرض برش Cutter bar width (m)	4.2	4.4
ظرفیت مخزن دانه Grain tank capacity (Lit)	2700	4000
ظرفیت مخزن کاه Straw tank capacity (m ³)	8	8
سیستم کوبنده Type of threshing system	کوبنده چکشی با ۶۰ عدد چکش (انگشتی) Spike-tooth cylinder with 60 tooth in cylinder	کوبنده چکشی با ۶۰ عدد چکش (انگشتی) Spike-tooth cylinder with 60 tooth in cylinder
سیستم جداسازی Separation system	فن خلأ ساز Vacuum fan	فن خلأ ساز Vacuum fan
مدل موتور Engine model	۱۰۰۰۶۶ پرکینز Perkins 10006.6	۶۰۶۸ جان‌دیر JD 6068
تعداد سیلندر موتور Number of engine's cylinders	6	6
توان موتور Engine power (hp)	120	160

مترمربع) استفاده گردید. برش محصول (ساقه گندم) از ارتفاع تقریبی ۱۰ سانتی‌متر از سطح زمین انجام شد. سپس قاب به‌صورت تصادفی در حدفاصل مقسم‌های در دو طرف سکوی برش و زیر کمباین انداخته شد. تمام دانه‌ها و خوشه‌های ریخته شده بر روی زمین و همچنین خوشه‌هایی که از دسترس شانه برش خارج شده بود (برداشت نشده) جمع‌آوری و بر حسب گرم وزن شد (B) و با کم کردن تلفات طبیعی از آن، تلفات سکوی برش (L_H)، بر حسب کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد (رابطه (۲)) (Sumner & Williams, 2012; Anon, 2017).

$$L_H = 10 \times (B - A) \quad (2)$$

از آن‌جایی که کلیه تغییرات اعمال شده در کمباین کاه‌کوب در کارگاه‌های کوچک با حداقل امکانات فنی و مهندسی انجام می‌شود، اندازه‌گیری ریزش بدنه ضروری است. این افت در کمباین‌های کاه‌کوب به دلیل فرسودگی نیست و بیش‌تر به دلیل عدم درزبندی مناسب و تغییر واحدها است. هرچند فرسودگی نیز شدت ریزش بدنه را افزایش می‌دهد. برای اندازه‌گیری افت بدنه، با استفاده از پارچه برزنتی، تمامی زیر کمباین و نقاطی که امکان ریزش از آن‌ها وجود دارد، به‌طور یکپارچه پوشانده شد. تمامی دانه‌ها و خوشه‌هایی که بر

افت طبیعی (پیش از برداشت) و سکوی برش (دماغه) کمباین بر اساس دستورالعمل اندازه‌گیری افت در قسمت‌های مختلف کمباین برداشت غلات که توسط موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی (دفتر محصولات اساسی، غلات، حبوبات و نباتات علوفه‌ای) تهیه شده است، اندازه‌گیری شدند. به‌منظور تعیین تلفات پیش از برداشت، یک ناحیه برداشت نشده از مزرعه که از کناره‌های مزرعه فاصله‌ی کافی داشت، انتخاب شد. یک کادر مربعی شکل با ابعاد 1×1 متر (یک مترمربع)، در داخل محصول بر روی سطح زمین قرار گرفت و محصول با داس به دقت به طوری که ریزش دانه نداشته باشد، برداشت شد. سپس تمام دانه و سنبله‌هایی که درون کادر روی زمین ریخته بودند، جمع‌آوری، وزن و بر حسب گرم ثبت شد (A). این کار برای هر سه سطح عملکرد، در چهار تکرار انجام شد. افت طبیعی (L_N) بر حسب کیلوگرم در هکتار با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. این رابطه خلاصه شده دستورالعمل اندازه‌گیری افت طبیعی است (Sumner & Williams, 2012; Rostami et al., 2018; Anon, 2017).

$$L_N = 10 \times A \quad (1)$$

جهت تعیین افت سکوی برش، از یک قاب 1×1 متر (یک

هکتار می‌باشند. در کمباین‌های معمولی مجموع تلفات واحدهای کوبنده، جداکننده و تمیزکننده که از انتهای کمباین بر روی زمین می‌ریزد را افت انتهای کمباین می‌گویند در حالی که در کمباین کاه کوب تلفات این واحدها به مخزن کاه منتقل می‌شود و در نهایت به مصرف دام می‌رسد. به همین دلیل برخی از کارشناسان عقیده دارند که نباید به‌عنوان افت در نظر گرفته شود. در هر صورت محاسبه و اندازه‌گیری این افت برای تحلیل اقتصادی لازم است تا مشخص شود که آیا جداسازی این دانه‌ها در زمان کوبیدن کلش که برای تبدیل کلش به کاه انجام می‌شود، به صرفه است یا خیر.

$$L_T = \frac{10D}{LW} \quad (۴)$$

$$L_C = \frac{10E}{LW} \quad (۵)$$

با استفاده از الک‌های دستی دانه‌های شکسته شده در مخزن دانه از دانه‌های سالم جدا شدند و درصد آن‌ها (بر اساس وزن) در مخزن دانه به عنوان تلفات کیفی در نظر گرفته شد.

درصد افت کل کمباین (L_{Total}) از مجموع تلفات سکوی برش، بدنه و افت انتهای کمباین (واحدهای کوبنده و تمیزکننده) به‌دست آمد.

طرح آزمایشی مورد استفاده

این آزمایش به‌صورت اسپلینت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. در این آزمایش سطوح مختلف تیمار عملکرد در کرت‌های اصلی و دو تیمار مدل کمباین و سرعت پیشروی کمباین به‌صورت فاکتوریل، در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. برای تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SAS نسخه ۲۲ استفاده شد.

ظرفیت و ارزیابی اقتصادی کمباین کاه‌کوب

در بخش دوم، ظرفیت زراعی کمباین، هزینه برداشت هر هکتار، درآمد کشاورز از کاه به‌دست آمده و درآمد از دست رفته به دلیل تلفات بیشتر کمباین کاه‌کوب نسبت به کمباین معمولی بررسی گردید. جهت بررسی ظرفیت زراعی کمباین‌های کاه‌کوب، میانگین زمان لازم برای برداشت یک هکتار اندازه‌گیری گردید.

