

مقاله پژوهشی

برازش مدل ریاضی برای پیش‌بینی برخی شاخص‌های کیفی برنج سفید بر اساس آزمون خمشی دانه توسط روش سطح پاسخ

نصراله فاضلی بورستان^۱، امیر حسین افکاری سیاح^{۲*} و ابراهیم تقی‌نژاد^۳

چکیده

یکی از روش‌های تعیین کیفیت دانه‌های برنج، بررسی خواص تک‌دانه است؛ ضمن این‌که یکی از مشکلات عمده پیش‌بینی خواص کیفی برنج، هزینه بالای آزمایش‌های صنایع غذایی است. هدف از این پژوهش، پیش‌بینی برخی خواص کیفی برنج سفید طی آزمون خمشی بر روی تک‌دانه در ۳ رقم (خزر، درفک و کادوس) و ۲ سطح رطوبتی ۹ و ۱۴ درصد بر پایه تر است. به این منظور روش سطح پاسخ (طرح داده‌های تصادفی) برای مدل‌سازی و تخمین خواص کیفی (میزان آمیلوز و پروتئین، درجه حرارت ژلاتینه‌شدن، قوام ژل، حداقل و حداکثر چسبندگی، چسبندگی نهایی، فروریختگی و پس‌روی چسبندگی، زمان لازم برای رسیدن به حداکثر چسبندگی و درجه حرارت چسبندگی) به‌عنوان متغیرهای پاسخ توسط متغیرهای مستقل (نیروی شکست، نیرو در تغییر شکل ۰/۰۵ میلی‌متر، تغییر شکل بیشینه، مدول‌های مماسی و سکانتی بیشینه، مدول‌های مماسی و سکانتی در تغییر شکل ۰/۰۵ میلی‌متر و انرژی شکست) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تمام مدل‌ها معنی‌دار ($P < 0.05$) بوده‌اند و مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی برای تمام متغیرهای پاسخ، مدلی از نوع خطی - برهم‌کنش (2FL) با $R^2 \geq 0.98$ و $R^2_{pred} \geq 0.94$ است. شرایط بهینه متغیرهای مستقل براساس هدف ماکزیمم یا مینیمم‌سازی متغیرهای پاسخ تعیین شد، به‌طوری که بهینه‌یابی با درجه مطلوبیت ($R^2 \geq 0.82$) نتیجه شد. همچنین نتایج نشان داد که روش سطح پاسخ در فرآیند مدل‌سازی پیش‌بینی برخی خواص کیفی برنج بر اساس خواص استحکامی دانه روشی سریع، ارزان و مفید است.

واژه‌های کلیدی: آزمون خمشی، تک دانه برنج، خواص کیفی، روش سطح پاسخ.

ارجاع: فاضلی بورستان ن، افکاری سیاح ا، ح. و تقی‌نژاد ا. ۱۳۹۹. برازش مدل ریاضی برای پیش‌بینی برخی شاخص‌های کیفی برنج سفید بر اساس آزمون خمشی دانه توسط روش سطح پاسخ. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۹(۲): ۲۱-۱۱.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

* نویسنده مسئول: acafkari@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷

مقدمه

برنج یکی از رایج‌ترین مواد غذایی مصرفی در جهان است و ارزش تجاری آن، تا حد زیادی بر اساس ویژگی‌های کیفی برنج آسیاب‌شده تعیین می‌شود (Vithu *et al.*, 2016). همچنین کیفیت خوراکی و پخت برنج تأثیر زیادی بر قابلیت پذیرش مصرف‌کنندگان دارد. هر یک از شاخص‌های کیفی نظیر میزان آمیلوز، درجه حرارت ژلاتینی‌شدن، قوام ژل و خواص چسبندگی، اهمیت زیادی در تعیین کیفیت محصول نهایی برنج دارند (Ferreira *et al.*, 2017). خواص استحکامی تک‌دانه برنج برای ارزیابی کیفیت توده استفاده می‌شود (Yu *et al.*, 2019). امروزه تعیین خواص کیفی با استفاده از آنالیز کیفی و در آزمایشگاه‌های صنایع غذایی انجام می‌شود که زمان‌بر و پرهزینه هستند؛ درحالی‌که توسعه روش‌های ساده‌تر و ارزان‌تر می‌تواند به تسریع فرآیند خریدوفروش این محصول کمک کند. تاکنون تحقیقات مختلفی در رابطه با خواص استحکامی و کیفی برنج انجام شده، اما ارتباط بین این دو دسته خواص توسط تعداد محدودی از محققان گزارش شده است.

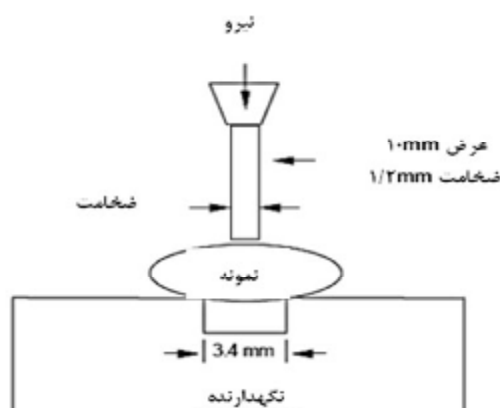
خواص مکانیکی تک‌دانه‌ها بیشتر برای ارزیابی خواص کیفی غلات مختلف استفاده می‌شود. همچنین از خواص مکانیکی تک‌دانه به‌منظور بیان ارتباط بین سختی و پارامتر کیفی برای درجه‌بندی غلات، مانند گندم استفاده شده است (Osborne & Anderssen, 2003). برخی پژوهشگران صرفاً به استخراج خواص استحکامی دانه برنج پرداختند به‌عنوان مثال، Kumklam (2013) تحقیقی به‌منظور بررسی استحکام خمشی دانه برنج انجام داد و این نتیجه حاصل از مطالعات حاکی از آنست که نیروی شکست بیشینه در برنج سالم بیشتر از برنج ناسالم است. از سوی دیگر (Zhang *et al.*, 2005) تحقیقی بر اساس آزمون خمشی بر روی دانه‌های برنج قهوه‌ای انجام دادند و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ضریب کشسانی ظاهری، مقاومت خمشی و انرژی شکست در دانه‌های سالم نسبت به دانه‌های ترک‌دار بیشتر است. در مطالعه‌ای مشابه، طی آزمون خمشی بر روی دانه‌های برنج در دو سطح رطوبتی محققین به این نتیجه رسیده‌اند که استحکام خمشی، ضریب کشسانی ظاهری و انرژی شکست با افزایش رطوبت دانه کاهش می‌یابد (Tajaddodi Talab *et al.*, 2012)، با وجود مطالعات بسیاری که توسط پژوهشگران انجام شده، تاکنون به‌منظور پیش‌بینی خواص کیفی برنج بر اساس ویژگی‌های استحکامی

تک‌دانه مطالعه‌ای صورت نگرفته است. چنین پژوهشی از آن جهت حائز اهمیت است که در صورت مثبت بودن نتایج حاصل، شرایط برای توسعه دستگاه‌های ارزیابی کیفی تک‌دانه فراهم می‌شود که عموماً نتایج دقیق‌تری از بررسی نمونه توده به دنبال دارد. این روش در دو دهه گذشته در ارزیابی کیفیت گندم با موفقیت انجام شده است و نتیجه چنین تحقیقاتی، توسعه و ساخت دستگاه‌های سختی‌سنج تک دانه Perten است، که در اغلب آزمایشگاه‌های کیفی گندم کاربرد دارد، و در آن از مؤلفه‌های استحکامی دانه گندم استفاده می‌شود (Pearson *et al.*, 2007).

