

Effect of Moisture Shock on the Fracture Behaviour of Dryland Wheat Stems (Sardari Cultivar) under Simulated Dynamic Loading by a Combine Harvester Reel

S. Zandieh¹, H. Golpira², T. Mesri Gundoshmian^{1*}, M. Rezaei¹

1- Recycling and Renewable Energy Institute, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Department of Biosystems Mechanical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: Mesrigtm@uma.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.98855.1492>

Introduction

Wheat is one of the most important strategic crops in Iran, and rainfed wheat plays an important role in the agricultural production system. Despite the high level of mechanisation in wheat harvesting, mechanical interaction between crop stems and combine harvester components can contribute to crop damage and harvesting losses. The combine harvester reel is one of the first moving components to interact directly with standing crop stems. The intensity of this interaction depends on reel rotational speed, crop mechanical properties, stem geometry, and moisture condition. In rainfed wheat, pre-harvest rainfall may expose mature stems to a wetting–drying cycle, potentially altering their mechanical properties and resistance to reel loading. Therefore, this study investigated the effect of moisture shock, defined as wetting followed by subsequent drying, on the mechanical properties and fracture behaviour of rainfed wheat stems of the Sardari cultivar under simulated combine harvester reel loading.

Materials and Methods

Mature and healthy Sardari wheat stems were collected from rainfed wheat fields in Bijar, Kurdistan Province, Iran. The samples were divided into two groups: conventional stems and moisture-shock-treated stems. Approximately half of the samples were manually wetted with water for 30 min and then subjected to a 72-h drying period under environmental conditions, including exposure to sunlight during the daytime and shade during the night. This procedure was used as a controlled laboratory simulation of a wetting–drying cycle.

Stem moisture content was determined using the oven-drying method at 105 ± 2 °C for 24 h. Physical and mechanical properties, including stem diameter, wall thickness, cross-sectional area, shear force, and shear strength, were evaluated. The moisture content of the tested stems was approximately 11.8%. Stem breaking force was measured using a Lutron FG-5000A digital force gauge. For the final statistical comparison, 30 stems were evaluated in each group. An independent-samples t-test was used to compare breaking force, and Cohen's d was calculated to determine the effect size.

A laboratory-scale combine reel with a radius of approximately 0.45 m was used to simulate reel-induced loading. The reel rotational speed was varied from 18 to 96 rpm, corresponding to a peripheral speed range of approximately $0.85\text{--}4.52$ m s⁻¹. Stems were directly exposed to the moving reel bars, and the rotational speed was gradually increased until stem failure occurred. The critical rotational speed was recorded using a laser tachometer.

To characterise the progressive failure of stems, survival analysis was performed using Kaplan–Meier curves, the Log-rank test, and the Cox proportional hazards model. Reel rotational speed was considered the loading–progression variable, while stem breakage was defined as the failure event. Stems that did not break by 96 rpm were considered censored observations. Statistical significance was evaluated at $p < 0.05$.

Results and Discussion

Moisture shock substantially reduced the mechanical resistance of wheat stems. The mean breaking force decreased from 1.284 ± 0.12 N in conventional stems to 0.748 ± 0.09 N in moisture-shock-treated stems, representing an approximately 42% reduction. This difference was statistically significant ($t(58) = 12.35$, $p < 0.001$), with a large effect size (Cohen's $d = 1.6$; 95% CI: 1.1–2.0). A positive relationship between stem diameter and breaking force was observed in both groups, with R^2 values of approximately 0.68 for conventional stems and 0.61 for moisture-shock-treated stems.

The reel simulation also demonstrated a marked difference in the failure threshold of the two groups.

Conventional stems first began to break at 74 rpm, whereas moisture-shock-treated stems began to break at 48 rpm. At the maximum tested speed of 96 rpm, 12 of 30 conventional stems and 28 of 30 moisture-shock-treated stems had broken. These results indicate that moisture shock reduced the ability of stems to withstand the mechanical loading imposed by the reel.

Survival analysis confirmed the increased vulnerability of moisture-shock-treated stems. Kaplan–Meier curves showed a lower probability of remaining unbroken in the moisture-shock group, particularly over the approximate range of 45–75 rpm. The Log-rank test demonstrated a significant difference between the two groups ($\chi^2(1) = 15.7$, $p < 0.001$). The Cox proportional hazards model estimated a hazard ratio of 3.4 (95% CI: 2.1–5.5), indicating that the instantaneous risk of stem breakage was approximately 3.4 times higher for moisture-shock-treated stems than for conventional stems under the tested loading conditions.

Conclusion

The findings demonstrate that moisture shock significantly reduced the mechanical resistance of Sardari wheat stems and increased their susceptibility to breakage under simulated combine harvester reel loading. The approximately 42% reduction in breaking force and the 3.4-fold increase in breakage hazard indicate that a wetting–drying cycle can substantially alter the mechanical condition of mature wheat stems. Under the specific laboratory conditions of this study, conventional stems tolerated reel speeds of approximately 70–75 rpm, whereas moisture-shock-treated stems began to break at lower speeds. Therefore, reducing reel speed to below approximately 45 rpm following a moisture-shock event may help reduce stem breakage under conditions similar to those investigated. This value should be regarded as an experimental threshold specific to the Sardari cultivar and the tested conditions. Further field studies involving different cultivars, moisture regimes, and harvesting systems are required to validate its applicability.

Acknowledgement

This research was supported by Kurdistan University. The authors gratefully acknowledge the cooperation of Bijar farmers and the technical assistance of the Biological Materials Engineering Laboratory staff.

Keywords: Combine harvester, Dynamic loading, Moisture shock, Survival analysis, Wheat stem fracture

بررسی اثر شوک رطوبتی بر رفتار شکست ساقه گندم دیم رقم سرداری تحت بارگذاری دینامیکی شبیه‌سازی شده چرخ‌فلک کمباین

سعید زندیه^۱، هیوا گل‌پیرا^۲، ترحم مصری گندشمین^{۳*}، مریم رضائی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۲

چکیده

شوک رطوبتی ناشی از خیس‌شدن و خشک‌شدن مجدد ساقه گندم در دوره پیش از برداشت می‌تواند مقاومت مکانیکی ساقه را کاهش داده و حساسیت آن را به بارگذاری ناشی از چرخ‌فلک کمباین افزایش دهد. در این پژوهش، اثر شوک رطوبتی بر رفتار شکست ساقه گندم دیم رقم سرداری تحت بارگذاری دینامیکی شبیه‌سازی شده چرخ‌فلک کمباین بررسی شد. آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی ساقه، نیروی شکست، نیروی برش و مقاومت برشی بود. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط کاری چرخ‌فلک، از چرخ‌فلکی با شعاع مشخص استفاده شد و سرعت‌های دورانی بر اساس رابطه بین سرعت دورانی و سرعت محیطی چرخ‌فلک تعیین شدند. برای تحلیل اثر شوک رطوبتی بر مقاومت ساقه و آستانه شکست آن، از تحلیل بقا با استفاده از منحنی کاپلان-مایر و مدل خطر نسبی کاکس استفاده شد. نتایج نشان داد نیروی شکست ساقه‌های معمولی ($12 \pm 0.1/2844$ نیوتن) به‌طور معناداری بیشتر از ساقه‌های تحت شوک رطوبتی ($9 \pm 0.1/7488$ نیوتن) بود ($0.001 < \text{احتمال خطا}$). ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در سرعت دورانی ۴۸ دور بر دقیقه دچار شکست شدند، درحالی‌که شکست ساقه‌های معمولی در سرعت ۷۴ دور بر دقیقه مشاهده شد. نتایج تحلیل بقا نشان داد خطر شکست ساقه‌های تحت شوک رطوبتی $3/4$ برابر ساقه‌های معمولی بود ($5/1 - 2/1$: فاصله اطمینان ۹۵ درصد، $3/4 = \text{نسبت خطر}$). این یافته‌ها نشان‌دهنده کاهش مقاومت مکانیکی ساقه در اثر شوک رطوبتی و کاهش آستانه شکست آن در برابر بارگذاری چرخ‌فلک است. نتایج پژوهش می‌تواند در ارزیابی وضعیت مکانیکی محصول و تنظیم سرعت چرخ‌فلک متناسب با شرایط محصول در زمان برداشت مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری دینامیکی، تحلیل بقا، چرخ‌فلک کمباین، شکست ساقه گندم، شوک رطوبتی

مقدمه

گندم یکی از مهم‌ترین محصولات راهبردی در تأمین امنیت غذایی ایران است و گندم دیم سهم قابل‌توجهی از تولید این محصول در کشور دارد. بر اساس آخرین آمار منتشرشده در آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی، در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴، تولید گندم کشور حدود ۱۴ میلیون تن گزارش شده است که نزدیک به ۹ میلیون تن آن از اراضی آبی و حدود ۵ میلیون تن از اراضی دیم حاصل شده است (Ministry Agriculture-Jihad of Iran, 2023, 2025). با توجه به وابستگی تولید گندم دیم به شرایط اقلیمی و تغییرپذیری وضعیت محصول در دوره برداشت، کاهش تلفات برداشت و بهبود عملکرد ماشین‌های برداشت در این شرایط اهمیت ویژه‌ای دارد. در برداشت مکانیزه غلات، سرعت و شرایط عملکرد چرخ‌فلک از

عوامل مؤثر بر نحوه برخورد با ساقه، هدایت محصول به سمت سکوی برش و در نهایت عملکرد هد برداشت است. افزایش بیش از حد سرعت چرخ‌فلک می‌تواند شدت برخورد میله‌ها یا پره‌ها با ساقه و احتمال شکست ساقه، جداشدن سنبله یا ریزش دانه را افزایش دهد، در حالی‌که سرعت ناکافی نیز ممکن است موجب اختلال در هدایت و انتقال مناسب گیاه به سکوی برش شود (Chaab, Karparvarfard, Rahmanian-Koushkaki, Mortezaei, & Mohammadi, 2020). از این رو، انتخاب شرایط مناسب عملکرد چرخ‌فلک باید متناسب با سرعت پیشروی، سرعت محیطی چرخ‌فلک، ارتفاع و وضعیت ایستایی محصول و همچنین شرایط فیزیکی و رطوبتی ساقه انجام شود.