هزینه برداشت هر هکتار با کمباین کاه‌کوب بیش‌تر از کمباین معمولی می‌باشد و در مزارع با عملکرد دانه بالاتر، به دلیل افزایش کاه تولیدی و به تبع آن افزایش فشار بر کمباین و همچنین افزایش زمان مورد نیاز برای برداشت هر هکتار، اختلاف هزینه آن با کمباین معمولی افزایش می‌یابد. هزینه برداشت هر هکتار گندم با کمباین کاه‌کوب برای مزارع با عملکردهای مختلف بر اساس هزینه‌های برداشت سال ۱۳۹۹ در شهرستان ازنا در نظر گرفته شد. هزینه برداشت با کمباین معمولی بیش‌تر بر اساس سنگین، نیمه‌سنگین و

روی برزنت ریخته شدند جمع‌آوری، وزن و بر حسب گرم ثبت شدند (C). مقدار افت و ریزش بدنه (L_B) بر حسب کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. رابطه (۳) خلاصه دستورالعمل اندازه‌گیری افت بدنه کمباین را نشان می‌دهد (Anon, 2017).

$$L_B = \frac{10C}{LW} \quad (۳)$$

که در این رابطه L و W ، به‌ترتیب طول مسیر طی شده توسط کمباین و عرض کار کمباین (عرض کار واقعی) می‌باشد.

در کمباین کاه‌کوب افت انتهای کمباین وجود ندارد بلکه به سبب تغییراتی که در واحد کوبش، جداسازی و تمیزکننده ایجاد شده است، اندازه‌گیری افت این واحدها با کمباین معمولی متفاوت خواهد بود. دستورالعمل مشخصی برای اندازه‌گیری افت واحد کوبنده، جداکننده و تمیزکننده این نوع کمباین‌ها وجود ندارد. به‌طور کلی دو نوع افت کمی و کیفی در این مراحل می‌توان برای این نوع کمباین‌ها در نظر گرفت. افت کمی شامل دانه‌ها و خوشه‌های نیم‌کوب یا کوبیده نشده می‌باشد که همراه کاه به مخزن کاه منتقل می‌شوند. افت کیفی شامل دانه‌های شکسته است که در مخزن دانه می‌باشند. در مطالعه‌ای که به ارزیابی تلفات برداشت کمباین کاه‌کوب پرداخته شد، جهت اندازه‌گیری افت واحد کوبنده، جداکننده و تمیزکننده، به‌طور تصادفی ۱۰ کیلوگرم کاه از مخزن کاه کمباین برداشت شد و دانه‌های سالم و شکسته موجود در آن جدا و جرم آن‌ها تعیین شد. دانه‌های سالم به‌عنوان تلفات واحدهای جداکننده و تمیزکننده و دانه‌های شکسته به‌عنوان تلفات واحد کوبنده در نظر گرفته شد. سپس بر اساس جرم کاه داخل مخزن کاه کمباین و مساحت برداشت شده، تلفات به یک هکتار تعمیم داده شد (Rostami et al., 2018). در این مطالعه جهت اندازه‌گیری این تلفات، بعد از خارج کردن کلیه مواد اعم از دانه و کاه از واحدهای کمباین، کیسه‌ای در مجرای ورودی دانه به مخزن دانه قرار داده شد و سپس مسیری به طول مشخص (L) با کمباین برداشت گردید و پس از توقف کمباین و کار کردن در جا به مدت سه دقیقه (خروج کل مواد از واحدهای کمباین)، دانه و کاه جمع شده در کیسه و مخزن کاه تخلیه و به‌صورت مجزا وزن گردید که با این کار علاوه بر تعیین عملکرد دانه، میزان تولید کاه در هکتار نیز به‌دست آمد. برای اندازه‌گیری افت کمی، پس از تخلیه مخزن کاه، به کمک دمنده و الک‌های دستی، دانه از کاه جدا شد. سپس دانه‌های سالم و شکسته از یکدیگر تفکیک شدند که دانه‌های شکسته (D)، بر حسب گرم) به‌عنوان تلفات واحد کوبش و دانه‌های سالم (E)، بر حسب گرم) به‌عنوان تلفات واحد تمیزکننده در نظر گرفته شدند. بر اساس مساحت برداشت شده و جرم دانه‌های سالم و شکسته در مخزن کاه کمباین، تلفات واحدهای کوبنده و تمیزکننده به یک هکتار تعمیم داده شد. رابطه (۴) و (۵) به‌ترتیب نشان‌دهنده خلاصه عملیات اندازه‌گیری تلفات واحدهای کوبنده (L_T) و تمیزکننده (L_C) بر حسب کیلوگرم در

نتایج و بحث

اندازه‌گیری ریزش

میانگین رطوبت ساقه و دانه مزارع مورد بررسی بر اساس وزن خشک به‌ترتیب ۱۴ و ۸ درصد به‌دست آمد. عملکرد مزارع انتخابی در سطح کم، متوسط و زیاد به‌ترتیب حدود ۱۵۵۰، ۴۵۶۰ و ۷۵۴۰ کیلوگرم در هکتار و افت طبیعی این مزارع به‌ترتیب، ۸/۳٪، ۴/۷٪ و ۳/۵٪ بود. اثر مدل کمباین، سرعت پیشروی و عملکرد مزارع گندم بر ریزش واحدهای مختلف کمباین در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد اثر تیمارهای عملکرد مزارع گندم، مدل کمباین و سرعت پیشروی و همچنین اثرات متقابل دوگانه عملکرد مزارع * مدل کمباین، عملکرد مزارع * سرعت پیشروی و همچنین اثر متقابل سه‌گانه عملکرد مزارع * مدل کمباین * سرعت پیشروی بر همه صفات ریزش کمباین در سطح احتمال یک درصد معنادار است.

مقایسه میانگین‌های همه افت‌های مورد بررسی با توجه به مدل کمباین، سرعت پیشروی کمباین و عملکرد مزارع با روش دانکن در جدول ۳ نشان داده شده است. در مجموع، درصد افت دانه (افت دماغه، واحد کوبنده، واحد تمیزکننده و کل) در عملکردهای کم، به‌طور معنی‌داری بیش از عملکردهای متوسط و زیاد بوده است. میانگین تلفات کل کمباین کاه‌کوب در عملکرد کم، متوسط و زیاد به‌ترتیب ۶/۸۱٪، ۳/۵۵٪ و ۴/۴۴٪ به‌دست آمدند که همگی در سطح پنج درصد با هم اختلاف معنی‌دار دارند. در عملکرد کم‌تر از ۲ تن که شامل مزارع دیم می‌باشد، تغذیه و حجم ورود دانه و کاه به کمباین کم می‌باشد و احتمالاً درصد خرد شدن دانه در واحد کوبش بیش‌تر است، بنابراین درصد تلفات در واحد تمیزکننده نیز بیش‌تر می‌گردد. میزان ریزش کل کمباین کاه‌کوب در عملکرد متوسط مزارع (بین ۲ تا ۵ تن در هکتار) کم‌ترین میزان است (۳/۵۵٪) در حالی که با افزایش عملکرد (بیش از ۵ تن در هکتار)، دوباره افزایش می‌یابد (۴/۴۴٪). این تغییرات، بیش‌تر ناشی از افت انتهای کمباین است. در عملکردهای بیشتر به دلیل افزایش نرخ ورود مواد به درون کوبنده، مخصوصاً در کمباین کاه‌کوب که کاه‌بران‌ها حذف شده‌اند، فرصت کافی برای جداسازی دانه از کاه وجود ندارد.