روش سطح پاسخ (طرح داده‌های تصادفی^۱) شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری برای ساخت مدل‌های تجربی است. مزیت اصلی این روش کاهش تعداد آزمایش‌های لازم برای ارزیابی پارامترهای مختلف و برهم‌کنش بین آن‌ها است و در مواردی کاربرد دارد که پاسخ تحت تأثیر تعداد زیادی از متغیرها است (Bas & Boyaci, 2007). تحقیقات زیادی در مورد استفاده از روش پاسخ سطح انجام شده است. به‌عنوان مثال، Taghinezhad (2016) & Brenner تحقیقی در خصوص مدل‌سازی ریاضی ژلاتینی‌شدن نشاسته و برخی خواص کیفی برنج نیم‌جوش بر اساس شاخص‌های نیم‌جوش کردن با استفاده از روش سطح پاسخ انجام دادند. نتیجه حاصل نشان داد مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی درجه ژلاتینه‌شدن برنج سالم، مقدار رنگ، شفافیت و سختی دانه با $R^2 \geq 0.86$ بودند. همین‌طور، (Yousaf *et al.*, 2017) پژوهشی در مورد بهینه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی ویژگی‌های کیفی برنج نیم‌جوش با استفاده از روش سطح پاسخ انجام دادند و نتیجه حاصل نشان می‌دهد که روش سطح پاسخ ابزار مفیدی برای تحقیق موردنظر است.

بنابراین در مطالعه حاضر، پژوهشی برای پیش‌بینی برخی خواص کیفی و پارامترهای استحکامی تک‌دانه‌های برنج انجام شده است که از مؤلفه‌های مستخرج حاصل از آزمون خمشی در ۳ رقم برنج با روش سطح پاسخ استفاده شده است. مؤلفه‌های استحکامی شامل (مقادیر نیرو، تغییر شکل، انرژی شکست، مدول‌های مماسی و سکانتی) و شاخص‌های کیفی شامل خواص شیمیایی (میزان آمیلوز، شاخص درجه حرارت ژلاتینه‌شدن، قوام ژل، میزان پروتئین) و خصوصیات فیزیکوشیمیایی (حداقل و حداکثر چسبندگی، چسبندگی

نقطه‌ای که با افزایش تغییر شکل، دچار افت نیرو شد به‌عنوان نقطه شکست مشخص شد. مقدار نیرو در این نقطه، نیروی گسیختگی است. انرژی شکست^۲ دانه از اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی نیرو-تغییر شکل تا نقطه گسیختگی به دست آمد (Li *et al.*, 2014). مدول مماسی^۳ که عبارت است از: شیب خط مماس در هر نقطه از منحنی و مدول سکانتی^۴ که به‌صورت شیب خط قاطع از مبدأ به هر نقطه دلخواه از منحنی بیان می‌شود (Henry *et al.*, 2000) در نقاط مختلف نمودار تعیین شدند.



شکل ۱- پروب مورد استفاده در آزمون خمشی (سه نقطه‌ای)

تعیین خواص کیفی برنج

خواص کیفی شامل خواص شیمیایی (میزان آمیلوز (AC)، درجه حرارت ژلاتینه‌شدن (GT)، قوام ژل (GC) میزان پروتئین) و فیزیکوشیمیایی نشاسته دانه‌ها (حداقل چسبندگی (Min.V)، حداکثر چسبندگی (Max.V)، چسبندگی نهایی (Final.V)، فروریختگی چسبندگی (BD.V)، پس‌روی چسبندگی (SB.V)، زمان لازم برای رسیدن به حداکثر چسبندگی (PT) و درجه حرارت چسبندگی (Pasting.T)) به‌عنوان متغیرهای وابسته اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری میزان آمیلوز با استفاده از روش کالریمتریک در طول موج ۶۲۰ نانومتر با تشکیل کمپلکس ید- نشاسته انجام شد (Juliano, 1971). برای تعیین درجه حرارت ژلاتینه‌شدن از روش لیتل استفاده شد (Little *et al.*, 1958)، که در این روش ۶ دانه کامل برنج سفید در داخل پتری دیش شیشه‌ای قرار گرفته و مقدار ۱۰ میلی‌لیتر هیدروکسیدپتاسیم ۱/۷ درصد به آن اضافه

نهایی، فروریختگی و پس‌روی چسبندگی، مدت زمان لازم برای رسیدن به حداکثر چسبندگی و درجه حرارت چسبندگی) هستند. در نهایت، بهینه‌سازی متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی خواص کیفی (متغیرهای وابسته) انجام می‌شود.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی دانه برنج

به مقدار کافی نمونه توده برنج از رقم برنج مستقیماً از مزرعه تحقیقات برنج کشور واقع در شهرستان رشت تهیه شد. به‌منظور تعیین رطوبت اولیه شلتوک سه نمونه ۱۵ گرمی درون آون با دمای 130°C به مدت ۱۹ ساعت گرمی قرار داده شد. (Nalladurai *et al.*, 2003) میزان رطوبت نمونه‌ها ۱۵-۱۶ درصد بر پایه تر بود. برای پایین آوردن سطح رطوبتی به رطوبت‌های ۹ و ۱۴ درصد، شلتوک‌ها به‌صورت لایه‌نازک با دمای ۳۵°C توسط خشک‌کن آزمایشگاهی خشک و در شرایطی یکسان تحت عملیات پوست‌کنی و آسیاب قرار گرفتند. سپس در دمای ۴°C تا اجرای آزمایش‌ها نگهداری شدند.

آزمون خمشی

در این تحقیق برای انجام آزمون استحکامی دانه برنج از آزمون خمشی (سه‌نقطه‌ای) استفاده شد و متغیرهای مستقل شامل مقدار نیرو در ۰/۰۵ میلی‌متر تغییر شکل (F_{0.05})، نیروی شکست (F_{max})، تغییر شکل بیشینه (D_{max})، انرژی شکست (E.F)، مدول مماسی در ۰/۰۵ میلی‌متر تغییر شکل (Et_{0.05})، مدول مماسی بیشینه (Et_{max})، مدول سکانتی در ۰/۰۵ میلی‌متر تغییر شکل (Es_{0.05}) و مدول سکانتی بیشینه (Es_{max}) اندازه‌گیری شدند. به‌منظور آزمون خمشی دانه برنج از پروب مطابق شکل ۱ با مشخصات دو اتکای نگهدارنده برنج با عرض ۳/۴ mm و اتکای بالایی واردکننده نیرو و متصل به فک بالایی دستگاه با عرض ۱۰ و ضخامت ۱/۲ mm (Li *et al.*, 2014) استفاده شد.