مطالعات انجام‌شده در زمینه تنظیمات چرخ‌فلک نشان داده‌اند که سرعت عملکرد چرخ‌فلک و نسبت سرعت محیطی آن به سرعت

(*) نویسنده مسئول: (Email: Mesrigtm@uma.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.98855.1492>

۱- پژوهشکده بازیافت و انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

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

پیشروی کمباین، از عوامل مهم مؤثر بر عملکرد هد و تلفات برداشت هستند (Abdi & Jalali, 2013; Soleimani & Kasraie, 2012). عبدی و جلالی (Abdi & Jalali, 2013) با ارائه یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی تلفات سکوی برش کمباین نشان دادند که سرعت چرخ‌فلک و نسبت سرعت خطی آن به سرعت پیشروی کمباین، از عوامل مؤثر در تعیین میزان تلفات هستند. سلیمانی و کسرای (Soleimani & Kasraie, 2012) نیز در بررسی برداشت کلزا نشان دادند که تنظیم مناسب شرایط عملکرد چرخ‌فلک می‌تواند در کاهش تلفات دانه مؤثر باشد. همچنین، لی و همکاران (Li et al., 2021) تأثیر سرعت چرخ‌فلک را بر تلفات دانه بررسی کرده و نقش تنظیم مناسب آن را در کاهش تلفات برداشت مورد تأکید قرار دادند. خواجه‌پور (Khajeh-Pour, 1994) نیز اهمیت تنظیم مناسب اجزای عملیاتی کمباین را در کاهش تلفات برداشت مطرح کرده است. از سوی دیگر، مطالعات مربوط به برهم‌کنش چرخ‌فلک و محصول نشان داده‌اند که پاسخ ساقه به نیروی واردشده تابعی از ویژگی‌های مکانیکی ساقه، هندسه گیاه و شرایط بارگذاری است (Hirai, Inoue, Mori, & Hashiguchi, 2002; Hirai, Inoue, & Mori, 2004). هیرای و همکاران (Hirai et al., 2004) با استفاده از یک سامانه آزمایشی شبیه‌سازی چرخ‌فلک، نیروی واکنش ساقه‌های برنج و گندم را تحت شرایط بارگذاری شبه‌استاتیکی بررسی کردند و نشان دادند که شرایط اعمال بار و سرعت بارگذاری می‌تواند بر پاسخ مکانیکی ساقه تأثیرگذار باشد. همچنین، هیرای و همکاران (Hirai et al., 2002) روابط میان خمش ساقه و نیروهای واردشده در جریان برداشت مکانیزه را بررسی کردند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که علاوه بر ویژگی‌های ذاتی ساقه، نحوه اعمال نیرو و شرایط برهم‌کنش ماشین و محصول نیز در تغییر شکل و احتمال شکست ساقه مؤثر است. با وجود این، بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین بر تنظیمات چرخ‌فلک، نسبت سرعت چرخ‌فلک به سرعت پیشروی و مدل‌سازی برهم‌کنش ماشین و گیاه تمرکز داشته‌اند، در حالی که اثر هم‌زمان شرایط رطوبتی ساقه و شرایط عملکرد چرخ‌فلک بر آستانه شکست ساقه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌ویژه، اطلاعات تجربی درباره تغییر مقاومت ساقه گندم پس از خیس‌شدن و خشک‌شدن مجدد و ارتباط آن با احتمال شکست تحت بارگذاری شبیه‌سازی‌شده چرخ‌فلک محدود است. این موضوع در شرایط برداشت گندم دیم اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا تغییرات رطوبتی ناشی از بارندگی پیش از برداشت می‌تواند وضعیت مکانیکی ساقه را تغییر داده و پاسخ آن به برخورد با چرخ‌فلک را تحت تأثیر قرار دهد.

این خلأ پژوهشی از آن جهت اهمیت دارد که شرایط رطوبتی ساقه در زمان برداشت ثابت نیست و بارندگی پیش از برداشت می‌تواند وضعیت مکانیکی ساقه‌های بالغ و خشک را تغییر دهد. بنابراین، صرفاً تعیین یک تنظیم ثابت برای چرخ‌فلک، بدون توجه به وضعیت فیزیکی

و مکانیکی محصول، ممکن است برای همه شرایط برداشت مناسب نباشد. بر این اساس، بررسی اثر شوک رطوبتی بر مقاومت و رفتار شکست ساقه تحت بارگذاری شبیه‌سازی‌شده چرخ‌فلک می‌تواند درک دقیق‌تری از سازوکار شکست ساقه و ارتباط آن با شرایط عملکرد چرخ‌فلک فراهم کند.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در طراحی و ساخت کمباین‌های مدرن، یکی از چالش‌های مهم در برداشت مکانیزه گندم، تلفات ناشی از برهم‌کنش نامناسب اجزای برداشت با محصول است. بخشی از این تلفات می‌تواند در اثر شکست ساقه و جداشدن سنبله پیش از ورود کامل محصول به سکوی برش رخ دهد و در شرایط متغیر محیطی، از جمله بارندگی پیش از برداشت و تغییرات رطوبتی بافت ساقه، تشدید شود (Keshavarz et al., 2002). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که در فرایند تحقیق و توسعه ماشین‌های کشاورزی، شناخت ویژگی‌های محصول و پاسخ مکانیکی آن در برابر نیروهای اعمال‌شده توسط ماشین، می‌تواند در بهبود طراحی و سازگاری ماشین با شرایط مختلف محصول مؤثر باشد (Walunj, Chen, Tian, & Zeng, 2023). از این‌رو، مطالعه تغییرات مکانیکی محصولات زراعی ناشی از عملیات مکانیکی، برای بهینه‌سازی فرایند طراحی و توسعه ماشین‌آلات اهمیت دارد.

پاسخ‌های مکانیکی ساقه‌های محصولات زراعی، از جمله خمیدگی و تغییر وضعیت، با برهم‌کنش بین ماشین و محصول در حین برداشت و همچنین با خواص مکانیکی ذاتی گیاه ارتباط دارند. درک این پاسخ‌ها می‌تواند به توسعه روش‌های مناسب‌تر برای تحلیل و شبیه‌سازی عملکرد سامانه‌های برداشت کمک کند. در همین زمینه، پژوهشگران مختلف مدل‌های خمش و تغییر شکل گیاهان را تحت اثر نیروهای خارجی و بر اساس ویژگی‌های مکانیکی ساقه، محاسبات نظری و روش‌های شبیه‌سازی بررسی کرده‌اند (Berry et al., 2004; Liu et al., 2025).

در عملکرد واقعی چرخ‌فلک، می‌توان سه مرحله اصلی را در برهم‌کنش آن با محصول در نظر گرفت: (۱) تماس و برخورد میله یا پره چرخ‌فلک با ساقه، (۲) ایجاد خمش و تغییر شکل در ساقه تحت اثر نیروی اعمال‌شده و (۳) هدایت گیاه یا بخش بریده‌شده محصول به سمت سکوی برداشت تحت تأثیر نیروی اعمال‌شده از سوی چرخ‌فلک و نیروهای اینرسی ناشی از حرکت محصول (Jin, Qi, Liu, Yang, & Ni, 2023). بنابراین، نیروی تعاملی میان چرخ‌فلک و گیاه تنها تابع سرعت چرخ‌فلک نیست، بلکه به ویژگی‌های مکانیکی ساقه، هندسه گیاه، وضعیت محصول و شرایط تماس نیز وابسته است.

چین و همکاران (Jin et al., 2023) با استفاده توأمان از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ANSYS و ADAMS، پارامترهای مؤثر بر عملکرد چرخ‌فلک در برداشت سویا با ارتفاع‌های مختلف را بررسی کردند. در مدل ارائه‌شده، عواملی از جمله ارتفاع چرخ‌فلک، موقعیت

می‌تواند وضعیت محصول را در فاصله زمانی کوتاهی تغییر دهد (Liu et al., 2025). از این رو، بررسی تجربی تغییرات مقاومت و رفتار شکست ساقه در چنین شرایطی می‌تواند در شناخت بهتر برهم‌کنش ماشین و محصول مؤثر باشد.

با وجود اهمیت این موضوع، بررسی هم‌زمان تغییر وضعیت رطوبتی ساقه، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن و رفتار شکست ساقه تحت شرایط بارگذاری شبیه‌سازی شده ناشی از عملکرد چرخ‌فلک، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، بررسی تغییرات مقاومت و رفتار شکست ساقه گندم در پی شوک رطوبتی می‌تواند ضمن تبیین بهتر سازوکار مکانیکی شکست ساقه، مبنایی برای درک ارتباط میان وضعیت رطوبتی محصول، شرایط عملکرد چرخ‌فلک و احتمال بروز تلفات ناشی از شکست و جدا شدن محصول در مرحله برداشت فراهم کند.

در این پژوهش، منظور از شوک رطوبتی، تغییر وضعیت رطوبتی ساقه‌های بالغ و خشک گندم در اثر خیس شدن ناشی از بارندگی پیش از برداشت و خشک شدن مجدد آن‌ها تحت شرایط محیطی است. با توجه به مطالعات پیشین، رطوبت ساقه گندم در محدوده حدود ۲۳-۸ درصد بر پایه تر می‌تواند به‌طور محسوسی بر برخی ویژگی‌های مکانیکی، به‌ویژه مقاومت خمشی و مدول یانگ، اثر گذار باشد (Tavakoli et al., 2009). در پژوهش حاضر، بنابراین، محدوده رطوبتی ۲۳-۱۰ درصد بر پایه تر به‌عنوان دامنه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود تا شرایط ساقه خشک در زمان برداشت و افزایش رطوبت ناشی از بارندگی پیش از برداشت را پوشش دهد.

در این راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر شوک رطوبتی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و رفتار شکست ساقه گندم دیم رقم سرداری تحت شرایط بارگذاری شبیه‌سازی شده ناشی از عملکرد چرخ‌فلک کمباین انجام شد. در این پژوهش، منظور از شوک رطوبتی، تغییر وضعیت رطوبتی ساقه‌های بالغ و خشک گندم در اثر خیس شدن ناشی از بارندگی پیش از برداشت و خشک شدن مجدد آن‌ها تحت شرایط محیطی است. بررسی این وضعیت از آن جهت اهمیت دارد که گندم، به‌ویژه در مناطق دیم‌کاری، ممکن است در مرحله رسیدگی کامل و هم‌زمان با فصل برداشت در معرض بارندگی قرار گرفته و پس از آن مجدداً خشک شود؛ شرایطی که می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ساقه و در نتیجه مقاومت آن در برابر بارگذاری ناشی از برخورد اجزای برداشت، از جمله چرخ‌فلک کمباین، را تغییر دهد.

بر این اساس، در پژوهش حاضر تفاوت رفتار مکانیکی ساقه‌های معمولی و ساقه‌های تحت شوک رطوبتی بررسی و ارتباط آن با رفتار شکست ساقه تحت بارگذاری شبیه‌سازی شده چرخ‌فلک ارزیابی شد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی برای شناخت بهتر تأثیر شرایط رطوبتی بر رفتار مکانیکی ساقه، ارزیابی مناسب‌تر شرایط عملکرد چرخ‌فلک متناسب با وضعیت محصول و انجام مطالعات میدانی

افقی آن نسبت به محصول، ارتفاع گیاه و نیروی برخورد چرخ‌فلک با ساقه مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین، هیرای و همکاران (Hirai et al., 2004) با طراحی یک سامانه آزمایشی برای شبیه‌سازی عملکرد چرخ‌فلک، نیروی واکنش ساقه‌های برنج و گندم را بررسی کردند که نتایج آن بر اهمیت ویژگی‌های مکانیکی ساقه و شرایط اعمال بار در پاسخ محصول تأکید داشت.

محسنین (Mohsenin, 1970) نیز در بررسی رفتار مکانیکی ساقه‌های گیاهان مختلف نشان داد که نیروی لازم برای برش و شکست ساقه و تنش‌های ایجاد شده در آن، با ویژگی‌های فیزیکی و هندسی ساقه، از جمله قطر، ضخامت و وضعیت رطوبتی، ارتباط دارند. این مبنایی در انتخاب و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ساقه در پژوهش حاضر مورد توجه قرار گرفت.