میانگین ریزش کل کمباین ۱۰۵۵ (۴/۲۶٪) برابر با ۲۰۷ کیلوگرم در هکتار) کم‌تر از کمباین ۱۱۶۵ (۵/۶۲٪) برابر با ۲۳۵ کیلوگرم در هکتار) می‌باشد که این اختلاف به دلیل افت بیش‌تر در واحد کوبش و واحد تمیزکننده کمباین ۱۱۶۵ است (جدول ۳) که تغییرات عمده جهت تبدیل کمباین معمولی به کاه‌کوب در این واحدها صورت گرفته است. این در حالی است که ریزش دماغه و بدنه در کمباین ۱۱۶۵ کم‌تر می‌باشد. طبق انتظار، افزایش سرعت باعث افزایش افت کلی

سبک بودن کمباین تعیین می‌گردد. با در نظر گرفتن هزینه‌های برداشت مزارع گندم در سال ۱۳۹۹، اختلاف هزینه برداشت با کمباین کاه‌کوب و کمباین معمولی (ΔSC) بر اساس عملکردهای مختلف مزارع برای شهرستان ازنا (بر حسب ریال بر هکتار) محاسبه گردید.

به دلیل تلفات بیش‌تر کمباین‌های کاه‌کوب نسبت به کمباین‌های معمولی، درآمد کشاورزان از محصول دانه برداشت شده، کاهش می‌یابد که برابر با اختلاف تلفات کمباین کاه‌کوب و کمباین معمولی در هر هکتار (بر حسب کیلوگرم) در قیمت هر کیلوگرم گندم است. رابطه (۶) نشان‌دهنده درآمدی (I_{Loss}) است که کشاورز به دلیل ریزش بیش‌تر کمباین کاه‌کوب نسبت به کمباین معمولی در هر هکتار از دست می‌دهد (ریال بر هکتار).

$$I_{Loss} = (L_{TNPC} - L_{TNPS}) * Y * P_W \quad (6)$$

جایی که L_{TNPC} و L_{TNPS} به‌ترتیب درصد افت کل کمباین کاه‌کوب و معمولی، Y عملکرد مزارع (کیلوگرم بر هکتار) و P_W قیمت هر کیلوگرم گندم (بر حسب ریال) می‌باشد.

همچنین اختلاف درآمد کشاورز (ΔI) در حالتی که برداشت با کمباین کاه‌کوب انجام شود با حالتی که با کمباین معمولی همراه با جمع‌آوری کاه صورت گیرد بر حسب ریال بر هکتار محاسبه گردید. مزیت اقتصادی که کمباین کاه‌کوب نسبت به کمباین معمولی دارد شامل درآمد حاصل از کاه جمع‌آوری شده هم‌زمان با برداشت دانه است، در حالی که هزینه کم‌تر برداشت، درآمد بیش‌تر کشاورز به دلیل تلفات کم‌تر دانه (I_{Loss}) و درآمد حاصل از جمع‌آوری کاه پس از برداشت از مزایای اقتصادی برداشت با کمباین معمولی می‌باشند. اگر اختلاف درآمد برداشت با کمباین کاه‌کوب با کمباین معمولی مثبت باشد، نشان‌دهنده اقتصادی‌تر بودن روش برداشت با کمباین کاه‌کوب است و اگر منفی شود روش برداشت با کمباین معمولی اقتصادی‌تر می‌باشد. در صورتی که اختلاف صفر شود، از نظر اقتصادی هر دو روش برداشت شرایط یکسانی دارند (White, Case, & Pratt, 2012). خلاصه محاسبه اختلاف درآمد کشاورز از هر هکتار (ΔI) بر حسب ریال در حالت برداشت با کمباین کاه‌کوب با کمباین معمولی به‌صورت رابطه (۷) بیان شده است.

$$\Delta I = I_{Straw_S} - (\Delta SC + I_{Straw_C} - C_{Straw_C}) \quad (7)$$

جایی که I_{Straw_S} درآمد حاصل از کاه به‌دست آمده با کمباین کاه‌کوب (ریال بر هکتار)، I_{Straw_C} درآمد ناخالص حاصل از جمع‌آوری کاه پس از برداشت با کمباین معمولی (ریال بر هکتار) و C_{Straw_C} هزینه جمع‌آوری کاه (ریال بر هکتار) پس از برداشت با کمباین معمولی می‌باشد. مقدار I_{Straw_S} و I_{Straw_C} از ضرب مقدار کاه تولید شده از هر هکتار (کیلوگرم) در قیمت هر کیلوگرم کاه (بر حسب ریال) به‌دست آمدند.

کمباین شده است. طبیعتاً با افزایش سرعت، نرخ ورود مواد به درون کمباین افزایش می‌یابد و به همان نسبت، احتمال بیش باری در واحدهای کمباین افزایش می‌یابد و همچنین دانه‌ها فرصت کم‌تری برای جدایی از کاه دارند.

در عملکردهای متوسط و بالای مزرعه با افزایش سرعت پیشروی کمباین مقدار افت واحد کوبش در هر دو مدل کمباین ۱۰۵۵ و ۱۱۶۵ افزایش یافت ولی در عملکرد کم مزرعه این گونه نبود و مشاهده شد که در هر دو مدل کمباین در عملکرد کم مزرعه، میزان افت واحد کوبش در سرعت کم بیش از سرعت متوسط است که احتمالاً به دلیل این است که افزایش حجم تغذیه کاه مانع از خرد شدن دانه‌ها در واحد کوبش می‌شود. در مزارع با عملکرد بالا میزان افت واحد کوبش در کمباین ۱۰۵۵ و ۱۱۶۵ در بیشترین سرعت نسبت به کم‌ترین سرعت پیشروی به ترتیب ۳۸٪ و ۳۶٪ افزایش یافت که بیانگر اهمیت سرعت