برای انجام آزمون‌ها از دستگاه بارگذاری کشش- فشار سنتام^۱ (مدل STM-20، ساخت ایران) با سرعت بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد (Nassiri & Seyed Mohammad, 2016). بر اساس داده‌های آزمایش، اولین

2- Rupture energy
3- Tangent modulus
4- Secant modulus

1- Santam

Predicted و R^2 Adjusted معادله (۲) و (Boyaci, 2007) و R^2 معادله (۳) تأیید شد. برای بهینه‌یابی خواص کیفی از متغیرهای مستقل از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ورژن ۱۱ استفاده شد.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (۱)$$

$$R^2_{adj.} = \frac{\frac{SSR}{dfr}}{\frac{SSR + SSM}{dfr + dfm}} \quad (۲)$$

$$R^2_{pred.} = 1 - \frac{press}{SSR + SSM} \quad (۳)$$

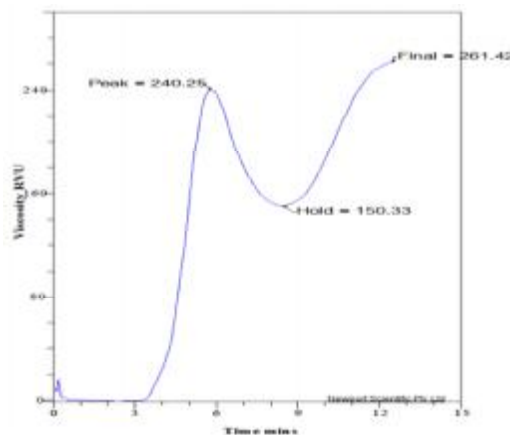
ضمناً معادلات (۲) و (۳) از راهنمای نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استخراج شده است. که در آن $press = \sum_{i=1}^n (e_{-i})^2$ تعریف می‌شود و e_{-i} حذف باقی‌مانده محاسبه شده توسط برازش یک مدل است. SSR ، SSM و SST به ترتیب مجموع مربعات مدل، باقی‌مانده و کل است.

نتایج و بحث

طرح آزمایشی و توسعه مدل

نتایج به‌دست آمده حاصل از روش سطح پاسخ همراه با معادلات رگرسیون برای متغیرهای پاسخ و مقادیر R^2 ، R^2_{adj} و R^2_{pred} در جدول ۱ نشان داده شده است. از بین ۲۲ آزمون در هر رقم تنها ۵ آزمون دارای ضریب تعیین پیش‌بینی بالای ۸۰٪ ($R^2_{pred} \geq 0.94$) و معنی‌دار ($P < 0.01$) و $P < 0.05$) بودند. بقیه آزمون‌ها دارای ضریب تعیین پیش‌بینی کمتر از ۸۰٪ هستند که از معادلات آنها صرف‌نظر شد. (Zou et al., 2013) پیشنهاد کردند مدل برازش قابل قبول نباید ضریب تعیینی کمتر از ۸۰٪ داشته باشند. از سوی دیگر Koocheki et al. (2009) ادعا کردند که برای ارزیابی دقت مدل ضریب تعیین تنظیم شده بالای ۹۰٪ مناسب است. در این مطالعه، مدل‌های توسعه‌یافته همانند $R^2_{adj} \geq 0.97$ بودند. مدل خوب باید R^2_{adj} و R^2_{pred} بالاتر و مجموع مربعات خطای پیش‌بینی پایین‌تری داشته باشد (Taghinezhad & Brenner, 2016). تمام معادلات به دست آمده در جدول ۱ از نوع خطی-برهم‌کنش (2FL) هستند.

می‌شود و سپس نمونه‌ها در داخل آون در دمای ۳۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۳ ساعت قرار گرفت. همچنین تغییرات نشاسته به‌صورت نمره ۷-۱ مشخص شد. قوام برنج سفید در پتاس ۰/۲ نرمال مشخص شده است که نشان‌دهنده میزان حرکت ژل برنج پخته بر حسب میلی‌متر است (Cagampang, 1973). میزان پروتئین آرد برنج با روش کدال با یک ضریب رایج $N \times 5/95$ تعیین شد (Xu et al., 2008). برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکوشیمیایی نشاسته دانه‌ها، نمونه‌ها پس از تبدیل به برنج سفید با استفاده از آسیاب سیکلونی UDY (ساخت ایالت متحده آمریکا) در حد مش ۱۰۰ آرد شدند سپس از هر نمونه به مقدار ۳ گرم وزن شده و مقدار ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد و داخل استوانه فلزی دستگاه ریپید ویسکو آنالایزر^۱ قرار داده شد (Kesarwani, et al., 2016). نتیجه آزمایش یک منحنی است که تغییرات ویسکوزیته نمونه را در تغییرات دمایی پخت نشان می‌دهد (Allahgholipour et al., 2006). نمونه ای از نمودار ویسکوزیته رقم خزر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار ویسکوزیته رقم خزر

طرح آزمایش و تحلیل آماری

آزمایش‌ها در طرح آزمایشی داده‌های تصادفی (Historical Data) با مدل خطی-برهم‌کنش (2FL) به روش سطح پاسخ در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۲ نسخه ۱۱ انجام شد و داده‌ها با آنالیز واریانس تحلیل شدند و روابط معنی‌داری مدل از تجزیه واریانس بدست آمد و مدل با استفاده از تکنیک‌های مختلفی از جمله ضریب تعیین (R^2) طبق معادله (۱) (Bas