با توجه به نقش هم‌زمان شرایط عملکرد چرخ‌فلک و وضعیت مکانیکی ساقه در فرایند برداشت، یکی از عوامل محیطی مؤثر بر رفتار مکانیکی ساقه‌های بالغ گندم، تغییرات رطوبتی ناشی از خیس شدن در اثر بارندگی و خشک شدن مجدد در فصل برداشت است. در پژوهش حاضر، این وضعیت با عنوان «شوکی رطوبتی» مورد بررسی قرار گرفته است. شوک رطوبتی می‌تواند وضعیت رطوبتی و در نتیجه رفتار مکانیکی ساقه‌های بالغ و خشک را تغییر دهد و مقاومت آن‌ها را در برابر بارگذاری کاهش داده یا حساسیت آن‌ها را نسبت به شکست افزایش دهد (Tavakoli, Mohtasebi, & Jafari, 2009).

از دیدگاه ساختاری، تغییرات رطوبتی می‌تواند بر اجزای دیواره سلولی و نحوه رفتار مکانیکی بافت ساقه تأثیر گذار باشد. لیگنین، سلولز و همی‌سلولز از مهم‌ترین ترکیبات ساختاری دیواره سلولی گیاه هستند و نقش مهمی در استحکام، سختی و مقاومت ساقه در برابر تغییر شکل و خوابیدگی دارند (Hussain et al., 2019; Mizuno, Kasuga, & Kawahigashi, 2018; Manga-Robles et al., 2021; Zhang et al., 2014; Zhang, Jia, Ma, Ma, & Zhao, 2020). این ترکیبات اجزای اصلی دیواره سلولی و دیواره ثانویه هستند (Kumar, Campbell, & Turner, 2016) و تغییر در وضعیت رطوبتی بافت می‌تواند بر برهم‌کنش میان این اجزا و رفتار مکانیکی ساقه اثر بگذارد (Li et al., 2021; Manga et al., 2021; Ogden, Hoefgen, Roessner, Persson, & Khan, 2018).

در مرحله بلوغ، ساقه‌های گندم به‌دلیل تغییرات ساختاری و لیگنین شدن بافت، ویژگی‌های مکانیکی متفاوتی نسبت به مراحل رشد دارند و تغییرات ناگهانی رطوبت ممکن است پاسخ آن‌ها را در برابر بارگذاری مکانیکی تغییر دهد. این مسئله می‌تواند پس از بارندگی پیش از برداشت اهمیت بیشتری پیدا کند؛ زیرا ساقه‌های خشک ممکن است پس از خیس شدن و خشک شدن مجدد، رفتار مکانیکی متفاوتی نسبت به حالت اولیه نشان دهند. این شرایط به‌ویژه در مناطق دیم‌کاری اهمیت دارد، زیرا تغییرات آب‌وهوایی در دوره برداشت

تکمیلی در شرایط واقعی برداشت فراهم کند.

اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱. بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ساقه گندم دیم رقم سرداری در شرایط معمول و پس از اعمال شوک رطوبتی ناشی از خیس شدن و خشک شدن مجدد ساقه؛
۲. تعیین و مقایسه نیروی لازم برای شکست ساقه در دو وضعیت معمول و تحت شوک رطوبتی و بررسی تأثیر تغییرات رطوبتی بر مقاومت و رفتار شکست ساقه؛
۳. بررسی اثر بارگذاری شبیه‌سازی شده ناشی از عملکرد چرخ‌فلک و تغییر شرایط سرعتی اعمال بار بر رفتار و احتمال وقوع شکست ساقه؛
۴. تحلیل ارتباط میان وضعیت رطوبتی ساقه، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن و رفتار ساقه در برابر نیروهای اعمال شده توسط چرخ‌فلک کمباین؛

۵. فراهم کردن مبنایی تجربی برای شناخت بهتر سازوکار شکست ساقه در شرایط متغیر رطوبتی و کمک به انتخاب و تنظیم مناسب‌تر پارامترهای عملکردی چرخ‌فلک، با هدف کاهش احتمال بروز تلفات ناشی از برهم‌کنش نامناسب چرخ‌فلک و محصول در زمان برداشت. بر این مبنای، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند درک دقیق‌تری از تغییر رفتار مکانیکی ساقه گندم پس از قرارگیری در معرض شوک رطوبتی فراهم کرده و زمینه لازم برای توسعه مطالعات تکمیلی و بهینه‌سازی تنظیمات سامانه‌های برداشت متناسب با شرایط فیزیکی و مکانیکی محصول را فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

هدف اصلی این مطالعه، بررسی اثر شرایط رطوبتی و سرعت دورانی چرخ‌فلک بر رفتار مکانیکی و شکست ساقه گندم دیم در شرایط بارگذاری شبیه‌سازی شده چرخ‌فلک است. آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه خواص مهندسی مواد بیولوژیکی دانشگاه کردستان انجام شد.

در این مطالعه، به‌جای اندازه‌گیری مستقیم تلفات دانه در مزرعه، فرایند شکست ساقه به‌عنوان پاسخ اصلی محصول در برابر بارگذاری چرخ‌فلک مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ساقه‌های گندم دیم رقم سرداری در دو وضعیت رطوبتی شامل ساقه‌های معمولی و ساقه‌های تحت شوک رطوبتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. شوک رطوبتی با هدف شبیه‌سازی شرایطی ایجاد شد که ساقه‌های بالغ و خشک گندم در اثر بارندگی پیش از برداشت خیس شده و سپس در معرض خشک شدن مجدد قرار می‌گیرند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ساقه‌ها اندازه‌گیری و مقاومت آن‌ها در برابر بارگذاری و شکست تعیین شد.

به‌منظور بررسی پاسخ ساقه به شرایط بارگذاری مشابه عملکرد چرخ‌فلک، از یک سامانه آزمایشگاهی شبیه‌ساز چرخ‌فلک استفاده شد و ساقه‌ها در معرض سرعت‌های دورانی مختلف قرار گرفتند. در این روش، سرعت دورانی چرخ‌فلک به‌عنوان متغیر اصلی بارگذاری در نظر گرفته شد و تغییرات رفتار ساقه و وقوع شکست در سرعت‌های مختلف ثبت گردید. بنابراین، نتایج حاصل بیانگر پاسخ مکانیکی ساقه گندم در برابر بارگذاری شبیه‌سازی شده چرخ‌فلک بوده و برای ارزیابی مستقیم عملکرد یک کمباین یا تعیین مقدار تلفات دانه در مزرعه به‌کار نرفته است.

برای تحلیل داده‌های شکست ساقه، از روش تحلیل بقا (Survival Analysis) استفاده شد. در این رویکرد، سرعت دورانی چرخ‌فلک به‌عنوان متغیر متناظر با «زمان» و شکست ساقه به‌عنوان «رویداد» (Event) تعریف شد. ساقه‌هایی که تا حداکثر سرعت آزمایش، یعنی ۹۶ rpm، دچار شکست نشدند، به‌عنوان داده‌های سانسور شده (Censored) در نظر گرفته شدند. به‌منظور مقایسه احتمال بقا و رفتار شکست ساقه‌ها در شرایط رطوبتی مختلف، منحنی‌های Kaplan-Meier ترسیم و مدل رگرسیون کاکس (Cox Proportional Hazards Model) مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد امکان بررسی اثر شرایط رطوبتی و سرعت دورانی چرخ‌فلک بر احتمال وقوع شکست ساقه و مقایسه رفتار دو گروه ساقه را فراهم کرد.

با توجه به ماهیت آزمایش، یافته‌های این پژوهش به‌عنوان شواهد تجربی درباره تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و رفتار شکست ساقه گندم دیم رقم سرداری در اثر شوک رطوبتی و تحت بارگذاری شبیه‌سازی شده چرخ‌فلک تفسیر می‌شوند. از این‌رو، نتایج حاصل می‌توانند مبنایی برای درک بهتر سازوکار شکست ساقه در هنگام تعامل با چرخ‌فلک و بررسی نقش شرایط رطوبتی محصول در انتخاب و تنظیم پارامترهای عملکردی آن باشند.

نمونه‌برداری و آماده‌سازی ساقه‌ها

نمونه‌برداری از مزارع گندم دیم شهرستان بیجار، واقع در استان کردستان، انجام شد. ساقه‌های گندم دیم رقم سرداری از ۱۰ نقطه مختلف مزرعه به‌صورت تصادفی جمع‌آوری شدند. از هر نقطه حداقل ۳۰ ساقه سالم و بالغ انتخاب شد. نقاط نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انتخاب شدند که نمونه‌ها تا حد امکان از شرایط مشابه رشد و وضعیت ظاهری برخوردار باشند. ساقه‌های انتخاب شده دارای ارتفاع مشابه بودند و پس از جمع‌آوری برای انجام آزمون‌های مربوط به مقاومت و رفتار شکست ساقه مورد استفاده قرار گرفتند. تصویر نمونه‌های ساقه مورد استفاده در آزمایش در شکل ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش، منظور از ساقه‌های معمولی، ساقه‌هایی بود که پس از رسیدن طبیعی محصول، تحت شرایط معمول پیش از برداشت

جمع‌آوری شد. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری و پیش از انجام آزمایش‌ها در شرایط محیطی یکسان نگهداری شدند تا تغییرات ناخواسته در وضعیت نمونه‌ها به حداقل برسد. در نهایت، ساقه‌های دو گروه، شامل ساقه‌های معمولی و ساقه‌های تحت چرخه خیس‌شدن و خشک‌شدن مجدد، برای مقایسه ویژگی‌های مکانیکی و بررسی مقاومت آن‌ها در برابر شکست مورد آزمایش قرار گرفتند.

اندازه‌گیری مقاومت ساقه در برابر شکست

طراحی آزمایش برای اندازه‌گیری نیروی شکست ساقه

برای اندازه‌گیری میزان مقاومت ساقه‌های گندم در برابر شکست، با نیرویی مشابه نیروی وارده از سوی چرخ‌فلک کمباین، آزمایشی طراحی شد. در این آزمایش تعداد ۶۰ عدد ساقه گندم در دو دسته ۳۰ عددی با طول متوسط ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و قطر متوسط ۱ تا ۲/۵ میلی‌متر انتخاب شدند. ساقه‌ها از قسمت انتها (قسمت طوقه) قطع شده و مطابق شکل ۱ داخل یونولیت قرار داده شدند تا ثابت شوند و مشابه حالت کشت‌شده در خاک باشند.

قرار داشتند. گروه دوم شامل ساقه‌هایی بود که به‌منظور بررسی اثر چرخه خیس‌شدن و خشک‌شدن مجدد، تحت یک فرایند شبیه‌سازی شده شوک رطوبتی قرار گرفتند. بدین منظور، نیمی از نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از آبپاش دستی در معرض پاشش آب قرار گرفتند و سپس به مدت ۷۲ ساعت در شرایط محیطی قرار داده شدند تا فرایند خشک‌شدن مجدد آن‌ها انجام شود. در طول ساعات روشنایی، نمونه‌ها از طلوع تا غروب آفتاب در معرض تابش مستقیم نور خورشید قرار داشتند و در ساعات شب در شرایط سایه و دمای محیط نگهداری شدند. بنابراین، چرخه خیس‌شدن و خشک‌شدن مجدد با استفاده از شرایط محیطی بازسازی شد. لازم به تأکید است که این روش با هدف بازسازی کامل تمامی شرایط بارندگی در مزرعه طراحی نشده بود، بلکه به‌عنوان یک روش آزمایشگاهی کنترل‌شده برای ایجاد و بررسی اثر یک چرخه خیس‌شدن و خشک‌شدن مجدد، بر ویژگی‌های مکانیکی و رفتار شکست ساقه مورد استفاده قرار گرفت.