پیشروی و میزان بار ورودی به کمباین در میزان افت ناشی از واحد کوبش و در نهایت افت انتهای کمباین می‌باشد. رستمی و همکاران (Rostami et al., 2018) با بررسی تلفات کمباین‌های کاه‌کوب کلاس (مدل ۷۶) و جان‌دیر (مدل ۹۵۵)، بیان کردند که افزایش بار و حجم تغذیه موجب افزایش تلفات واحدهای کوبنده، جداکننده و تمیزکننده می‌شود. آن‌ها مجموع تلفات واحدهای کوبنده، جداکننده و تمیزکننده را ۸/۱٪ بیان کردند. در مطالعه دیگری که توسط قلشخانی (Gheleskhani, 2017) انجام گرفت، مجموع افت واحدهای کوبنده؛ جداکننده و تمیزکننده (افت انتها) کمباین کاه‌کوب جان‌دیر (مدل ۹۵۵) به ترتیب ۲٪ و ۳/۵٪ در رطوبت نسبی ۱۲٪ و ۱۹٪ محیط به دست آمد که از تلفات کمباین معمولی در شرایط یکسان کم‌تر بود.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر عملکرد مزارع گندم و سرعت پیشروی کمباین بر مؤلفه‌های درصد افت دو مدل کمباین کاه‌کوب

Table 2- Analysis of variance related to the effect of wheat yield and combine ground speed on different type losses of two models of straw collecting combine harvesters

منابع تغییرات (Sources of variation)	درجه آزادی Degree of freedom	ریزش ریش دماغه Head loss	ریزش بدنه Body loss	افت واحد تمیزکننده Cleaning unit loss	افت واحد کوبنده Threshing unit loss	افت انتهای کمباین End loss	افت کل کمباین Total losse	افت کیفی کمباین Quality loss
بلوک Block	2	0.011 ^{ns}	0.192 ^{**}	0.178 ^{**}	0.530 ^{**}	0.781 ^{**}	5.24 ^{**}	1.31 ^{ns}
عملکرد Yield	2	1.48 ^{**}	2.24 ^{**}	12.55 ^{**}	6.76 ^{**}	36.85 ^{**}	58.43 ^{**}	4.12 ^{**}
خطا Error	4	0.001	0.040	0.045	0.138	0.075	0.486	0.03
مدل کمباین Combine model	1	4.59 ^{**}	0.102 ^{**}	0.756 ^{**}	5.35 ^{**}	9.76 ^{**}	22.91 ^{**}	1.11 ^{**}
سرعت Ground speed	2	0.275 ^{**}	1.46 ^{**}	3.43 ^{**}	2.92 ^{**}	8.54 ^{**}	19.95 ^{**}	1.95 ^{**}
عملکرد×مدل کمباین Combine model*Yield	2	3.79 ^{**}	0.350 ^{**}	0.893 ^{**}	4.04 ^{**}	8.41 ^{**}	19.60 ^{**}	2.17 ^{**}
عملکرد×سرعت Yield*Ground speed	4	0.391 ^{**}	0.162 ^{**}	2.55 ^{**}	1.52 ^{**}	0.186 ^{**}	0.753 ^{**}	1.42 ^{**}
مدل کمباین×سرعت Combine model*Ground speed	2	0.062 ^{**}	0.217 ^{**}	0.138 ^{**}	0.332 ^{**}	0.498 ^{**}	0.886 ^{**}	0.38 ^{**}
عملکرد×مدل کمباین×سرعت Combine model*Yield*Ground speed	4	0.093 ^{**}	0.075 ^{**}	0.191 ^{**}	0.098 ^{**}	0.264 ^{**}	0.337 ^{**}	0.59 ^{**}
خطای کل Total error	30	0.004	0.002	0.006	0.005	0.042	0.061	0.01
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation		9.35	4.17	7.06	3.49	6.51	4.66	4.68

** معنادار بودن در سطح احتمال یک درصد، ns معنادار نبودن را نشان می‌دهند.

** Significance at the 1% probability level, ns: non-significance

بالا (بیش از ۵ تن در هکتار) بود. کاهش عملکرد مزرعه و سرعت پیشروی کمباین سبب شد که میزان افت کل کمباین در هر دو مدل کمباین ۱۰۵۵ و ۱۱۶۵ کاهش یابد و میانگین تلفات کل کمباین از

بیش‌ترین مقدار تلفات دانه با ۴۶۰ کیلوگرم در هکتار (معادل ۱۲/۶٪) مربوط به کمباین جان‌دیر ۱۰۵۵ با سرعت پیشروی ۲ کیلومتر بر ساعت (تیمار با بالاترین سرعت پیشروی) و در مزرعه با عملکرد

۶/۱۲٪ به ۴/۰۳٪ کاهش یابد. در مزارع با عملکرد نسبی کم مشاهده شد که کمباین ۱۰۵۵ نسبت به کمباین ۱۱۶۵ برتری داشته و میزان افت کلی کمباین در هر سه سرعت پیشروی، کم‌تر از کمباین جاندیر ۱۱۶۵ بود. در کمباین ۱۱۶۵ نیز هرچند که در هر سه سرعت پیشروی میزان افت کلی کمباین در مزارع با عملکرد نسبی کم بیشتر از کمباین ۱۰۵۵ بود، ولی مشاهده شد که با افزایش سرعت پیشروی، میزان افت کلی کمباین کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند به دلیل کاهش خرد شدن دانه در سیلندر کوبنده و به تبع کاهش افت واحد

تمیزکننده باشد.

بیشترین درصد افت کل، به میزان ۱۰/۵۴٪، مربوط به کمباین ۱۱۶۵ و در عملکرد کم به‌دست آمد، در حالی که کم‌ترین درصد افت کل، به میزان ۲/۵۴٪، مربوط به کمباین ۱۰۵۵ در عملکرد متوسط و سرعت کم حاصل شد. از بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها مشاهده گردید که میزان ریزش در کمباین کاه‌کوب به سرعت پیشروی و عملکرد مزارع وابسته است و تغییرات آن از حدود ۳/۵٪ تا ۱۰/۵٪ متغیر است.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر عملکرد مزارع، سرعت پیشروی و مدل کمباین بر مؤلفه‌های درصد افت کمباین کاه‌کوب

Table 3- Comparison of the mean effect of grain yield, ground speed and Combine harvester model on losses of straw collecting combine harvester (%)