1- Rapid Visco Analyzer

2- Design Expert

جدول ۱- معادلات رگرسیون برای متغیر پاسخ

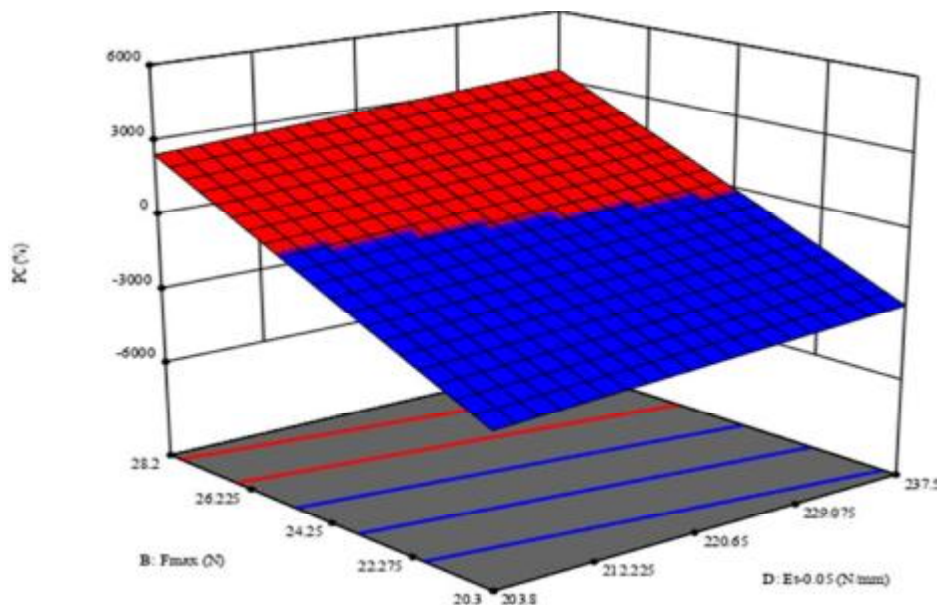
تیمار (پاسخ)	معادلات	R ²	Adj. R ²	Pred. R ²
درفک ۹٪	$Y(PC)=2.23+1203*A+811.85*B+910.5*C+30.3*D-110.3*G-2185.6*H+0.7*AB-1059.7*AC$	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۴
کادوس ۱۴٪	$Y(GT)=236.2+143.3*A-102.7*B-2781.7*C+4.28*D-3.05*E-5.3*G+1471.1*H+0.6*AB$	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۶
خزر ۹٪	$Y(SB.V)=-247.8-5365.72*A-8023.1*B+2594.42*C-726*D+569.1*E+624.35*G+17318.99*H+1.1*AC$	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۵
خزر ۱۴٪	$Y(BD.V)=55.97+72.1*A+26.65*B+185.4*C+10.24*D-10.5*E+426.23*H-1616.85*AC$	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۶
	$Y(P.T)=8.8-2.3*A-2.13*B-23.8*C+0.22*D-0.3*E+0.3*G+20.25*H+0.0011*AB$	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷

F_{0.05}=A(نیوتن), F_{max}=B(نیوتن), D_{max}=C(میلی‌متر), E_{0.05}=D(نیوتن بر میلی‌متر), E_{max}=E(نیوتن بر میلی‌متر), E_{s0.05}=F(نیوتن بر میلی‌متر), E_{smax}=G(نیوتن بر میلی‌متر), E, F=H(ژول)

را نشان می‌دهد. قسمت اعظم دانه برنج از هیدرات‌های کربن تشکیل شده که بیشتر آن نشاسته بوده و در آندوسپرم قرار دارد. پروتئین مهم‌ترین بخش از ترکیب شیمیایی دانه برنج را تشکیل می‌دهد به طوری که میزان پروتئین بالای دانه موجب سخت‌تر شدن و شفافیت آن می‌شود (sun, 2008). در نتیجه استحکام دانه بیشتر بوده و نیروی بیشتری برای شکست دانه مورد نیاز است که این با نتایج به دست آمده توسط Yan & Zhu (2001) مطابقت دارد.

تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ

اثر متقابل آماری نیروی شکست (F_{max}) و مدول مماسی در ۰/۰۵ میلی‌متر تغییر شکل (E_{t0.05}) بر امکان پیش‌بینی میزان پروتئین (PC) در رقم درفک با رطوبت ۹ درصد در شکل ۳ دیده می‌شود. مقادیر میانگین‌های E_{t0.05} و F_{max} به ترتیب ۲۴/۲۹ N/mm و ۰/۱۴ N/mm به دست آمد. با افزایش متغیرهای F_{max} از ۲۰/۳۶ به ۲۸/۲۲ N و E_{t0.05} از ۲۰۳/۸۴ به ۲۳۷/۵۶ N/mm (PC) از ۶/۴ به ۶/۸۲ (درصد) افزایش یافته است. همانطور که در شکل ۳ مشخص است افزایش میزان پروتئین، افزایش میزان نیروی شکست

شکل ۳- اثر متقابل آماری F_{max} و E_{t0.05} بر امکان پیش‌بینی PC

متغیرهای مستقل میزان متغیرهای پاسخ افزایش یافته است. در شکل ۴- الف در رقم کادوس با رطوبت ۱۴ درصد،

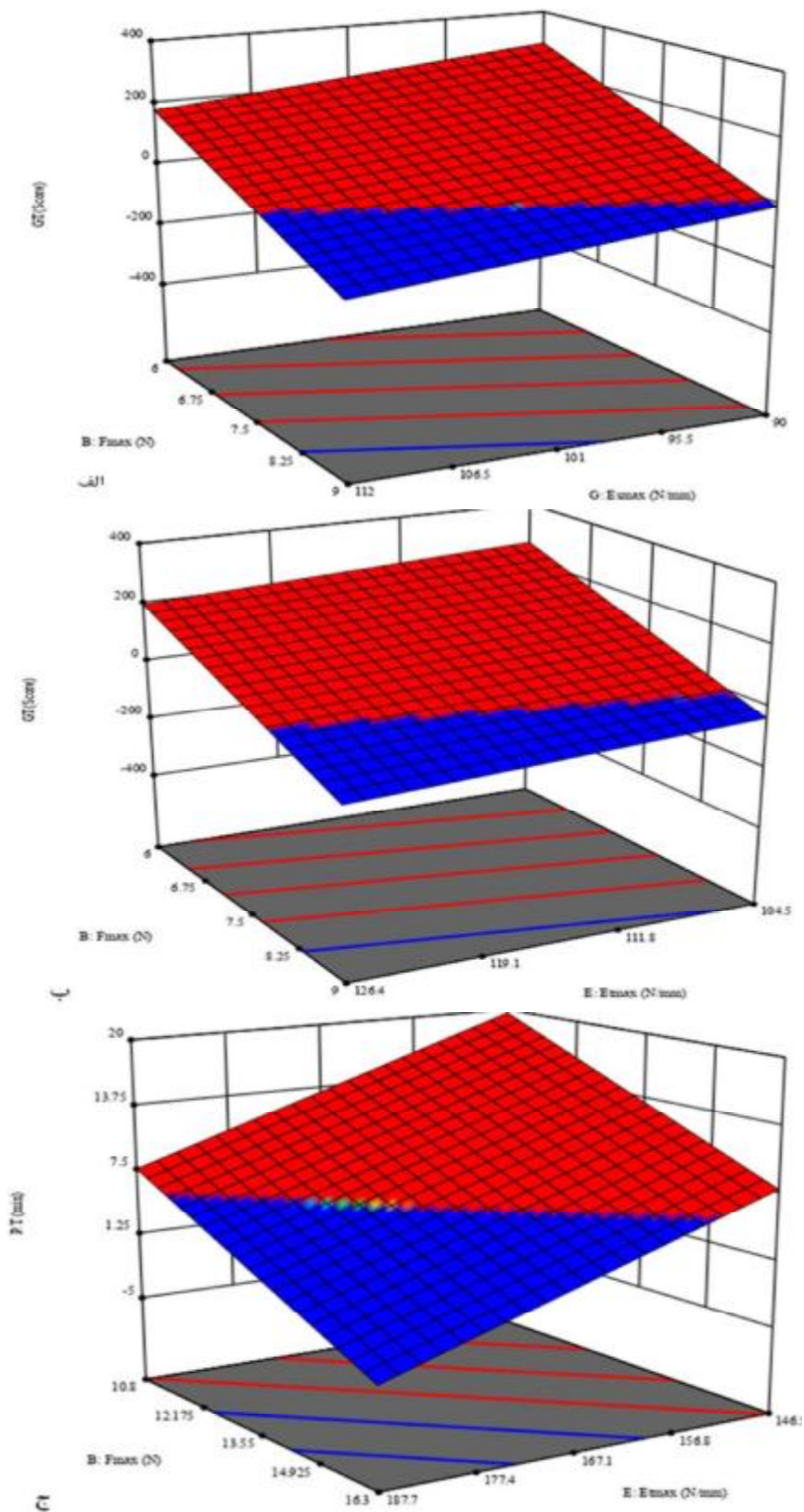
اثر متقابل آماری متغیرهای مستقل بر امکان پیش‌بینی متغیرهای پاسخ در شکل ۴ نشان می‌دهد که با کاهش