طول ساقه‌های مورد بررسی به‌طور متوسط حدود ۵۰ سانتی‌متر بود و در مجموع حداقل ۳۰۰ نمونه (شکل ۱) از ۱۰ نقطه نمونه‌برداری



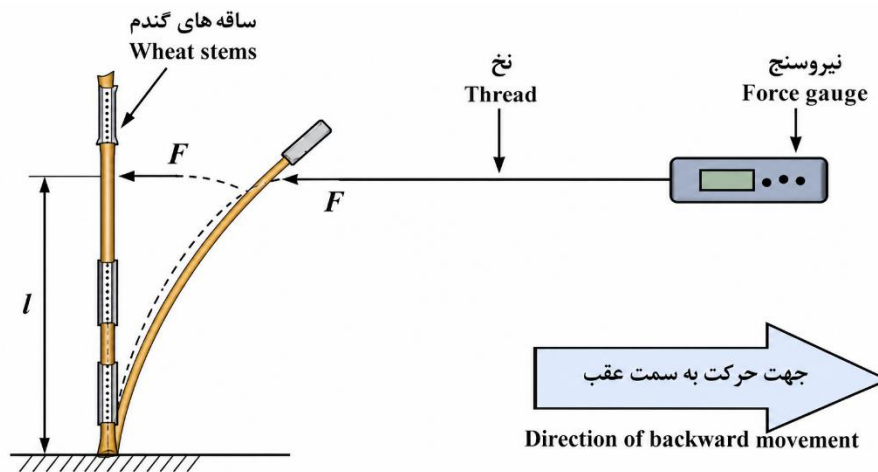
شکل ۱- نمونه ساقه‌های گندم قرارگرفته در یونولیت برای انجام آزمایش‌ها

Fig.1. Wheat stems fixed in polystyrene blocks for experimental analysis

هدف آزمون حاضر بازسازی کامل شرایط دینامیکی برداشت نبود، بلکه تعیین و مقایسه آستانه مقاومت مکانیکی ساقه‌های معمولی و تحت شوک رطوبتی در برابر بارگذاری خمشی بود. برای انجام آزمون، نقطه اعمال نیرو در ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری (L) از سطح خاک، بالاتر از گره سوم و در محدوده تقریبی محل برخورد میله چرخ‌فلک با ساقه در برخی موارد موجب خمیدگی شدید و شکست ساقه، پیش از رسیدن تیغه برش به آن، می‌شود. از این‌رو،

سپس، به‌منظور تعیین مقاومت ساقه در برابر خمش و نیروی شکست، یک نمونه ساقه گندم معمولی و یک نمونه ساقه تحت شوک رطوبتی انتخاب شد. طراحی این آزمون بر اساس مشاهدات انجام‌شده در شرایط برداشت صورت گرفت؛ به‌طوری‌که برخورد میله‌های چرخ‌فلک با ساقه در برخی موارد موجب خمیدگی شدید و شکست ساقه، پیش از رسیدن تیغه برش به آن، می‌شود. از این‌رو،

انجام شد و مقادیر نیروی شکست برای تحلیل‌های آماری ثبت گردید. با توجه به ماهیت دینامیکی برهم‌کنش چرخ‌فلک و محصول در شرایط واقعی برداشت، نیروی شکست حاصل از این آزمون به‌عنوان یک شاخص مکانیکی برای مقایسه مقاومت ساقه‌ها و ارزیابی اثر شوک رطوبتی بر آستانه شکست آن‌ها در نظر گرفته شد. از این منظر، کاهش نیروی شکست ساقه می‌تواند احتمال وقوع شکست در اثر برخورد چرخ‌فلک و پیش از رسیدن تیغه برش به ساقه را افزایش دهد. بنابراین، نتایج آزمون مکانیکی ساقه در کنار آزمایش‌های مربوط به سرعت دورانی چرخ‌فلک و تحلیل احتمال شکست، برای بررسی ارتباط میان وضعیت مکانیکی ساقه و احتمال شکست تحت بارگذاری شبیه‌سازی شده چرخ‌فلک مورد استفاده قرار گرفت. طرحواره روش آزمون در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- اندازه‌گیری نیروی مورد نیاز شکست ساقه

Fig.2. Measuring force in stem failure test

سرعت دورانی ۲۱ تا ۵۵ دور در دقیقه را که معادل حدود ۱/۲۱ تا ۳/۱۷ متر بر ثانیه است، به‌طور کامل پوشش می‌دهد. بنابراین، مبنای انتخاب سرعت‌های آزمایش، علاوه بر سرعت دورانی، بر اساس سرعت محیطی چرخ‌فلک و با توجه به محدوده عملیاتی چرخ‌فلک کمابین‌های رایج تعیین شد.

تغییر سرعت چرخ‌فلک در دستگاه آزمایشگاهی به‌صورت پیوسته و توسط سیستم پولی متغیر انجام می‌شد. نیروی محرک دستگاه از یک موتور الکتریکی تک‌فاز با توان ۱/۲ کیلووات تأمین می‌شد و با جابه‌جایی اهرم کنترلی پولی متغیر، سرعت دورانی موردنظر ایجاد و از طریق پولی خروجی به چرخ‌فلک منتقل می‌شد. در این آزمایش، ساقه‌های مورد بررسی در معرض تماس مستقیم میله‌های چرخ‌فلک قرار گرفتند و سرعت چرخ‌فلک به‌آرامی افزایش یافت. افزایش سرعت تا زمان شکست ساقه ادامه پیدا کرد و در لحظه شکست، سرعت

به‌عنوان فاصله اعمال نیرو از محل تثبیت ساقه انتخاب شد تا نقطه اعمال بار در بخش مؤثر ساقه در برابر خمش قرار گیرد و شرایط بارگذاری آزمون تا حد امکان با ناحیه درگیری ساقه با چرخ‌فلک کمابین مطابقت داشته باشد. این فاصله در تمامی آزمون‌ها ثابت نگه داشته شد تا اثر تغییرات هندسی بر نتایج حذف و مقایسه دو گروه ساقه امکان‌پذیر شود. ساقه توسط یک نخ نازک به نیروسنج دیجیتال Lutron مدل FG 5000A متصل و نیروسنج با سرعت یکنواخت و به‌آرامی کشیده شد تا ساقه تحت بارگذاری خمشی قرار گیرد. بارگذاری تا زمان شکست ساقه در یکی از گره‌های پایین‌تر از محل اتصال نخ ادامه یافت و بیشینه نیروی ثبت‌شده در لحظه شکست به‌عنوان نیروی شکست ساقه در نظر گرفته شد. این آزمون برای ۵۰ ساقه از هر یک از دو گروه ساقه‌های معمولی و تحت شوک رطوبتی

شبیه‌سازی و بررسی اثر سرعت دورانی چرخ‌فلک

طراحی و ساخت دستگاه آزمایشی و انجام آزمایش‌ها

به‌منظور تأیید و اطمینان از صحت نتایج آزمایش پیشین، آزمایش دیگری با استفاده از یک مدل کوچک‌تر چرخ‌فلک، ساخته‌شده در کارگاه ساخت و تولید دانشگاه کردستان، که در شکل ۳ نشان داده شده است، انجام شد. این دستگاه قادر بود سرعت دورانی چرخ‌فلک را در محدوده ۱۸ تا ۹۶ دور در دقیقه به‌صورت پیوسته تغییر دهد. شعاع چرخ‌فلک آزمایشگاهی ۴۵ سانتی‌متر بود و سرعت محیطی آن، بر اساس رابطه $V=2\pi rn/60$ ، که در آن:

V : سرعت محیطی چرخ‌فلک ($m\ s^{-1}$), r : شعاع چرخ‌فلک (m),
 n : سرعت دورانی چرخ‌فلک (rpm) است، در محدوده ۰/۸۵ تا ۴/۵۲ متر بر ثانیه قرار داشت. این محدوده، بازه سرعت محیطی چرخ‌فلک کمابین‌های تولید داخل با شعاع تقریبی ۵۵ سانتی‌متر و محدوده

سنبله‌ها و بخش‌های شکسته‌شده ساقه که در اثر بارگذاری چرخ‌فلک از گیاه جدا شده و پیش از رسیدن به تیغه برش بر سطح زمین باقی مانده بودند، در هر دو وضعیت جمع‌آوری و شمارش شدند. همچنین، میزان دانه موجود در سنبله‌های جداشده اندازه‌گیری شد. این سنبله‌ها نمایانگر بخشی از محصول بودند که در اثر برهم‌کنش نامناسب ساقه و چرخ‌فلک از مسیر طبیعی ورود به سکوی برش خارج شده و بالقوه می‌توانستند به تلفات دانه منجر شوند؛ بنابراین، تعداد سنبله‌های جداشده و مقدار دانه موجود در آن‌ها به‌عنوان شاخصی از پیامد شکست ساقه و پتانسیل ایجاد تلفات برداشت ثبت و بین دو گروه مقایسه شد.

دورانی چرخ‌فلک با استفاده از دورسنج لیزری Sinometer مدل DT6236C اندازه‌گیری و به‌عنوان سرعت بحرانی شکست ثبت شد. پس از ثبت سرعت بحرانی شکست، افزایش سرعت چرخ‌فلک در محدوده آزمایش ادامه یافت تا تعداد و نوع شکست ساقه‌ها در دو گروه، شامل ساقه‌های معمولی و ساقه‌های تحت چرخه خیس‌شدن و خشک‌شدن مجدد، مورد مقایسه قرار گیرد. در پایان، سنبله‌ها و بخش‌های شکسته‌شده ساقه که در اثر برخورد با میله‌های چرخ‌فلک از گیاه جدا شده بودند، در هر دو گروه جمع‌آوری و شمارش شدند. به‌منظور ارزیابی پیامد شکست ساقه در ارتباط با تلفات محصول،



شکل ۳- مدل کوچک‌تر چرخ‌فلک کمابین غلات

Fig.3. A laboratory-scale model of the grain combine reel

$$MC = \frac{a-b}{b} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، (MC) درصد رطوبت ماده، (a) جرم ماده تر (بر حسب گرم) و (b) جرم ماده خشک (بر حسب گرم) است. این روش به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای تعیین رطوبت ساقه‌ها شناخته می‌شود.

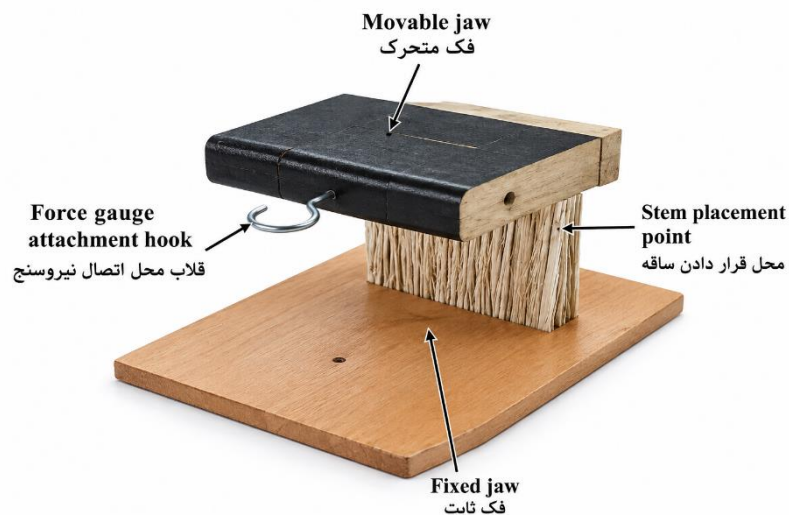
اندازه‌گیری نیروی برش و تنش برشی

برای محاسبه نیروی برش و تنش برشی از سازوکار شکل ۴ استفاده شد. استفاده از این نوع سازوکار برای تعیین تنش برشی ساقه یونجه به طول هفت گره و نیز ساقه نخود گزارش شده است (Mohsenin, 1970; Golpira, Tavakoli-Hashjin, Khosh-) (Taghaza, & Minaei, 2009).