تیما	افت کل	افت انتهای کمباین	افت واحد تمیزکننده	افت واحد کوبنده	افت بدنه	افت هد	تیما
Treatment	Total loss	End loss	Cleaning unit loss	Threshing unit loss	Body loss	Head loss	Treatment
کم	6.81 ^a	4.85 ^a	2.09 ^a	2.76 ^a	1.02 ^b	0.96 ^a	کم
عملکرد مزارع	3.55 ^c	2.32 ^b	0.63 ^b	1.68 ^b	0.82 ^c	0.41 ^c	متوسط
Grains yield	4.44 ^b	2.37 ^b	0.66 ^b	1.72 ^b	1.50 ^a	0.57 ^b	زیاد
مدل کمباین	4.26 ^b	2.75 ^b	1.01 ^b	1.74 ^b	1.16 ^a	0.35 ^b	JD1055
Combine model	5.62 ^a	3.61 ^a	1.25 ^a	2.36 ^a	1.07 ^b	0.94 ^a	JD1165
بالا	6.12 ^a	3.90 ^a	1.39 ^a	2.51 ^a	1.44 ^a	0.78 ^a	High
سرعت پیشروی	4.70 ^b	3.16 ^b	1.37 ^a	1.79 ^c	1.00 ^b	0.53 ^c	متوسط
Ground speed	4.03 ^c	2.51 ^c	0.64 ^b	1.87 ^b	0.90 ^c	0.63 ^b	کم
							Low

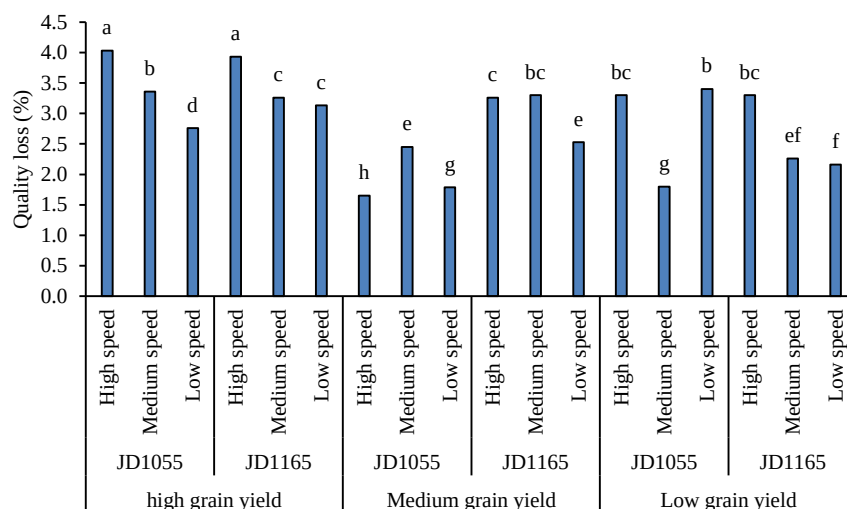
حروف مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌داری تیمارها بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد می‌باشند.

Similar letters indicate no significant difference between treatments based on Duncan test at the level of 5%

افت کیفی

اثر تیمارهای عملکرد مزارع، مدل کمباین و سرعت پیشروی کمباین و همچنین اثرات متقابل دوگانه عملکرد مزارع * مدل کمباین، عملکرد مزارع * سرعت پیشروی کمباین، مدل کمباین * سرعت پیشروی کمباین و همچنین اثر متقابل سه‌گانه عملکرد مزارع * مدل کمباین * سرعت پیشروی کمباین بر صفت افت کیفی کمباین در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (شکل ۲). میزان افت کیفی هر دو مدل کمباین ۱۰۵۵ و ۱۱۶۵ در سرعت‌های بالاتر کمباین و عملکرد نسبی بالاتر مزرعه بیشتر از سطوح دیگر عملکرد و سرعت می‌باشد. بالاترین میزان افت کیفی کمباین به میزان ۴/۰۳٪ مربوط به کمباین ۱۰۵۵ در بالاترین میزان سرعت پیشروی کمباین و بالاترین میزان عملکرد مزرعه بود. کم‌ترین میزان افت کیفی کمباین در تیمار سرعت بالای پیشروی کمباین ۱۰۵۵ و در عملکرد متوسط مزرعه (۱/۶۵٪) به‌دست آمد.

میانگین ریزش کمباین‌های معمولی جاندیر در منطقه مورد مطالعه بر اساس ۲۴ نمونه تصادفی برابر با ۳/۲۲٪ اندازه‌گیری شد که افت انتهای کمباین تنها ۰/۶۴٪ بود، در حالی که افت انتهای کمباین کاه‌کوب بین ۱/۱۸٪ و ۶/۶۷٪ به‌دست آمد و میانگین آن برابر با ۳/۰۳٪ بود. میانگین افت کل در کمباین کاه‌کوب ۵/۴۴٪ اندازه‌گیری شد. اختلاف اصلی کمباین کاه‌کوب با معمولی در واحدهای کوبش، جداکننده و تمیزکننده و به تبع آن، تفاوت در افت انتهای کمباین می‌باشد. همان‌طور که مشخص است اختلاف زیادی در افت انتهای کمباین کاه‌کوب با معمولی وجود دارد و افت انتها در کمباین کاه‌کوب نسبت به کمباین معمولی، به شرایط حساس‌تر می‌باشد. میانگین افت سکوی برش و بدنه در کمباین‌های معمولی جاندیر به‌ترتیب ۱/۴۵٪ و ۱/۱۳٪ اندازه‌گیری شد که در مطالعه کنونی میانگین آن‌ها در کمباین کاه‌کوب به‌ترتیب ۱/۱۷٪ و ۱/۰۹٪ به‌دست آمد.



شکل ۲- اثر متقابل سه گانه عملکرد*مدل کمباین*سرعت پیشروی بر صفت افت کیفی کمباین (ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند فاقد تفاوت آماری معنادار بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد می‌باشند)

Fig. 2. Three-way interactions of grain yield*combine harvester model*ground speed on quality loss (Columns with at least one similar letter have no statistically significant difference based on Duncan's test at the 5% level.)

ظرفیت زراعی

از مواردی که در استفاده از کمباین‌های کاه کوب در سطح خرد و کلان باید به آن توجه ویژه شود، ظرفیت زراعی کمباین کاه کوب است. میانگین ظرفیت کمباین کاه کوب و معمولی در عملکردهای مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش عملکرد، زمان لازم برای برداشت هر هکتار با کمباین کاه کوب، به شدت و تا ۸ برابر افزایش می‌یابد. افزایش زمان برداشت و کاهش ظرفیت زراعی کمباین کاه کوب متأثر از کاهش عرض سکوی برش (عرض کار واقعی)، کاهش سرعت پیشروی و بازده کمباین است. در کمباین‌های معمولی تنها خالی کردن دانه از مخزن وجود دارد (کمباین‌های جدید در حین برداشت عمل تخلیه دانه را نیز انجام می‌دهند) ولی در کمباین کاه کوب علاوه بر دانه، تخلیه کاه نیز وجود دارد که موجب افزایش تلفات زمانی می‌شود. از طرف دیگر، به دلیل افزایش فشار بر محورها، بلبرینگ‌ها، پولی و تسمه‌ها، زنجیرها، اتصالات چرخ عقب و موتور و همچنین کاهش کیفیت قطعات، خرابی و توقف (زمان لازم برای تعمیر و سرویس) این نوع کمباین در فصل برداشت نسبت به کمباین معمولی بیش‌تر می‌باشد. این موارد موجب شده است که در برخی موارد کشاورزان با کمبود کمباین جهت برداشت مزارع و تأخیر در برداشت مواجه شوند. این موضوع در سال‌های پر باران که عملکرد مزارع دیم افزایش می‌یابد، به روشنی مشهود است. با توجه به این‌که درصد بسیار زیادی از