مقادیر به دست آمده برای سختی دانه‌ها با مقادیر گزارش شده توسط Mestres *et al.* (2011) مطابقت دارد. از طرف دیگر، رطوبت بالای دانه (۱۴ درصد) موجب سختی کم دانه شده که با کمترین نیرو شکسته می‌شود. با افزایش رطوبت دانه از ۵ تا ۳۰ درصد (بر پایه خشک) خواص استحکامی برنج کاهش می‌یابد به ویژه در رطوبت‌های ۱۲ الی ۱۸ درصد، کاهش خواص استحکامی دانه شدیدتر است (Wouters & Baerdemaeker, 1988) ارقام مختلف در مقابل تنش‌های اعمال‌شده مقاومت متفاوتی دارند این تفاوت به عوامل ژنتیکی و خصوصیات ظاهری دانه‌ها بستگی دارد (Cossen & Siebenmorgen, 2000).

اثر متقابل آماری $F_{0.05}$ ، E_{tmax} ، D_{max} بر امکان پیش‌بینی BD.V در رقم خزر با رطوبت ۱۴ درصد در شکل ۵- الف و ب نشان داده شده است. مقادیر میانگین E_{tmax} ، D_{max} و $F_{0.05}$ به ترتیب ۰/۱۱ mm، ۱۶۹ N/mm و ۶/۲۷ N به دست آمد، به طوری که تغییر D_{max} از ۰/۰۷۹ به ۰/۱۳ mm، E_{tmax} از ۱۴۶/۴۸ به ۱۸۷/۶۹ N/mm و $F_{0.05}$ از ۵/۱ به ۸/۴۷ N باعث کاهش مقدار متغیر BD.V از ۶۹/۲۵ به ۷۲/۶۱ RVU شده است. با خنک‌شدن نمونه‌ها در اثر کاهش درجه حرارت، دانه‌های نشاسته بزرگ‌شده و به تکه‌های کوچک‌تری تبدیل می‌شود و به حداقل چسبندگی خود می‌رسند. علاوه بر حداکثر چسبندگی، دو عامل باز پخت و اتصال عرضی نیز حائز اهمیت هستند، به طوری که هرچه این دو عامل کمتر باشند میزان آمیلوز قابل حل بیشتر و شکستگی تدریجی و کند آمیلوپکتین بیشتر می‌شود و در نتیجه حداقل چسبندگی به کمترین مقدار خود می‌رسد؛ به این ترتیب میزان فروریختگی چسبندگی (BD.V) که نشان‌دهنده کیفیت خوب پخت دانه‌های نشاسته است افزایش می‌یابد (Tester & Morrison, 1990). میانگین فروریختگی رقم خزر از تمامی ارقام (۷۱/۱۵) کمتر است. با کاهش میزان فروریختگی چسبندگی دانه‌ها سفت و خشک می‌شوند (Allahgholipour *et al.*, 2006). در نتیجه با کاهش میزان فروریختگی استحکام دانه افزایش می‌یابد، نتایج پژوهش Asante *et al.* (2013) نیز گویای همین امر است. از طرف دیگر، میزان پروتئین رقم خزر (۹/۷) بیشتر است. میزان پروتئین با فروریختگی چسبندگی رابطه معکوس دارد (Mestres *et al.*, 2011). در نتیجه استحکام بیشتر دانه در مقدار فروریختگی چسبندگی کمتر اتفاق می‌افتد.

مقادیر میانگین‌های F_{max} ، E_{tmax} و GT به ترتیب ۷/۷۷، ۱۱۶/۲۵ N/mm و ۳/۵۲ به دست آمد، افزایش میانگین متغیرهای F_{max} از ۶/۷۹ به ۹/۵۷ N و E_{tmax} از ۱۰۴/۵۴ به ۱۲۶/۴۵ N/mm باعث کاهش مقدار میانگین درجه حرارت ژلاتینه‌شدن (GT) از ۳/۶ به ۳/۳۴ شده است. همچنین، در شکل ۴- ب با افزایش میانگین متغیرهای F_{max} از ۶/۷۹ به ۹/۵۷ N و E_{smax} از ۹۰/۶۸ به ۱۱۲/۳ N/mm کاهش مقدار میانگین GT نتیجه شده است. از آنجاکه درجه حرارت چسبندگی (Pasting.T) با درجه حرارت ژلاتینه‌شدن (GT) رابطه معکوس دارد، هرچه درجه حرارت لازم برای پخت نمونه کمتر باشد درجه حرارت ژلاتینه‌شدن بیشتر بوده و در هنگام پخت به سرعت از هم می‌پاشد (Tester & Morrison, 1990). محدوده مطلوب شاخص ژلاتینه‌شدن ۳-۵ بوده و پایین‌تر از نمره ۳ شاخص ژلاتینی‌شدن بالا محسوب می‌شود (Little *et al.*, 1958). شاخص ژلاتینه‌شدن کادوس تا حدودی نزدیک به شاخص بالا قرار دارد. در نتیجه دانه‌ها با کمترین نیرو شکسته می‌شوند که این پژوهش با نتایج به دست آمده توسط Kong *et al.* (2015) در مورد کاهش سختی دانه‌های برنج در شاخص درجه ژلاتینه‌شدن بالا مطابقت دارد. در درجه حرارت ژلاتینه‌شدن پایین، زمان پخت کوتاه‌تر می‌شود (Fitzgerald *et al.*, 2009). Mestres *et al.* (2011) نشان دادند که با افزایش زمان پخت و درجه حرارت ژلاتینه‌شدن، سختی کاهش می‌یابد، در نتیجه استحکام کمتر دانه در مدت بیشتر زمان پخت و درجه حرارت ژلاتینه‌شدن بیشتر اتفاق می‌افتد.