بررسی خصوصیات کلی ساقه

تعیین درصد رطوبت

درصد رطوبت ساقه‌ها با استفاده از روش اندازه‌گیری وزنی تعیین شد. بدین منظور، ابتدا وزن نمونه‌ها در حالت اولیه به‌عنوان وزن تر اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در آون با دمای 105 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا رطوبت آن‌ها خارج شده و به وزن ثابت برسند. پس از خشک‌شدن، نمونه‌ها در شرایط محیطی سرد و مجدداً توزین شدند و درصد رطوبت بر اساس اختلاف وزن تر و وزن خشک نمونه‌ها محاسبه شد (Mohsenin, 1970). مقدار رطوبت نمونه‌های مورد آزمایش در محدوده موردنظر پژوهش، حدود ۱۱/۸ درصد، گزارش شد. درصد رطوبت از رابطه (۱) محاسبه شد:



شکل ۴- وسیله ساخته شده برای تعیین نیروی برشی ساقه

Fig.4. A custom-built apparatus for measuring stem shear strength

بر حسب (N) و (سطح مقطع ساقه) A_s بر حسب (m^2) است که از رابطه (۳) به دست آمد (Mohsenin, 1970):

برای محاسبه سطح مقطع دیواره ساقه، با توجه به شکل تقریباً دایره‌ای و توخالی ساقه، سطح مقطع به صورت سطح یک حلقه دایره‌ای در نظر گرفته شد و از رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$A_s = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] \quad (3)$$

که در آن، A_s : سطح مقطع دیواره ساقه (m^2)، D : قطر خارجی ساقه (m) و t : ضخامت دیواره ساقه (m) است.

برای تعیین ضخامت دیواره ساقه، یک برش طولی در امتداد آوندهای ساقه ایجاد شد. سپس با استفاده از کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر، ضخامت دیواره در محل فرورفتگی‌های طولی ساقه مطابق شکل ۵ اندازه‌گیری شد و مقدار ضخامت دیواره تعیین گردید.

این وسیله شامل دو فک است که فک متحرک آن توسط قلاب به نیروسنج متصل می‌شود، سپس نیروسنج را به آرامی کشیده تا ساقه از حد فاصل بین فک ثابت و متحرک قطع شود و در نقطه بحرانی عدد مرقوم روی نیروسنج قرائت و داده‌برداری انجام می‌شود. در این آزمایش نیز تعداد ۳۰ عدد ساقه به صورت تصادفی انتخاب شد و هر ساقه مجزا از برگ، از سوراخ فک ثابت و متحرک عبور داده شده و طوری قرار گرفت که نقاط بین گره‌ی ساقه در محل تماس بین دو فک قرار گیرند تا برش بین گره‌ای اتفاق بیفتد.

تنش برشی ساقه نیز از رابطه (۲) به دست آمد (Mohsenin, 1970):

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (2)$$

که (تنش برشی ساقه) τ_s بر حسب ($N m^{-2}$)، (نیروی برشی) F_s



شکل ۵- اندازه‌گیری و تعیین ضخامت دیواره ساقه

Fig.5. Measuring and assessing stem wall thickness

سانسور شده (censored) در نظر گرفته شدند. منحنی Kaplan-Meier برای هر یک از دو گروه ساقه‌های معمولی و تحت شوک رطوبتی ترسیم شد و برای مقایسه احتمال شکست بین دو گروه از آزمون Log-rank استفاده گردید. همچنین، به منظور برآورد کمی تفاوت احتمال شکست بین دو گروه، مدل خطرات متناسب کاکس (Cox proportional hazards model) به کار گرفته شد و نسبت خطر (Hazard Ratio, HR) همراه با فاصله اطمینان ۹۵ درصد گزارش شد. در تمامی آزمون‌های آماری، سطح معناداری ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ساقه گندم رقم سرداری و رفتار آن در برابر بارگذاری ناشی از چرخ فلک بررسی و تفسیر می‌شود. نتایج حاصل از ساقه‌های معمولی و ساقه‌هایی که تحت چرخه خیس شدن و خشک شدن مجدد قرار گرفته‌اند، با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا اثر تغییرات رطوبتی بر رفتار شکست ساقه مشخص شود. همچنین، نتایج مربوط به اثر سرعت دورانی چرخ فلک بر شکست ساقه و پیامدهای احتمالی آن در ایجاد تلفات برداشت مورد تحلیل قرار گرفته است. یافته‌های این پژوهش در هر بخش با نتایج مطالعات پیشین مرتبط مقایسه شده و دلایل احتمالی شباهت‌ها و تفاوت‌های مشاهده شده مورد بحث قرار می‌گیرند.

نتایج آزمایش‌های مکانیکی

مقایسه نیروی شکست ساقه‌ها

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، میانگین نیروی شکست خمشی ساقه در نمونه‌های معمولی ($1/284 \pm 0/12N$) بود، در حالی که این مقدار در ساقه‌های تحت شوک رطوبتی به ($0/748 \pm 0/09N$) کاهش یافت. بر این اساس، اعمال چرخه خیس شدن و خشک شدن مجدد موجب کاهش حدود ۴۱/۷ درصدی نیروی لازم برای شکست ساقه شد. این کاهش بیانگر آن است که قرارگیری ساقه‌های بالغ و خشک در معرض شوک رطوبتی می‌تواند ظرفیت آن‌ها را برای تحمل بارگذاری خمشی کاهش دهد.

از نظر مکانیکی، کاهش نیروی شکست به این معناست که برای ایجاد گسیختگی در ساقه‌های تحت شوک رطوبتی، نیروی کمتری مورد نیاز بوده است. این تغییر می‌تواند با تغییر در وضعیت رطوبتی بافت و در نتیجه تغییر رفتار الاستیک، سختی و قابلیت تحمل تغییر شکل ساقه مرتبط باشد. از این رو، ساقه‌های تحت شوک رطوبتی ممکن است در برابر نیروهای خمشی و ضربه‌ای ناشی از تماس با اجزای متحرک چرخ فلک، در مقایسه با ساقه‌های معمولی،

برای محاسبه سطح مقطع، شکل اولیه ساقه در نقطه‌ای که برش صورت گرفت دست‌نخورده حفظ شد تا محاسبه سطح مقطع عرضی با فرض دایره‌ای بودن مقطع صورت گیرد (Rajput & Bhole, 1973). قطر خارجی ساقه با استفاده از کولیس اندازه‌گیری و مساحت دایره خارجی محاسبه شد. سپس با کسر دو برابر ضخامت دیواره ($2t$) از قطر خارجی (D)، قطر داخلی ساقه برابر با ($D-2t$) محاسبه و مساحت دایره داخلی به دست آمد. در نهایت، با تفاضل مساحت دایره داخلی از مساحت دایره خارجی، سطح مقطع دیواره ساقه به صورت مقطع حلقوی تعیین شد. همچنین، قطر ساقه در دو نقطه، در محل بین گره دوم و گره سوم، با استفاده از کولیس اندازه‌گیری و میانگین دو اندازه‌گیری به عنوان قطر معادل ساقه در محاسبات در نظر گرفته شد.

تحلیل داده‌ها به روش تحلیل بقا

برای بررسی سیستماتیک تأثیر شوک رطوبتی بر رفتار شکست ساقه در برابر بارگذاری دینامیکی ناشی از چرخ فلک، از روش تحلیل بقا استفاده شد. در این تحلیل، سرعت دورانی چرخ فلک به عنوان متغیر ترتیبی متناظر با افزایش تدریجی شدت بارگذاری در نظر گرفته شد و وقوع شکست ساقه به عنوان رویداد تعریف گردید. داده‌ها به صورت فردی برای ۶۰ ساقه، شامل ۳۰ ساقه معمولی و ۳۰ ساقه تحت شوک رطوبتی، سازمان‌دهی شدند. ساقه‌هایی که تا حداکثر سرعت آزمایش، یعنی ۹۶ rpm، دچار شکست نشدند، به عنوان داده‌های سانسور شده (censored) در تحلیل در نظر گرفته شدند. برای مقایسه منحنی‌های بقا از آزمون Log-rank و برای برآورد اثر شوک رطوبتی بر خطر شکست از مدل مخاطرات متناسب کاکس (Cox Proportional Hazards Model) استفاده شد.

مدل‌سازی تأثیر عوامل مختلف بر تلفات دانه به روش

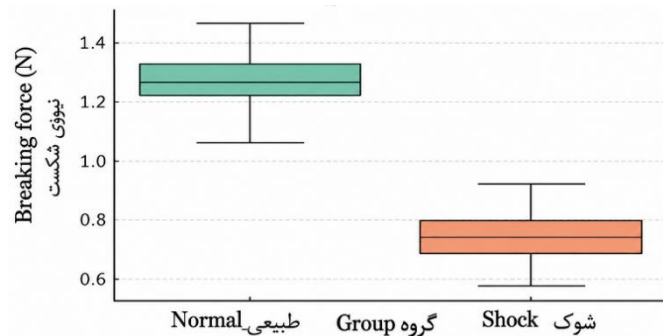
تحلیل بقا

برای تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن توزیع متغیرها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد. به منظور مقایسه میانگین نیروی شکست ساقه‌های معمولی و ساقه‌های تحت شوک رطوبتی، از آزمون t مستقل استفاده شد و اندازه اثر اختلاف بین دو گروه با شاخص Cohen's d همراه با فاصله اطمینان ۹۵ درصد گزارش گردید.

به منظور بررسی احتمال شکست ساقه در سرعت‌های مختلف چرخ فلک، از روش تحلیل بقا استفاده شد. با توجه به ماهیت استاتیکی/شبه‌استاتیکی آزمون تعیین نیروی شکست، سرعت دورانی چرخ فلک در تحلیل بقا به عنوان متغیر پیش‌رونده و شکست ساقه به عنوان رویداد (event) تعریف شد. ساقه‌هایی که تا حداکثر سرعت آزمایش، یعنی ۹۶ rpm، دچار شکست نشدند، به عنوان داده‌های

کمایین همخوانی دارد. آنان نشان دادند که پاسخ نیرویی ساقه در شرایط بارگذاری دینامیکی به سرعت بارگذاری و وضعیت تغییر شکل اولیه ساقه وابسته است. در مقایسه با آن مطالعه، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که وضعیت رطوبتی پیش از اعمال بارگذاری نیز می‌تواند ظرفیت تحمل نیروی خمشی ساقه را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهد؛ بنابراین، اثر هم‌زمان ویژگی‌های مکانیکی ساقه و شرایط بارگذاری باید در تحلیل احتمال شکست ساقه در ناحیه چرخ‌فلک مورد توجه قرار گیرد.