کمباین‌های معمولی به کاه کوب تبدیل می‌شوند (بر اساس آمار جهاد کشاورزی استان لرستان، بیش از ۸۵ درصد کمباین‌ها در فصل برداشت ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ از نوع کاه کوب بودند) و ظرفیت برداشت کشور به شدت کاهش پیدا می‌کند، متولیان امر باید این مسئله را در اولویت برنامه‌ریزی تولید و تأمین کمباین کشور قرار دهند.

بررسی اقتصادی

هزینه برداشت با کمباین کاه کوب در منطقه به صورت‌های متفاوتی در نظر گرفته می‌شود که به صورت ساعتی، مخزن کاه و توافقی است که در سال‌های اخیر بیش‌تر به صورت توافقی بوده است. در سال ۱۳۹۹ هزینه برداشت هر هکتار برای مزارع با عملکرد کم، متوسط و زیاد به ترتیب حدود ۴، ۸ و ۱۰ میلیون ریال بوده است. در سال ۱۳۹۹، هزینه برداشت هر هکتار با کمباین جاندر ۱۰۵۵ و ۱۱۶۵ که جزو کمباین‌های سبک و نیمه‌سنگین به حساب می‌آیند، ۴ میلیون ریال بود. قیمت هر کیلوگرم کاه در فصل برداشت ۵۰۰۰ ریال و در فصل زمستان و نیاز ۱۸۳۳۰۰ ریال در سال ۱۳۹۹ بود. میانگین نسبت تولید کاه به دانه در عملکرد کم، متوسط و زیاد به ترتیب ۱/۳۳، ۱/۱۳ و ۱/۴۲ به دست آمد. بر اساس این نسبت‌ها و مزارعی که عملیات اندازه‌گیری در آن‌ها انجام گرفت مقدار تولید کاه در هر هکتار تعیین گردید که در جدول ۴ نشان داده شده است.

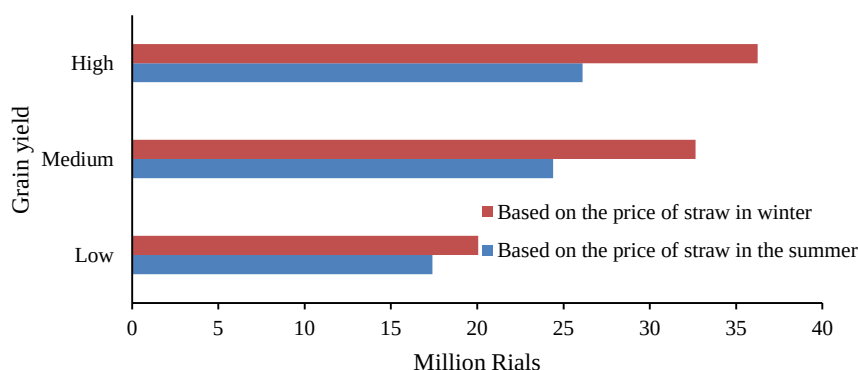
جدول ۴- زمان لازم جهت برداشت و مقدار کاه تولیدی و درآمد حاصل از آن در هکتار

Table 4- Required time to harvest each hectare and the amount and income of straw collected per hectare

عملکرد Grain yield (t.ha ⁻¹)	زمان لازم برای برداشت یک هکتار (دقیقه) Required time for harvesting (mine/ha)				کاه تولیدی در هکتار Collected straw per hectare			
	JD1055		JD1165		کمباین معمولی Conventional combine		کمباین کاه‌کوب Straw collecting combine	
	معمولی Conventional	کاه کوب Straw collecting	معمولی Conventional	کاه کوب Straw collecting	مقدار Amount (kg)	درآمد (میلیون ریال) Income (million Rials)	مقدار Amount (kg)	درآمد (میلیون ریال) Income (million Rials)
<1	44	60	38	45	900	4.5	1000	5
1 to 2	60	60 to 150	50	100 to 135	1550	7.8	1750	8.8
2 to 5	60 to 100	180 to 280	50 to 90	135 to 240	5450	27.3	6070	30.4
>5	100 to 150	279 to 500	90 to 135	240-420	9500	47.5	10500	52.5

منطقه مورد استقبال قرار نگرفت، شامل استفاده از چپر با هد برشی همراه با تریلی مخصوص حمل کاه است. درآمد ناخالص کاه تولیدی بر اساس قیمت فصل تولید (۵۰۰۰ ریال به ازای هر کیلوگرم، در تابستان ۱۳۹۹) در جدول ۴ نشان داده شده است. درآمد ناخالص تولید کاه بر اساس قیمت کاه در فصل زمستان، ۳/۷ برابر می‌شود. میانگین درآمدی (ILoss) که کشاورز به دلیل ریزش بیشتر کمباین کاه‌کوب نسبت به کمباین معمولی در هر هکتار از دست می‌دهد برای مزارع با عملکرد کم، متوسط و زیاد به ترتیب ۱/۷۲، ۰/۷۹ و ۳/۰۱ میلیون ریال به دست آمد. قیمت هر کیلوگرم گندم در سال ۱۳۹۹ بر اساس قیمت تضمینی خرید گندم برابر با ۲۷ هزار ریال در نظر گرفته شد. اختلاف درآمد حاصل از برداشت (ΔI) با کمباین کاه‌کوب و معمولی در عملکردهای مختلف و همچنین حداقل و حداکثر قیمت کاه در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در همه عملکردها و در حداقل و حداکثر قیمت کاه، برداشت با کمباین کاه‌کوب نسبت به کمباین معمولی در منطقه مورد مطالعه اقتصادی‌تر می‌باشد.