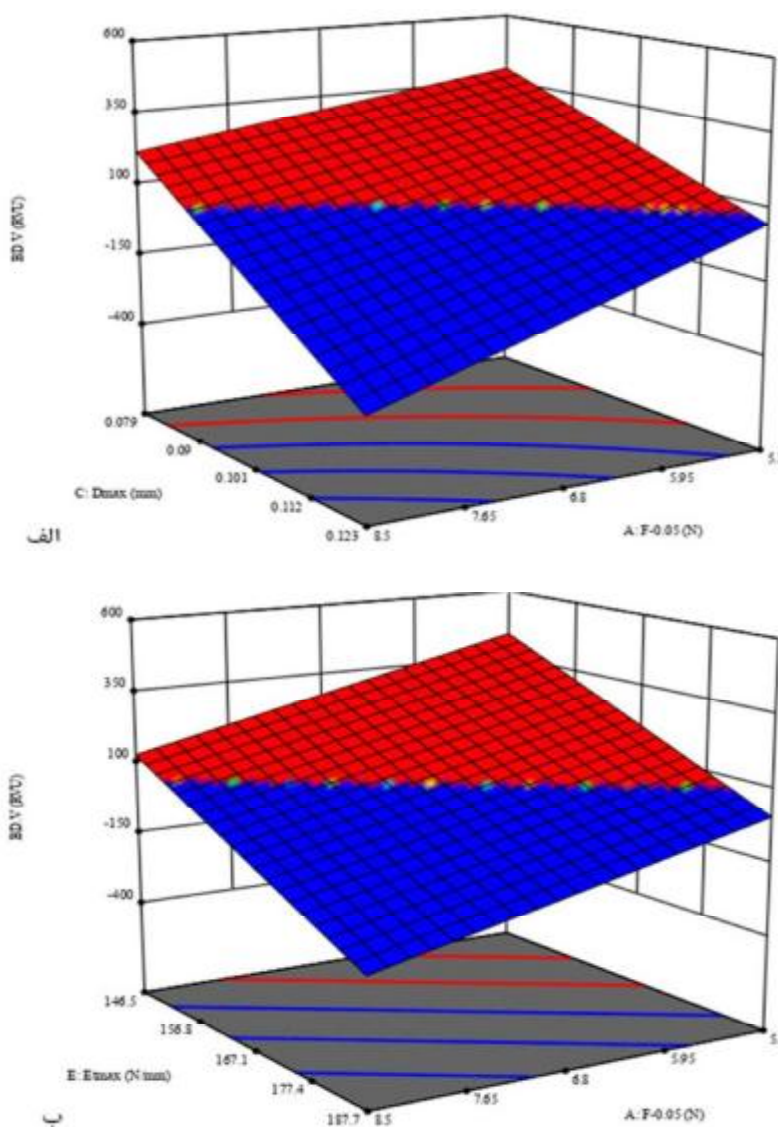
در شکل ۴- ج برای رقم خزر با رطوبت ۱۴ درصد مقادیر میانگین متغیرهای E_{tmax} ، F_{max} و PT به ترتیب ۱۶۹ N/mm و ۱۳/۶۹ N و ۶/۰۴ (min) به دست آمد. که کاهش مقادیر میانگین‌های E_{tmax} از ۱۸۷/۶۹ N/mm به ۱۴۶/۴۸ N/mm و F_{max} از ۱۶/۲۷ به ۱۰/۸ N موجب افزایش زمان لازم برای رسیدن به حداکثر چسبندگی (PT) از ۶/۰۱ به ۶/۰۷ (min) شده است. میانگین PT این رقم نسبت به سایر ارقام بیشتر است، لذا زمان لازم برای جذب آب توسط دانه‌های نشاسته در این رقم بیشتر است ولی این رقم نسبت به تمامی ارقام کمترین حداکثر چسبندگی را دارد. حداکثر چسبندگی در ارقام اصلاح شده همچون، رقم خزر در محدوده ارقام محلی است و پس از پخت حالت چسبندگی ندارند و نرم هستند (Allahgholipour *et al.*, 2006). در نتیجه پس از پخت، دانه‌ها سختی کمی دارند و با کمترین نیرو می‌شکنند،



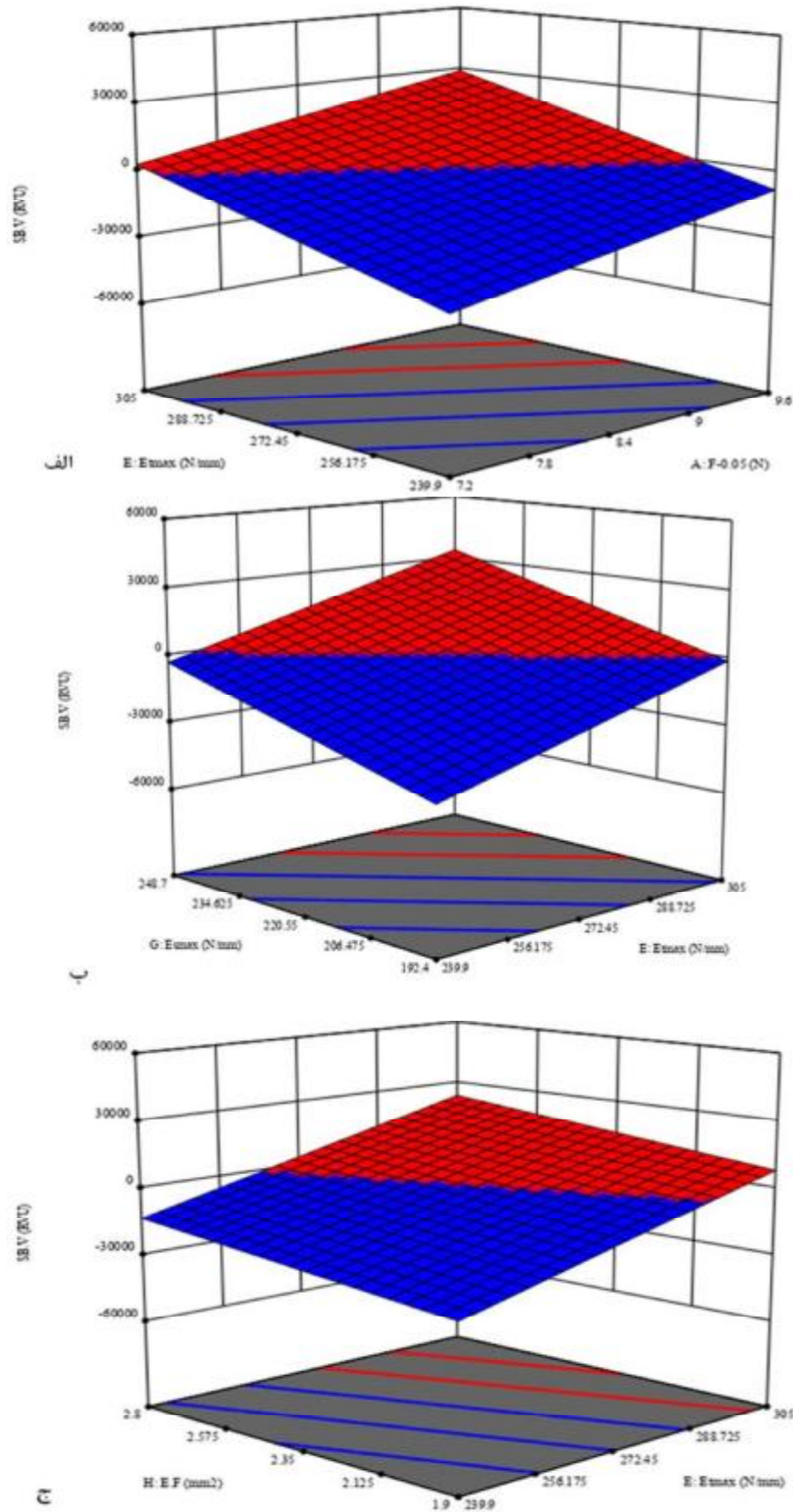
شکل ۴- اثر متقابل آماری متغیرهای مستقل بر امکان پیش‌بینی متغیر پاسخ، (الف) F_{max} و E_{tmax} بر GT ، (ب) F_{max} و E_{smax} بر GT ، (پ) E_{tmax} و F_{max} بر PT