آسیب‌پذیرتر باشند. با این حال، نیروی شکست به‌تنهایی یک ویژگی ثابت و مستقل از شرایط آزمون نیست و مقدار آن می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند قطر و ضخامت دیواره ساقه، وضعیت رطوبتی، محل اعمال نیرو، هندسه ساقه و شرایط بارگذاری قرار گیرد. بنابراین، کاهش مشاهده‌شده در پژوهش حاضر باید در چارچوب شرایط آزمون و چرخه رطوبتی اعمال‌شده تفسیر شود. این یافته با نتایج هیرای و همکاران (Hirai et al., 2004) درباره پاسخ مکانیکی ساقه گندم در شرایط بارگذاری ناشی از چرخ‌فلک



شکل ۶- باکس پلات مقایسه نیروی شکست ساقه‌های معمولی و تحت شوک رطوبتی (Cohen's $d=1/6$, $p<0.001$)

Fig. 6. Boxplot comparison of breaking force in conventional and moisture-shock-treated stems ($p < 0.001$, Cohen's $d = 1.6$)

که ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در برابر بارهای خمشی و ضربه‌ای ناشی از تماس با اجزای متحرک چرخ‌فلک، آمادگی بیشتری برای شکست دارند و این وضعیت می‌تواند احتمال بروز آسیب و افزایش تلفات در مرحله برداشت را افزایش دهد.

این اختلاف از نظر آماری بسیار معنادار بود ($t(58) = 12.35$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.6$, 95% CI: 1.1–2.0) می‌دهد که شوک رطوبتی موجب کاهش حدود ۴۲ درصدی نیروی شکست ساقه می‌شود. کاهش قابل‌توجه نیروی شکست نشان می‌دهد

جدول ۱- مقایسه نیروی شکست ساقه‌ها

Table 1- Comparison of Stem Breaking Force

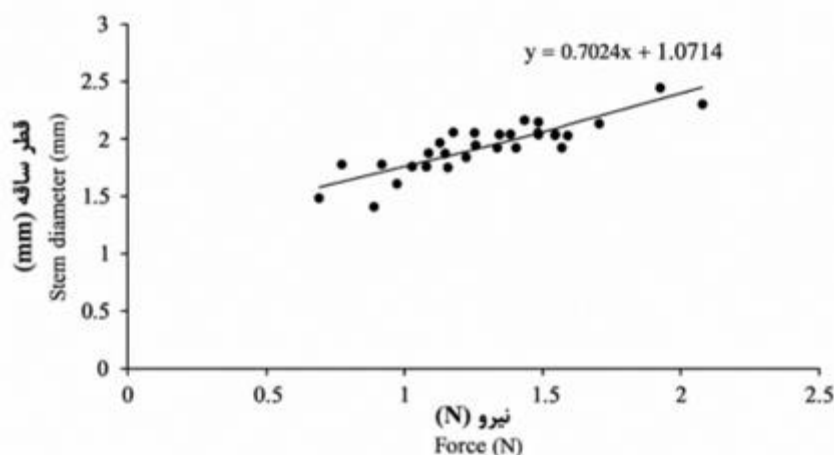
گروه Group	تعداد Number	میانگین $\pm$ انحراف معیار Mean $\pm$ Standard Deviation, (N)	آماره آزمون t Statistic	درجه آزادی df	مقدار احتمال p-value	اندازه اثر کوهن Cohen's d (95% CI)
معمولی Normal	30	1.284 $\pm$ 0.12	—	—	—	—
شوکی رطوبتی Moisture shock	30	0.748 $\pm$ 0.09	12.35	58	<0.001	1.6 (1.1–2.0)

ساقه‌های تحت تأثیر شوک رطوبتی، در محدوده قطرهای بررسی‌شده، در مقایسه با ساقه‌های معمولی نیروی شکست کمتری داشته‌اند. به‌عنوان نمونه، در قطر ساقه ۲ میلی‌متر، نیروی شکست پیش‌بینی‌شده از روابط رگرسیونی برای ساقه‌های معمولی و تحت تأثیر شوک رطوبتی به‌ترتیب حدود ۱/۳۳ و ۰/۸۶ نیوتن بود؛ بنابراین، نیروی

نمودارهای رگرسیون خطی رابطه بین قطر ساقه و نیروی شکست را برای ساقه‌های معمولی (شکل ۷) و ساقه‌های تحت تأثیر شوک رطوبتی (شکل ۸) نشان می‌دهند. همان‌گونه که انتظار می‌رود، در هر دو گروه با افزایش قطر ساقه، نیروی لازم برای شکست افزایش یافته است. با این حال، مقایسه روابط رگرسیونی دو گروه نشان می‌دهد که

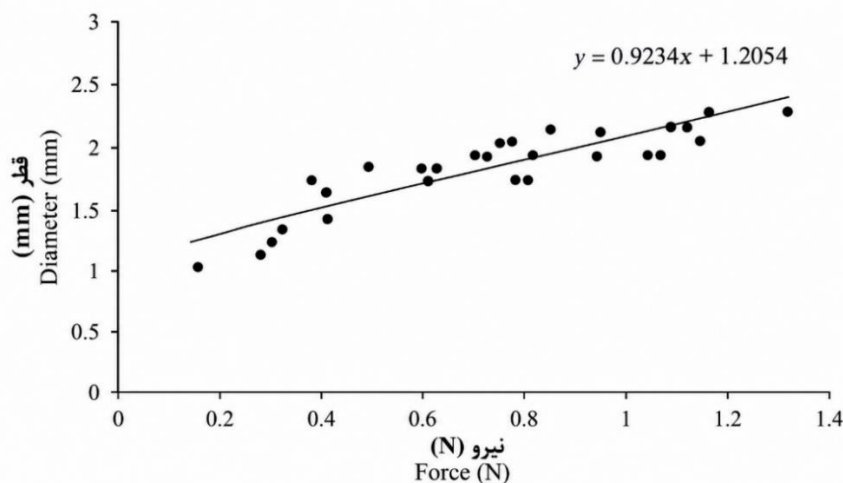
این یافته در کنار کاهش معنادار میانگین نیروی شکست، بیانگر کاهش مقاومت خمشی ساقه در پی اعمال شوک رطوبتی است.

شکست ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در این قطر حدود ۶۵ درصد مقدار متناظر در ساقه‌های معمولی، معادل تقریباً دو سوم، برآورد شد.



شکل ۷- نمودار رگرسیون خطی رابطه بین قطر ساقه و نیروی شکست ساقه‌های گندم معمولی

Fig. 7. Linear regression of the relationship between stem diameter and breaking force for conventional wheat stems



شکل ۸- نمودار رگرسیون خطی رابطه بین قطر ساقه و نیروی شکست ساقه‌های گندم تحت تأثیر شوک رطوبتی

Fig. 8. Linear regression of the relationship between stem diameter and breaking force for wheat stems subjected to moisture shock

داده‌های آزمایش شبیه‌سازی چرخ فلک (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که:

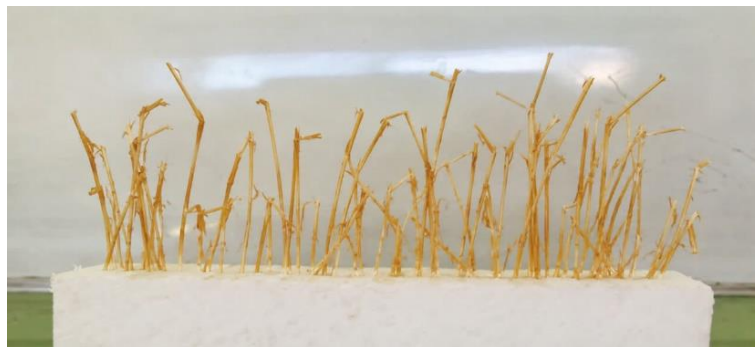
ساقه‌های معمولی در سرعت ۷۴ rpm برای اولین بار شروع به شکست کردند و در سرعت حداکثر (۹۶ rpm)، ۱۲ ساقه از ۳۰ نمونه شکسته شدند. در مقابل، ساقه‌های تحت شوک رطوبتی از سرعت ۴۸rpm شروع به شکست کردند و در ۹۶ rpm، ۲۸ ساقه از ۳۰ نمونه شکسته شدند.

به‌منظور مشاهده الگوی شکست ساقه‌ها، نمونه‌هایی از ساقه‌های گندم شکسته‌شده در اثر بارگذاری ناشی از سرعت دورانی چرخ فلک در

ضریب تعیین در ساقه‌های معمولی حدود $R^2=0.68$ و در ساقه‌های تحت شوک رطوبتی حدود $R^2=0.61$ برآورد شد که بیانگر وجود رابطه خطی نسبتاً قوی بین قطر ساقه و مقاومت آن در برابر شکست است. کاهش مقاومت ساقه‌ها پس از شوک رطوبتی نشان می‌دهد که علاوه بر ابعاد هندسی، تغییرات ایجادشده در ساختار و ویژگی‌های مکانیکی بافت ساقه نیز در کاهش نیروی شکست نقش دارند.

تأثیر سرعت دورانی چرخ فلک بر شکست ساقه

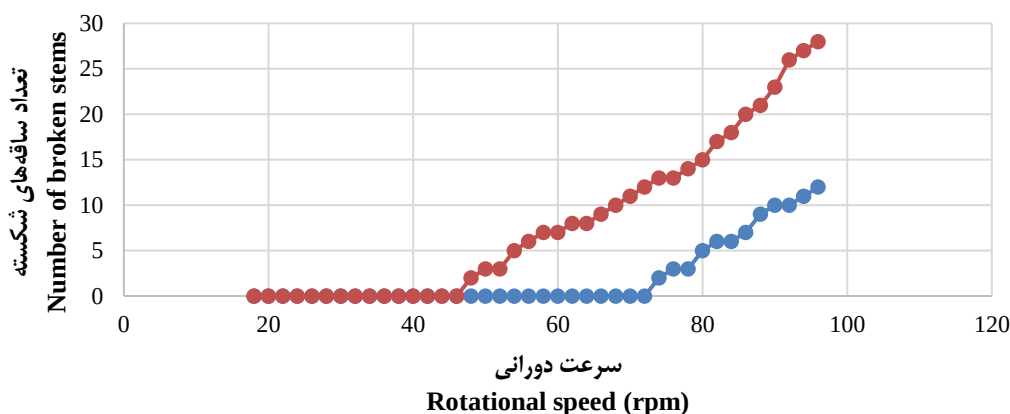
شکل ۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۹- نمونه‌هایی از ساقه‌های گندم شکسته‌شده تحت اثر بارگذاری ناشی از سرعت دورانی چرخ فلک

Fig. 9. Examples of broken wheat stems subjected to loading induced by the rotational speed of the combine reel

این رفتار تفاوت چشمگیری در آستانه تحمل مکانیکی دو گروه ضعیف‌تر هستند، بلکه حساسیت بیشتری به نیروهای دینامیکی نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که ساقه‌های تحت شوک رطوبتی نه تنها وارد شده توسط چرخ فلک دارند.



—●— Normal stems ساقه های معمولی —●— Stems dried after rainfall ساقه های خشک شده پس از بارندگی

شکل ۱۰- مقایسه نقاط شکست ساقه‌های معمولی و ساقه‌های تحت تأثیر شوک رطوبتی توسط چرخ فلک

Fig. 10. Comparison of stem breakage locations: conventional vs. moisture-shock-treated stems under reel action

جدایش و انتقال سنبله به سکوی برداشت تأثیرگذار باشد.