لازم به ذکر است که وزن کاه شامل دانه‌های سالم و شکسته حاصل از افت واحدهای کوبش و تمیزش نیز می‌باشد. در سال‌های اخیر روش‌های به‌نژادی موجب معرفی ارقام پاکوتاه گندم و کاهش نسبت کاه به دانه شده است و انتظار می‌رود در آینده استفاده از این نوع ارقام در بین کشاورزان بیشتر شود که کمباین کاه‌کوب با کف‌بر کردن محصول می‌تواند برای برداشت هم‌زمان دانه و کاه این نوع ارقام مناسب باشد. جمع‌آوری کاه پس از برداشت با کمباین معمولی با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که متداول‌ترین آن‌ها شامل استفاده از ادوات جمع‌آوری کاه مانند دروگر شانه‌ای و استوانه‌ای (بیشتر از نوع شانه‌ای)، شانه، بسته‌بند مکعبی و خرمن‌کوب است. مقدار کاه تولیدی در این روش بر اساس محاسبات و برآوردهای میدانی حدود ۹۰٪ کاه تولیدی با کمباین کاه‌کوب است. به دلیل اینکه تقریباً برداشت کل مزارع دیم با کمباین کاه‌کوب صورت می‌گیرد، محاسبات و برآورد کاه، تنها در مزارع آبی انجام شد. هزینه جمع‌آوری کاه هر هکتار با این روش در سال ۱۳۹۹ حدود ۱۸/۱ میلیون ریال به دست آمد. روش دیگری که در سال‌های گذشته معرفی شده ولی در



شکل ۳- تفاوت درآمد برداشت با کمباین کاه‌کوب و معمولی بر اساس سال ۱۳۹۹

Fig. 3. Difference between income of harvesting with straw collecting and conventional combine harvester types in 2020

می باشد و در محدوده عملکردهای متوسط مزارع کمترین تلفات را ایجاد می کند در حالی که در تغذیه کم و تغذیه زیاد درصد افت کمباین کاه کوب افزایش می یابد. بیشترین تلفات مربوط به واحد انتهایی کمباین می باشد که خود از دو بخش کوبش و تمیزکننده تشکیل شده است. افت انتهایی کمباین در کاه کوب حدود ۲/۲۲٪ بیشتر از کمباین معمولی است. در مزارع با عملکرد کم و متوسط کمباین کاه کوب جاندر ۱۰۵۵ و در عملکرد بالا کمباین کاه کوب ۱۱۶۵ افت کمتری دارد. استفاده از سرعت بالاتر و عرض کار بیشتر در مزارع با عملکرد کم و کاهش سرعت و عرض کار در اراضی با عملکرد زیاد جهت تنظیم نرخ تغذیه و کاهش افت انتهایی کمباین و کل کمباین کاه کوب می تواند مفید باشند. بررسی اقتصادی نشان داد در مناطقی که کاه دارای اهمیت و قیمت بالایی است استفاده از کمباین کاه کوب برای کشاورزان اقتصادی تر از کمباین معمولی می باشد. با این وجود ظرفیت زراعی این نوع کمباین نسبت به کمباین معمولی کاهش یافته است به طوری که زمان برداشت با این نوع کمباین نسبت به کمباین معمولی بستگی به عملکرد مزارع از ۲۰٪ تا ۳/۳ برابر افزایش یافته است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.MA99.330) تشکر و قدردانی می کند.

علاوه بر این موضوع، جمع آوری و تولید کاه پس از برداشت با کمباین معمولی زمان بر است و در برخی موارد، دسترسی به ادوات مورد نیاز برای جمع آوری کاه، به آسانی و در کمترین زمان ممکن صورت نمی پذیرد. در عمل کشاورزان منطقه که تولید کاه برای آن ها بسیار مهم است، این موضوعات را به خوبی دریافته اند و مشاهده شده است که با وجود در دسترس بودن کمباین های معمولی بسیاری از کشاورزان منطقه برداشت مزارع را به تأخیر می اندازند تا با کمباین کاه کوب برداشت کنند. در مناطقی که در نظام کشاورزی آن، دامپروری نقش کمتری دارد و تولید کاه اهمیت زیادی ندارد (در برخی سال ها قیمت آن بسیار کم است) این موارد نمی تواند صادق باشد و ممکن است کمباین های کاه کوب با استقبال کمی مواجه شوند.

نتیجه گیری

مدل کمباین، میزان عملکرد مزرعه و همچنین سرعت پیشروی کمباین بر میزان افت واحدهای مختلف و افت کل کمباین کاه کوب اثر دارند. درصد افت کل کمباین کاه کوب با افزایش عملکرد و افزایش نرخ تغذیه به دلیل کاهش خرد شدن دانه ها در سیلندر کوبنده ابتدا کاهش می یابد و سپس با افزایش بار بر روی واحد تمیزکننده و الک ها افزایش می یابد. بیشترین درصد افت در عملکرد کم مشاهده گردید ولی مقدار ریزش در این عملکرد نسبت به عملکرد متوسط و زیاد کم تر بود. کمترین درصد افت کمباین کاه کوب در عملکرد متوسط می باشد. بررسی ها نشان داد تغذیه در کمباین کاه کوب بسیار تأثیرگذار

References

1. Anonymous. (2017). *Technical instructions for combine harvesters and harvesting*. Agricultural Engineering Research Institute, Ministry of Agriculture Jihad, Iran.
2. Behrooz-Lar, M. (2000). *Principles of Design of Agricultural Machinery*. Scientific Publish Center of Islamic Azad University. Tehran, Iran. (in Persian).
3. FAO. (2019). Resources, Statistics. FAOSTAT. Data. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
4. Gheleshkhani, A. (2017). Wheat Harvesting Performance of the Straw Mounting Compare with a Usual Type. *Biomedical Engineering*, 6(3), 1-9. Doi: 10.3390/su12124936.
5. Jahad Agricultural Organization of Lorestan. (2020). Agricultural product statistics. Crop production. Office of the deputy of plant production improvement.
6. Jalali, A., & Abdi, R. (2014). The effect of ground speed, reel rotational speed and reel height in harvester losses. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 5(2), 221-231.
7. Karmulla Chaab, R., Karparvarfard, S., Rahmanian-Koushaki, H., Mortezaei, R., & Mohammadi, M. (2020). Predicting header wheat loss in a combine harvester, a new approach. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(2), 179-184. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.09.002>.
8. Khosravani, A., & Rahimi, H. (2006). Elevation of wheat losses for a combine harvesting in Fars province. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(25), 113-130. (in Persian).
9. Mirzazadeh, A., Abdollahpour, S. H., & Moghadam, M. (2011). Effect of Design Parameters on Separation of Grain in Thresher to Minimize Separation Loss of Combine. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 21(3), 1-11. (in Persian).
10. Mohd, A. A., Omar, A. R., Mutasim, E. A., & Mamou, I. D. (1997). On farm evaluation of combine harvester losses in the Gezira Scheein Sudan. *AMA*. 28(2): 23-25. <https://doi.org/10.51542/ijscia.v2i2.17>.
11. Patel, S. K., & Varshney, B. P. (2007). Effect of Operational Speed and Moisture Content of Wheat Crop on Plot