در یک رقم نشان‌دهنده سخت‌شدن دانه‌ها پس از پخت بوده و از کیفیت نامناسبی برخوردار است (Allahgholipour *et al.*, 2006). رقم خزر جزو ارقام اصلاح شده است. در حالت کلی ارقام اصلاح شده نسبت به ارقام محلی، پس‌روی چسبندگی بالاتر و کیفیت پخت پایین‌تری دارند (Allahgholipour *et al.*, 2006). در نتیجه، در پس‌روی چسبندگی بالا با سفت‌شدن دانه سختی دانه افزایش می‌یابد که این نتیجه با یافته‌های گزارش‌شده توسط Asante *et al.* (2013) مطابقت دارد.

اثر متقابل آماری $E.S_{max}$ ، $E.F$ ، $E.t_{max}$ و $F_{0.05}$ بر امکان پیش‌بینی SB.V در رقم خزر با رطوبت ۹ درصد در شکل ۶ نشان می‌دهد که افزایش متغیرهای $E.S_{max}$ از ۱۹۲/۴۶ به ۲۴۸/۸ N/mm، $E.F$ از ۱/۹ به ۲/۸۶ J، $E.t_{max}$ از ۲۳۹/۹۴ به ۳۰۵/۰۴ N/mm و $F_{0.05}$ از ۷/۲۸ به ۹/۶۳ N باعث افزایش مقدار پاسخ SB.V از ۱۴۴/۱۳ به ۱۴۶/۱۵ RVU شده است. همچنین، میانگین متغیرهای $E.S_{max}$ ، $E.F$ ، $E.t_{max}$ و $F_{0.05}$ به ترتیب ۲۱۶/۴ N/mm، ۲/۳۳ J، ۲۶۷/۶ N/mm و ۸/۳۸ N به دست آمد. پس‌روی چسبندگی فاصله بین حداقل چسبندگی و چسبندگی نهایی است و بالا بودن میزان آن



شکل ۵- اثر متقابل آماری متغیرهای مستقل بر امکان پیش‌بینی متغیرهای پاسخ، (الف) D_{max} و $F_{0.05}$ ، (ب) $E.t_{max}$ و $F_{0.05}$ بر BD.V



شکل ۶- اثر متقابل آماری متغیرهای مستقل بر امکان پیش‌بینی متغیرهای پاسخ، (الف) $F_{0.05}$ و E_{tmax} ، (ب) E_{tmax} و E_{smax} ، (ج) E_{tmax} و $E.F$ بر $SB.V$

بهینه‌سازی

تعداد ده راه‌حل به‌منظور تعیین شرایط بهینه برای داده‌های مستخرج از آزمون خمشی ارائه شد. نرم‌افزار شرایط بهینه متغیرهای مستقل را بر اساس هدف ماکزیمم یا مینیمم‌سازی متغیرهای پاسخ تعیین کرد. در این پژوهش، برای متغیرهای پاسخ PC (Allahgholipour et al., 2006)، PT (Mestres et al., 2011) و BD.V (Asante et al., 2013) بیشترین مقدار و

کمترین مقدار انتخاب شد. برای پیش‌بینی بهترین خواص کیفی دانه برنج کمترین مقدار متغیرهای مستقل $F_{0.05}$ ، F_{max} ، D_{max} ، $E_{t0.05}$ ، E_{tmax} ، $E_{s0.05}$ و E_{smax} انتخاب شد. خواص استحکامی حاصل از آزمون خمشی با درجه مطلوبیت (۰/۸۲-۰/۹۱) خواص کیفی برنج را پیش‌بینی کرد. نتایج مقادیر حاصل از بهینه‌یابی متغیرهای مستقل و پاسخ در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر ارزیابی متغیرهای مستقل اندازه‌گیری شده و بهینه‌سازی مدل در آزمون خمشی

منابع	متغیرهای مستقل								متغیر پاسخ	مطلوبیت
	F0.05	Fmax	Dmax	Et0.05	Etmax	Es0.05	Esmax	E.F		
PC) درفک ۹%	۷/۶۱	۲۱/۰۵	۰/۱۳	۲۰۹/۶	۲۳۲	۱۶۰/۷۳	۱۷۸/۲۲	۱/۳۴	۶/۸۲	۰/۹۱
GT) کادوس ۱۴%	۴/۴۵	۶/۹۲	۰/۰۸	۱۰۰/۳۴	۱۰۶/۶۳	۱۰۰/۳	۹۰/۷۳	۰/۳	۳/۶	۰/۹۱
SB.V) خزر ۹%	۸/۲۰	۲۷/۷۷	۰/۱۵	۲۳۲/۴۲	۲۵۱/۱۵	۱۶۹/۰۹	۲۰۵/۳۳	۲/۰۱	۱۴۵/۱۴	۰/۸۲
BD.V) خزر ۱۴%	۶/۲۰	۱۰/۹۹	۰/۰۹	۱۴۵/۵۹	۱۴۶/۵	۱۳۵/۷۲	۱۴۶/۵۱	۰/۴۹	۷۲/۴۹	۰/۸۹
PT) خزر ۱۴%	۶/۴۷	۱۱/۴۹	۰/۰۹	۱۴۶/۵۹	۱۴۸/۸۴	۱۳۵/۷۳	۱۲۲/۲۴	۰/۵۷	۶/۰۷	۰/۸۷

PC: میزان پروتئین (درصد)، GT: درجه حرارت ژلاتینه‌شدن (بدون واحد)، SB.V: پس‌روی چسبندگی (بر حسب RVU)، BD.V: فروریختگی چسبندگی (بر حسب RVU)، PT: زمان لازم برای رسیدن به حداکثر چسبندگی (بر حسب دقیقه)

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی برخی خواص کیفی برنج سفید طی آزمون خمشی در ۳ رقم خزر، درفک و کادوس در ۲ سطح رطوبتی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که می‌توان برخی مولفه‌های کیفی توده برنج را از بررسی استحکامی تک‌دانه پیش‌بینی نمود؛ با این هدف روش سطح پاسخ از ویژگی‌های مناسبی برای این منظور برخوردار است به‌طوری‌که بر اساس این تحقیق می‌توان با انجام آزمون‌های ساده استحکامی با استفاده از متغیرهای نیروی شکست، انرژی شکست، نیرو در ۰/۰۵ میلی‌متر تغییر شکل، ضریب‌های مماسی و تقاطع بیشینه و ضریب‌های مماسی و تقاطع در تغییر شکل معادل ۰/۰۵ میلی‌متر، برخی از مهم‌ترین مؤلفه‌های کیفی توده برنج شامل میزان آمیلوز، درجه حرارت ژلاتینه‌شدن، قوام ژل، میزان پروتئین، کمینه و بیشینه چسبندگی، چسبندگی نهایی، فروریختگی و پس‌روی چسبندگی، زمان لازم برای رسیدن به بیشینه چسبندگی و درجه حرارت چسبندگی برای مصرف‌کننده را با دقت مناسبی پیش‌بینی نمود. یافته‌های این تحقیق شرایط را برای توسعه دستگاه‌های آزمون تک‌دانه همچون گندم فراهم خواهد نمود.