بررسی خصوصیات الاستیکی ساقه

در بررسی رفتار مکانیکی ساقه گندم در برابر خمش و شکست، مشخص شد که ساقه‌های معمولی در مقایسه با ساقه‌های تحت تأثیر شوک رطوبتی، توان تحمل بارگذاری مکانیکی بیشتری پیش از شکست از خود نشان می‌دهند. کاهش نیروی لازم برای شکست ساقه‌های تحت شوک رطوبتی، بیانگر کاهش مقاومت مکانیکی آن‌ها پس از چرخه خیس شدن و خشک شدن مجدد است. به نظر می‌رسد تغییرات ایجادشده در ساختار و وضعیت فیزیکی بافت ساقه در اثر تغییرات رطوبتی، موجب کاهش ظرفیت تحمل نیرو و افزایش احتمال شکست آن در هنگام اعمال بار مکانیکی شده باشد. این تفاوت می‌تواند در شرایط برخورد میله چرخ فلک با ساقه، احتمال شکست ساقه‌های تحت شوک رطوبتی را افزایش داده و در نتیجه بر نحوه

خواص فیزیکی و مکانیکی ساقه

در بررسی‌های انجام شده روی ساقه گندم رقم سرداری، به منظور تعیین برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی ساقه در رطوبت ۱۱/۸ درصد، پارامترهای مرتبط با مقاومت ساقه در برابر برش اندازه‌گیری شد. جدول ۲ مقادیر نیروی برشی لازم برای شکست ساقه، مقاومت برشی، ضخامت دیواره، قطر و سطح مقطع ساقه را نشان می‌دهد. این اندازه‌گیری‌ها به منظور تعیین ویژگی‌های مکانیکی ساقه و بررسی ارتباط آن‌ها با رفتار شکست ساقه در برابر بارگذاری ناشی از چرخ فلک انجام شد.

جدول ۲- نتایج نیروی برشی، مقاومت برشی، ضخامت دیواره، قطر و سطح مقطع ساقه

Table 2- Results of shear force, shear strength, stem wall thickness, stem diameter, and cross-sectional area

مقدار به دست آمده	خصوصیت ساقه
Obtained value	Stem feature
0.99×10 ⁻⁶ m ²	سطح مقطع Cross section
1.87×10 ⁻³ m	قطر متوسط average diameter
0.24×10 ⁻³ m	ضخامت دیواره Stem wall thickness
13.41 MPa	مقاومت برشی Shear strength
13.135 N	نیروی برش Cutting force

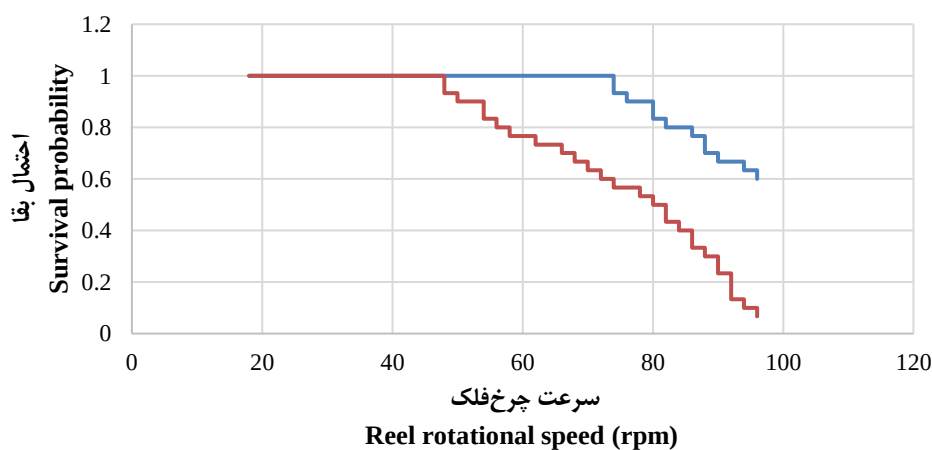
تحلیل بقا

منحنی Kaplan-Meier نشان داد که احتمال شکست ساقه‌های تحت تأثیر شوک رطوبتی در مقایسه با ساقه‌های معمولی، به‌ویژه در سرعت‌های دورانی پایین‌تر چرخ فلک (۴۵-۷۵rpm)، بیشتر است (شکل ۱۱). آزمون Log-rank نیز اختلاف بین دو منحنی بقا را معنادار نشان داد ($\chi^2(1) = 15.7$, $p < 0.001$). همچنین، مدل رگرسیون کاکس نشان داد که خطر لحظه‌ای شکست ساقه‌های تحت تأثیر شوک رطوبتی در مقایسه با ساقه‌های معمولی ۳/۴ برابر است ($HR = 3.4$, $CI: 2.1-5.5$). این نتیجه بیانگر آن است که قرارگیری ساقه‌ها در معرض چرخه خیس شدن و خشک شدن مجدد،

احتمال شکست آن‌ها را در هنگام اعمال بارگذاری مکانیکی افزایش می‌دهد.

منحنی‌های کاپلان-مایر

منحنی‌های Kaplan-Meier (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که احتمال بقا (یعنی احتمال این که ساقه تا آن سرعت شکسته نشود) ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در سرعت‌های پایین‌تر به‌طور محسوسی کاهش یافت. همچنین آزمون Log-rank اختلاف بین دو گروه را معنادار تأیید کرد ($p < 0.001$).



— Normal stems ساقه‌های معمولی — Stems dried after rainfall ساقه‌های خشک‌شده پس از بارندگی

شکل ۱۱- منحنی Kaplan-Meier احتمال بقا ساقه‌های معمولی و تحت شوک رطوبتی در برابر سرعت چرخ فلک. ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در سرعت‌های پایین‌تر به‌طور معنی‌دار شکستند (Log-rank $p < 0.001$)

Fig. 11. Kaplan-Meier survival curves of conventional and moisture-shock-treated wheat stems versus reel speed. Moisture-shock-treated stems broke at significantly lower rotational speeds (Log-rank $p < 0.001$)

آزمون لاگ‌رنک و مدل کاکس

آزمون Log-rank نشان داد که تفاوت بین دو منحنی بقا از نظر آماری معنادار است ($p < 0.001$). همچنین، مدل رگرسیون کاکس (Cox Proportional Hazards Model) نشان داد که نسبت خطر

شکست برای ساقه‌های تحت تأثیر شوک رطوبتی، در مقایسه با ساقه‌های معمولی، برابر با ۳.۴ است (HR = 3.4; CI 95%: CI: 2.1–5.5). این یافته نشان می‌دهد که ساقه‌های تحت تأثیر شوک رطوبتی، در شرایط بارگذاری مورد بررسی، خطر لحظه‌ای بیشتری برای شکست نسبت به ساقه‌های معمولی دارند.

جدول ۳- نتایج تحلیل بقا

Table 3- Survival analysis results

مقایسه Comparison	آزمون Test	آماره آزمون Test Statistic	مقدار احتمال p-value	نسبت خطر Hazard Ratio (95% CI)
ساقه معمولی در مقابل شوک رطوبتی Normal Stem vs. Moisture Shock	آزمون رتبه‌ای-لگاریتمی Log-rank Test	$\chi^2(1) = 15.7$	<0.001	3.4 (2.1–5.5)

دارد. کاهش نیروی شکست ساقه‌های تحت شوک رطوبتی نسبت به ساقه‌های معمولی نشان می‌دهد که خیس شدن و خشک شدن مجدد ساقه در مرحله پس از بلوغ می‌تواند ظرفیت تحمل بارگذاری آن را کاهش داده و احتمال شکست ساقه در اثر تماس با چرخ‌فلک را افزایش دهد. از دیدگاه مکانیکی، این موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا برخورد میله‌های چرخ‌فلک با ساقه پیش از ورود کامل محصول به سکوی برش می‌تواند موجب ایجاد خمش و افزایش تنش در ساقه شود و در صورتی که بار اعمال شده از ظرفیت تحمل ساقه فراتر رود، شکست ساقه و جدا شدن سنبله از مسیر انتقال محصول رخ خواهد داد. بنابراین، تفاوت مشاهده شده میان دو گروه تنها بیانگر شکننده تر شدن ساقه پس از شوک رطوبتی نیست، بلکه نشان‌دهنده تغییر ظرفیت تحمل ساقه در برابر بارگذاری ناشی از عملکرد چرخ‌فلک است.

از سوی دیگر، نتایج تحلیل بقا نشان داد که با افزایش سرعت چرخ‌فلک، احتمال وقوع شکست در هر دو گروه افزایش می‌یابد، اما ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در سرعت‌های پایین‌تری به آستانه شکست می‌رسند. این رفتار را می‌توان با افزایش شدت بارگذاری ناشی از تماس چرخ‌فلک و کاهش ظرفیت تحمل مکانیکی ساقه پس از شوک رطوبتی مرتبط دانست. در این شرایط، افزایش سرعت چرخ‌فلک موجب افزایش سرعت محیطی میله‌ها و در نتیجه افزایش شدت بارگذاری وارد شده به ساقه می‌شود. بنابراین، استفاده از سرعت چرخ‌فلک بدون توجه به وضعیت مکانیکی محصول می‌تواند احتمال شکست ساقه و در پی آن بروز تلفات در هدا برداشت را افزایش دهد. این یافته با نتایج مطالعات پیشین درباره اهمیت سرعت چرخ‌فلک و نسبت سرعت محیطی آن به سرعت پیشروی در عملکرد هدا برداشت همخوانی دارد (Abdi & Jalali, 2013; Soleimani & Kasraie, 2012). با این تفاوت که پژوهش حاضر این موضوع را از منظر تغییر مقاومت مکانیکی ساقه در اثر شوک رطوبتی بررسی کرده است. بر این اساس، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که تنظیم سرعت

همخوانی بین داده‌های نیروسنج و تحلیل بقا

همبستگی قوی بین دو مجموعه داده وجود دارد: کاهش ۴۲ درصدی نیروی شکست (از ۱/۲۸۴ N به ۰/۷۴۸ N)، با افزایش ۳/۴ برابری خطر شکست در تحلیل بقا همخوانی دارد. این همخوانی، اعتبار علمی یافته‌ها را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که آزمایش کشش با نیروسنج می‌تواند به عنوان یک شاخص پیش‌بینی کننده برای رفتار ساقه در شرایط واقعی برداشت استفاده شود. در کل می‌توان گفت این یافته‌ها با نتایج آزمایش نیروسنج همخوانی دارند، نیروی شکست ساقه‌های تحت شوک رطوبتی ۴۲ درصد کمتر از ساقه‌های معمولی بود. این کاهش استحکام ذاتی، توضیح مکانیکی پشت افزایش خطر شکست در تحلیل بقا را فراهم می‌کند.