- Combine Harvest. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 38(4), 51-55.
12. Rahama, A. M., & Ali, M. E. (1990). On farm evaluation combine harvester losses in the Gomin in Sudan. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 20(2), 27-31.
 13. Rahmati, M. H., Razdari, A., Izadi, M., & Yoosefian, S. H. (2015). Evaluation and comparison of wheat harvest losses for two common combines in Khorramabad Township. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 3(1), 1-8 (in Persian).
 14. Rostami, S., Lotfalian, M., & Hoseinzadeh-Samani, B. (2018). Assessment and Comparison of Conventional and Straw Walker Combines Harvesting Losses in Fars Province. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 19(70): 85-96. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/erams.2018.107988.1140>
 15. Sabir, M. S., Iqbal, M., & Yasin, M. (2005). Influence of selected combine and crop parameters on kernel damage and threshability of wheat. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 42(3-4), 112-116.
 16. Sheraddin, B., & Ghulan, J. (1991). Influence of timing and date of harvest on wheat grain losses. *AMA*, 22(2): 56-58.
 17. Sotnar, M., Pospisil, J., Marecek, J., Dokukilova, T., & Novotny, V. (2018). Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses. *Acta Technologica Agriculturae*, 21(3), 105-108. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>.
 18. Sumner, P. E., & Williams, E. J. (2012). *Measuring field losses from grain combines*. University of Georgia. College of Agricultural and Environmental Sciences.
 19. White, J. A., Case, K. E., & Pratt, D. B. (2012). *Principle of engineering economic analysis*. 6th Edition. Wiley.

Contents

Research Articles

Development and Evaluation of a Semi-automatic Cucumber Seed Extractor	455
I. Ahmadi, M. Golabadi, A. Eghtedari Naeini	
Design and Construction of a Cabinet Dryer for Food Waste and Evaluation of its Kinetics and Energy Consumption	469
A. Khaloahmadi, O. R. Roustapour, A. M. Borghaee	
Evaluation of a Chickpea Harvesting Header with Perforated Plate	483
A. Niazi, H. Golpira, H. Samimi Akhijahani	
Energy Flow Simulation of the Uneven Span Glass Greenhouse with Special Structure using Computational Fluid Dynamics (CFD)	499
F. Motazedian, M. Taki, R. Farhadi, M. Rahmati- Joneidabad	
Monitoring Rice Land Changes Using GIS and RS	517
A. Mesri, F. Rahimi-Ajdadi, I. Bagheri	
Distinguishing Rain-fed and Irrigated Crops in Hamadan Province Using Spectral Indices of Satellite Images	531
H. Mohamadi Monavar, S. Zibazadeh	
A Data-driven Model for Predicting the Yield of Recoverable Sugar from Sugarcane	545
F. Nadernezhad, D. M. Imani, M. R. Rasouli	
Numerical Simulation of the Performance and Emission of a Diesel Engine with Diesel-biodiesel Mixtures	561
S. R. Mousavi Seyedi, S. M. R. Miri	
Investigating the Effect of Increasing Nano Cellulose to Diesel Fuel on Emission and Performance of Internal Combustion Engine	577
A. Waismoradi, M. E. Khorasani Ferdavani, H. Bahrami, S. M. Safieddin Ardebili, H. Zakidizaji	
Investigating the Interaction between Soil and Cultivator Blade by Numerical Simulation and Validation of Results by Soil Bin Tests	589
H. Mahboub Yangeje, A. Mardani Korani	
Evaluation of Mechanical and Chemical Parameters of Okra with Chitosan Coating in Nano Packaging Films and Atmospheric Modified Conditions	563
A. Heydarian, E. Ahmadi, F. Dashti, A. Normohammadi	
Economic Analysis and Evaluation of Grain Losses of Two Common Straw Collecting Combine Harvester: A Case Study, Azna County, Lorestan, Iran	577
H. Amiri, A. Asakereh, M. Soleymani	

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 12

No. 4

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>



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 12

No. 4

2022

Journal of Agricultural Machinery



Iranian Society of
Mechanical Engineers
(ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

Development and Evaluation of a Semi-automatic Cucumber Seed Extractor 455

I. Ahmadi, M. Golabadi, A. Eghtedari Naeini

Design and Construction of a Cabinet Dryer for Food Waste and Evaluation of its Kinetics and Energy Consumption..... 469

A. Khaloahmadi, O. R. Roustapour, A. M. Borghae

Evaluation of a Chickpea Harvesting Header with Perforated Plate 483

A. Niazi, H. Golpira, H. Samimi Akhijahani

Energy Flow Simulation of the Uneven Span Glass Greenhouse with Special Structure using Computational Fluid Dynamics (CFD) 499

F. Motazedian, M. Taki, R. Farhadi, M. Rahmati- Joneidabad

Monitoring Rice Land Changes Using GIS and RS 517

A. Mesri, F. Rahimi-Ajdadi, I. Bagheri

Distinguishing Rain-fed and Irrigated Crops in Hamadan Province Using Spectral Indices of Satellite Images..... 531

H. Mohamadi Monavar, S. Zibazadeh

A Data-driven Model for Predicting the Yield of Recoverable Sugar from Sugarcane 545

F. Nadernezhad, D. M. Imani, M. R. Rasouli

Numerical Simulation of the Performance and Emission of a Diesel Engine with Diesel-biodiesel Mixtures 561

S. R. Mousavi Seyed, S. M. R. Miri

Investigating the Effect of Increasing Nano Cellulose to Diesel Fuel on Emission and Performance of Internal Combustion Engine 577

A. Waismoradi, M. E. Khorasani Ferdavani, H. Bahrami, S. M. Safieddin Ardebili, H. Zakidizaji

Investigating the Interaction between Soil and Cultivator Blade by Numerical Simulation and Validation of Results by Soil Bin Tests 589

H. Mahboub Yangeje, A. Mardani Korani

Evaluation of Mechanical and Chemical Parameters of Okra with Chitosan Coating in Nano Packaging Films and Atmospheric Modified Conditions..... 563

A. Heydarian, E. Ahmadi, F. Dashti, A. Normohammadi

Economic Analysis and Evaluation of Grain Losses of Two Common Straw Collecting Combine Harvester: A Case Study, Azna County, Lorestan, Iran 577

H. Amiri, A. Asakerch, M. Soleymani