منابع

- Allahgholipour, M., Ali, A., Alinia, F., Nagamine, T., & Kojima, Y. (2006). Relationship between rice grain amylose and pasting properties for breeding better quality rice varieties. *Plant Breed*, 125: 357-362.
- Asante, M., Offei, S., Gracen, V., Adu-Dapaah, H., Danquah, E., Bryant, R., & McClung, A. (2013). Starch physicochemical properties of rice accessions and their association with molecular markers. *Starch Starke*, 65: 1022-1028.
- Bas, D., & Boyaci, I. (2007). Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 78: 836-845.
- Cagampang, G. (1973). A gel consistency test for eating quality of rice. *Journal Sci. Food and Agriculture*, 24(12): 1589-94.
- Cnossen, A., & Siebenmorgen, T. (2000). The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: Effect on milling quality. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 43: 1661-1667.
- Ferreira, A., Oliveira, J., Pathania, S., & Almeida, A. (2017). Rice quality profiling to classify germplasm in breeding programs. *Journal of Cereal Science*, 76: 17-27.
- Fitzgerald, M., McCouch, S., & Hall, R. (2009). Not just a grain of rice: the quest for quality. *Trends in Plant Science*, 14: 133-139.

- (2007). Relationship between single wheat kernel particle size distribution and Perten SKCS 4100 hardness index. *Cereal Chem*, 84: 567-575.
21. Sun, D. W. (2008). *Computer vision technology for food quality evaluation*. Food Science and Technology: International Series, 583 p.
 22. Taghinezhad, E., & Brenner, T. (2016). Mathematical modeling of starch gelatinization and some quality properties of parboiled rice based on parboiling indicators using RSM. *Journal of Food Process Engineering*, DOI 10.1111/jfpe.12483.
 23. Tajaddodi Talab, K., Mohd, N., Spotar, S., Rosnita, A., & Kharidah, M. (2012). Glass transition temperature, mechanical properties of rice and their relationships with milling quality. *International Journal of Food Engineering*, 8(3): 1-20.
 24. Tester, R. F., & Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches II. Waxy rice starches. *Cereal Chemistry*, 67: 558-563.
 25. Vithu, P., Tech, M., & Moses, J. (2016). Machine vision system for food grain quality evaluation: A review. *Journal of Trends In Food Science & Technology*, 56: 13-20.
 26. Wouters, A., & Baerdemaeker, J. (1988). Effect of moisture content on mechanical properties of rice kernels under quasi-Static compressive loading. *Journal of Food Engineering*, 7: 83-111.
 27. Xu, Y., Xiong, S., Li, Y., & Zhao, S. (2008). Study on creep properties of indica rice gel. *Journal of Food Engineering*, 86: 10-16.
 28. Yan, Q., & Zhu, Y. (2001). Relation of starch and protein to eating quality of milled rice. *Cereal and Oils*, 5: 29-31.
 29. Yousaf, K., Kunjie, C., Cairong, C., Abbas, A., Huang, Y., Arsalan, C., & Xuejin, Z. (2017). The Optimization and mathematical modeling of quality attributes of parboiled rice using a response surface method. *Journal of Food Quality*, 5960743: 1-13.
 30. Yu, L., Witt, T., Rincon Bonilla, M., Turner, M., Fitzgerald, M., & Stokes, J. (2019). New insights into cooked rice quality by measuring modulus, adhesion and cohesion at the level of an individual rice grain. *Journal of Food Engineering*, 240: 21-28.
 31. Zou, T., Jia, Q., Li, H., Wang, C., & Wu, H. (2013). Response surface methodology for ultrasound-assisted extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Marine Drugs*, 11: 1644-1655.
 8. Henry, Z., Zhang, H., & Onks, D. (2000). New Model for Elastic Behavior of Cellular Material. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76: 399-408.
 9. Juliano, B. (1971). A simplified assay for milled rice amylose. *Cereal Science Today*, 16: 334-360.
 10. Kesarwani, A., Chiang, P., & Chen, S. (2016). Rapid Visco Analyzer Measurements of japonica Rice Cultivars to Study Interrelationship between Pasting Properties and Farming System. *International Journal of Agronomy*, 3595326: 1-6.
 11. Kong, X., Zhu, P., Sui, Z., & Bao, J. (2015). Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinization temperature combinations. *Food Chemistry*, 172: 433-440.
 12. Koocheki, A., Taherian, A., Razavi, S., & Bostan, A. (2009). Response surface methodology for optimization of extraction yield, viscosity, and hue and emulsion stability of mucilage extracted from *Lepidium perfoliatum* seeds. *Food Hydrocolloids*, 23: 2369-2379.
 13. Kumklam, P. (2013). Predict Head Rice Yield with Mechanical Strength of Kernels. *Journal of Applied Sciences Research*, 9(12): 6107-6110.
 14. Li, Y., Li, K., Ding, W., Chen, K., & Ding, Q. (2014). Correlation between head rice yield and specific mechanical property differences between dorsal side and ventral side of rice kernels. *Journal of Food Engineering*, 123: 60-66.
 15. Little, R., Hilder, G., & Dawson, E. (1958). Differential effect of dilute alkali on 25 varieties of milled white rice. *Cereal Chemistry*, 35: 111-126.
 16. Mestres, C., Ribeyre, F., Pons, B., Fallet, V., & Matencio, F. (2011). Sensory texture of cooked rice is rather linked to chemical than to physical characteristics of raw grain. *Journal of Cereal Science*, 53: 81-89.
 17. Nalladurai, K. K., Alagusundaram, K., & Gayathri, P. (2003). Effects of variety and moisture content on the engineering properties of paddy and rice. *AMA*, 34(2): 47-52.
 18. Nassiri, S. M., & Etesami S. M. (2016). Estimation of head rice yield by measuring the bending strength of kernels after drying by different drying methods. *Agricultural Engineering International, CIGR*, 18(2): 368-377.
 19. Osborne, B., & Anderssen, R. (2003). Single-kernel characterization principles and applications. *Cereal Chemistry*, 80: 613-622.
 20. Pearson, T., Wilson, J., Gwirtz, J., Maghirang, E., Dowell, F., McCluskey, P., & Bean, S.