مکانیزم فیزیولوژیک پشت کاهش استحکام ساقه

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش استحکام ساقه پس از قرارگیری در معرض چرخه تغییرات رطوبتی را نمی‌توان صرفاً به کاهش آب یا تغییر وضعیت رطوبتی بافت نسبت داد، بلکه احتمالاً با تغییرات ایجاد شده در ساختار و ویژگی‌های مکانیکی بافت ساقه در اثر چرخه خیس شدن و خشک شدن مرتبط است. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، جذب و دفع متوالی رطوبت می‌تواند موجب تغییر در وضعیت اجزای تشکیل دهنده دیواره سلولی و در نتیجه تغییر در رفتار مکانیکی بافت ساقه شود. این تغییرات ممکن است ظرفیت تحمل بار مکانیکی ساقه را کاهش داده و آن را در برابر شکست ناشی از نیروهای وارد شده در فرایند برداشت آسیب‌پذیرتر کند.

پیامدهای کاربردی برای کاهش تلفات

نتایج این مطالعه نشان داد که شرایط رطوبتی ساقه نقش تعیین کننده‌ای در پاسخ مکانیکی آن به بارگذاری ناشی از چرخ‌فلک

برابر است (HR = 3.4, 95% CI: 2.1–5.5). این نتایج بیانگر آن است که شوک رطوبتی، علاوه بر کاهش نیروی لازم برای شکست، دامنه سرعت قلیل تحمل ساقه در برابر بارگذاری چرخ فلک را نیز کاهش می‌دهد.

از دیدگاه کاربردی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که تنظیم سرعت چرخ فلک باید متناسب با شرایط رطوبتی و وضعیت مکانیکی ساقه انجام شود. بر اساس شرایط آزمایش حاضر، در ساقه‌های معمولی سرعت‌های حدود ۷۰ تا ۷۵ rpm قابل تحمل بود، در حالی که ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در سرعت‌های پایین‌تری دچار شکست شدند. بنابراین، کاهش سرعت چرخ فلک به کمتر از ۴۵ rpm پس از وقوع شوک رطوبتی، برای رقم سرداری و در شرایط مشابه آزمایش حاضر، می‌تواند احتمال شکست ساقه و در نتیجه تلفات ناشی از عملکرد چرخ فلک را کاهش دهد. این مقدار به‌عنوان یک آستانه تجربی برای شرایط مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود و تعمیم آن به سایر ارقام، شرایط مزرعه و سامانه‌های برداشت نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

سیاسگزاری

این پژوهش با حمایت‌های صورت گرفته توسط دانشگاه کردستان، انجام گرفته است. از همکاران آزمایشگاه خواص مهندسی مواد بیولوژیکی دانشگاه کردستان که در جمع‌آوری داده‌ها و انجام آزمایش‌ها مشارکت داشتند، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. همچنین از کشاورزان محترم شهرستان بیجار که با اشتیاق و همکاری کامل در فرایند نمونه‌برداری یاری رسان بودند، قدردانی می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

سعید زندیه: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، استخراج و تهیه متن اولیه
هیوا گل پیرا: نظارت و مدیریت، مشاوره فنی
ترجم مصری گندش‌مین: پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، نظارت و مدیریت، مشاوره فنی
مریم رضائی: جمع‌آوری داده‌ها، خدمات نرم‌افزاری، ویرایش متن، اعتبارسنجی، تصویرسازی نتایج

چرخ فلک باید متناسب با وضعیت رطوبتی و ظرفیت مکانیکی ساقه انجام شود. در شرایط معمول، ساقه‌ها در محدوده سرعت حدود ۷۰ تا ۷۵ دور در دقیقه توان تحمل بارگذاری ایجادشده در آزمایش را داشتند، در حالی که ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در سرعت‌های پایین‌تر دچار شکست شدند. از این رو، کاهش سرعت چرخ فلک به کمتر از ۴۵ دور در دقیقه پس از وقوع شوک رطوبتی، برای رقم سرداری و تحت شرایط آزمایش حاضر، می‌تواند احتمال شکست ساقه را کاهش دهد. این مقدار به‌عنوان یک آستانه تجربی برای شرایط مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود و تعمیم آن به سایر ارقام، شرایط مزرعه و سامانه‌های برداشت نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سرعت چرخ فلک را نمی‌توان به‌عنوان یک پارامتر مستقل از وضعیت محصول در نظر گرفت؛ بلکه اثر آن تابعی از ظرفیت مکانیکی ساقه و شرایط رطوبتی آن است. از این منظر، توجه همزمان به ویژگی‌های مکانیکی محصول، وضعیت رطوبتی ساقه و تنظیم مناسب سرعت چرخ فلک می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای کاهش احتمال شکست ساقه و تلفات ناشی از عملکرد هد برداشت فراهم کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر شرایط رطوبتی بر رفتار مکانیکی و شکست ساقه گندم دیم رقم سرداری تحت بارگذاری ناشی از عملکرد چرخ فلک کمباین، در دو وضعیت ساقه‌های معمولی و ساقه‌های تحت شوک رطوبتی، پرداخت. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که نیروی شکست ساقه‌های معمولی (1.284 ± 0.12 N) به‌طور معناداری بیشتر از ساقه‌های تحت شوک رطوبتی (0.748 ± 0.09 N) است ($p < 0.001$). این کاهش حدود ۴۲ درصدی در ظرفیت تحمل بار مکانیکی نشان می‌دهد که چرخه خیس شدن و خشک شدن مجدد پس از بلوغ فیزیولوژیکی می‌تواند با تغییر در وضعیت فیزیکی و مکانیکی بافت ساقه، مقاومت آن را در برابر شکست کاهش دهد. آزمایش‌های شبیه‌سازی چرخ فلک نیز نشان داد که ساقه‌های معمولی در سرعت ۷۴ rpm و ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در سرعت ۴۸ rpm شروع به شکست کردند. همچنین، تحلیل بقا با استفاده از منحنی‌های Kaplan–Meier، آزمون Log-rank و مدل مخاطرات متناسب کاکس نشان داد که خطر لحظه‌ای شکست ساقه‌های تحت شوک رطوبتی در مقایسه با ساقه‌های معمولی ۳/۴

References

- Abdi, R., & Jalali, A. (2013). Mathematical model for prediction combine harvester header losses. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(5), 549–552.
- Berry, P. M., Sterling, M., Spink, J. H., Baker, C. J., Sylvester-Bradley, R., Mooney, S. J., Tams, A. R., & Ennos, A. R. (2004). Understanding and reducing lodging in cereals. *Advances in Agronomy*, 84, 217–271. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)84005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)84005-7)

3. Chaab, R. K., Karparvarfard, S. H., Rahmanian-Koushkaki, H., Mortezaei, A., & 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>
4. Golpira, H., Tavakoli-Hashjin, T., Khosh-Taghaza, M. H., & Minaei, S. (2009). Determine some mechanical properties designed for use in machines harvesting peas. *Journal of Agricultural Knowledge*, 19(2), 23–31. [in Persian].
5. 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>
6. Hirai, Y., Inoue, E., Mori, K., & Hashiguchi, K. (2002). Investigation of mechanical interaction between a combine harvester reel and crop stalks. *Biosystems Engineering*, 83(3), 307–317. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0118>
7. Hussain, S., Iqbal, N., Rahman, T., Liu, T., Brestic, M., Safdar, M. E., Asghar, M. A., Farooq, M. U., Shafiq, I., Ali, A., Shoaib, M., Chen, G., Qin, S., Liu, W., & Yang, W. (2019). Shade effect on carbohydrates dynamics and stem strength of soybean genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.011>
8. Jin, C., Qi, Y., Liu, G., Yang, T., & Ni, Y. (2023). Mechanism analysis and parameter optimization of soybean combine harvester reel. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 54(6), 104–113. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2023.06.011>
9. Keshavarz, A., Kamali, M., Dehghani, A., Hamid-Nejad, M., Sadri, B., Haidari, A., & Mohsinin, M. (2002). *Plan to increase wheat yield and production of the country* [Report in Persian]. Ministry of Agriculture, Iran.
10. Khajeh-Pour, M. R. (1994). *Principles and fundamentals of crop production* [In Persian]. Isfahan, Iran: Islamic Azad University of Isfahan Branch.
11. Kumar, M., Campbell, L., & Turner, S. (2016). Secondary cell walls: Biosynthesis and manipulation. *Journal of Experimental Botany*, 67(2), 515–531. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv533>
12. Li, B., Gao, F., Ren, B.-Z., Dong, S.-T., Liu, P., Zhao, B., & Zhang, J.-W. (2021). Lignin metabolism regulates lodging resistance of maize hybrids under varying planting density. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(8), 2077–2089. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63346-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63346-9)
13. Liu, Q., Luo, Z., Wang, M., Lin, Z., Huang, Y., Zhou, Q., & Han, X. (2025). Influence of cellular structural characteristics on stem mechanical strength in two wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Applied Sciences*, 15(19), 10424. <https://doi.org/10.3390/app151910424>
14. Manga-Robles, A., Santiago, R., Malvar, R. A., Moreno-González, V., Fornalé, S., López, I., Centeno, M. L., Acebes, J. L., Álvarez, J. M., Caparros-Ruiz, D., Encina, A., & García-Angulo, P. (2021). Elucidating compositional factors of maize cell walls contributing to stalk strength and lodging resistance. *Plant Science*, 307, 110882. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.110882>
15. Ministry Agriculture-Jihad of Iran. (2023). *Agricultural statistics yearbook 2023* [In Persian]. Deputy for Planning and Economic Affairs, Office of Statistics and Information Technology, Tehran, Iran.
16. Ministry of Agriculture-Jihad of Iran. (2025). *Agricultural statistics yearbook 2025* [In Persian]. Deputy for Planning and Economic Affairs, Office of Statistics and Information Technology, Tehran, Iran.
17. Mizuno, H., Kasuga, S., & Kawahigashi, H. (2018). Root lodging is a physical stress that changes gene expression from sucrose accumulation to degradation in sorghum. *BMC Plant Biology*, 18(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1218-9>
18. Mohsenin, N. N. (1970). *Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics, and mechanical properties* (Vol. 1). New York, NY: Gordon and Breach Science Publishers.
19. Ogden, M., Hoefgen, R., Roessner, U., Persson, S., & Khan, G. A. (2018). Feeding the walls: How does nutrient availability regulate cell wall composition? *International Journal of Molecular Sciences*, 19(9), 2691. <https://doi.org/10.3390/ijms19092691>
20. Rajput, D. S., & Bhole, N. G. (1973). Static and dynamic shear properties of paddy stem. *The Harvester*, 15, 17–21.
21. Soleimani, A., & Kasraie, A. (2012). Factors affecting grain loss in combine harvesters and optimization strategies. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 14(3), 45–58. [in Persian].
22. Tavakoli, H., Mohtasebi, S. S., & Jafari, A. (2009). Physical and mechanical properties of wheat straw as influenced by moisture content. *International Agrophysics*, 23(2), 175–181.
23. Walunj, A., Chen, Y., Tian, Y., & Zeng, Z. (2023). Modeling soil–plant–machine dynamics using discrete element method: A review. *Agronomy*, 13(5), 1260. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>
24. Zhang, J., Li, G., Song, Y., Liu, Z., Yang, C., Tang, S., Zheng, C., Wang, S., & Ding, Y. (2014). Lodging resistance characteristics of high-yielding rice populations. *Field Crops Research*, 161, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.01.012>
25. Zhang, R., Jia, Z., Ma, X., Ma, H., & Zhao, Y. (2020). Characterising the morphological characters and carbohydrate metabolism of oat culms and their association with lodging resistance. *Plant Biology*, 22(2), 267–276. <https://doi.org/10.1111/plb.13058>