

بررسی خواص مکانیکی ژل بهبود دهنده‌ی نان بربری با استفاده از روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ

امیر پورفرزاد^{1*}، محمد حسین حداد خداپرست²، مهدی کریمی³، سید علی مرتضوی²، امیر حداد خداپرست⁴

¹ دانشجوی دکتری تخصصی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

² استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

³ استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، مشهد، ایران

⁴ کارشناس کامپیوتر، موسسه‌ی غیر انتفاعی بهار، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: 90/1/5 تاریخ پذیرش: 90/4/15

چکیده

در صنعت غلات برای بهبود خصوصیات خمیر، درک پدیده‌ی بیاتی و تاخیر آن در جهت افزایش کیفیت نان، رقابت بزرگی وجود دارد. برای رسیدن به این هدف، می‌توان از افزودنی‌های غذایی کاربردی و مواد کمک فرایند که باعث بهبود کیفیت نان می‌شوند، استفاده کرد. بهبوددهنده‌های ژلی، نسل جدیدی از بهبوددهنده‌ها هستند که به طور گسترده‌ای در صنعت نانواپی به کار می‌روند. تعیین خواص ژل تشکیل شده به ما کمک می‌کند تا درک درستی از فرایند تشکیل ژل و نیز مشخصات ژل تولید شده با توجه به خواص مکانیکی آن داشته باشیم. در این پژوهش از روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ به منظور مطالعه‌ی تاثیر اجزای ژل بهبود دهنده‌ی نان بربری بر خواص مکانیکی ژل مذکور استفاده گردید. نمونه‌های ژل با افزودن سدیم استئاروئیل لاکتیلات، داتم و پروپیلن گلیکول در دامنه‌ی 0 تا 0/5 g/100g تولید گردید. نتایج، نشان داد که سفتی، گرادیان، پیوستگی، قوام و شاخص ویسکوزیته ژل با افزایش سدیم استئاروئیل لاکتیلات افزایش یافت. بنابراین، با افزایش مقدار آن، میزان الاستیسیته را می‌توان کنترل نمود. پروپیلن گلیکول تنها بر شاخص ویسکوزیته تاثیر افزایشی داشت و بر سایر پارامترها همانند داتم، فاقد تاثیری معنی دار بود. در برخی موارد، مجذور و اثر متقابل اجزاء سبب افت برخی از ویژگی‌ها گردیده است. مدل‌های ارائه شده در این پژوهش از ضریب همبستگی بالا و بسیار معنی داری برخوردار هستند که می‌توان از آن‌ها در پیشگویی خواص مورد بررسی، استفاده کرد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی، نشان داد که از اختلاط 0/5 g/100g سدیم استئاروئیل لاکتیلات، 0/28 g/100g داتم و 0/5 g/100g پروپیلن گلیکول بهترین حالت در مورد خواص مکانیکی ژل، حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بافت سنجی، خواص مکانیکی، ژل بهبوددهنده، طرح آماری مرکب مرکزی، اکستروژن پسر و.

1 - مقدمه

در صنعت نان، بهینه‌سازی خصوصیات خمیر و بهبود کیفیت و ماندگاری محصول نهایی در اولویت قرار دارد. برای مصرف کننده، خصوصیات حسی محصول، بیش‌ترین اهمیت را دارد. پس از پخت، تازگی نان به سرعت از بین می‌رود و بنابراین، نان بدون تازگی هم قابلیت فروش نخواهد داشت. ضایعات صنعت نان در اثر پدیده‌ی بیاتی، از لحاظ اقتصادی اهمیت بسیار زیادی دارد. بیاتی نان، فرایند پیچیده‌ای است که عوامل مختلفی در پیدایش آن دخالت دارند و در طی آن، پذیرش محصولات نانوایی کاهش می‌یابد. در حالی که مصرف کنندگان، محصولات با کیفیت و ماندگاری بالاتر را ترجیح می‌دهند. بنابر این، در علم غلات برای بهبود خصوصیات خمیر، درک پدیده بیاتی و تاخیر آن در جهت افزایش کیفیت نان، رقابت بزرگی وجود دارد. برای رسیدن به این هدف، باید از افزودنی‌های غذایی کاربردی و مواد کمک فرایند که باعث بهبود کیفیت نان می‌شوند، استفاده کرد (26). امروزه در صنعت نانوایی، تولید بهبود دهنده‌ها ژلی رو به توسعه بوده و با توجه به نوع محصول و خواص مورد انتظار می‌توان بهبود دهنده‌هایی را فرموله نمود (22). لذا در فاز صنعتی تولید، درک خواص این مواد بهبود دهنده به ما کمک خواهد کرد تا به نحو مطلوبی تولید، حمل و نقل و انبارداری اعمال گردد.

سورفاکتانت‌ها یکی از پرکاربردترین افزودنی‌های عملکردی هستند که به منظور بهبود خواص خمیر و کیفیت نان استفاده می‌گردند که موجب استحکام بیشتر خمیر، بهبود سرعت هیدراسیون، مقاومت بیش‌تر به مخلوط کردن، بهبود استحکام مغز، کاهش مقدار شورتینگ مورد نیاز، افزایش حجم مخصوص و افزایش ماندگاری می‌شوند. عزیززی و رائو (2005) ژل‌هایی را با 0/5% گلیسرول مونواستئارات تقطیر شده، داتم، گلیسرول مونواستئارات، سدیم استئاروئیل لاکتیلات، آب و 0/1 و 2% شورتینگ تهیه نمودند. همه‌ی ژل‌ها کیفیت پخت را بسته به نوع امولسیفایر، افزایش دادند. ژل‌های داتم، گلیسرول مونواستئارات تقطیر شده و سدیم استئاروئیل لاکتیلات، حجم مخصوص، کیفیت پخت، پذیرش کلی، رنگ و بافت را به طور معنی داری بهبود بخشیدند (3). همچنین عزیززی و همکاران (2004) ژل‌های امولسیفایرهای گلیسرول مونواستئارات تقطیر شده، داتم، گلیسرول مونواستئارات و سدیم استئاروئیل لاکتیلات را با آب تهیه نمودند. افزودن این ژل‌ها، جذب آب را کاهش داد. ژل‌ها مقاومت خمیر را

افزایش دادند. همچنین، خصوصیات اکستنسوگراف خمیر آرد گندم تا درجات مختلف بهبود یافت و ژل‌های امولسیفایر مورد بررسی، باعث بهبود کیفیت پخت نان شدند (2).

گروه دیگری از مواد افزودنی که به طور گسترده‌ای در صنایع غذایی و به خصوص در صنعت نانوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، پلی‌ال‌ها یا هموکتانت‌ها هستند. پلی‌ال‌ها از طریق هیدروژناسیون کاتالیتیک قندهای مختلف حاصل می‌شوند. پلی‌ال‌ها فعالیت آبی را کاهش داده و احساس دهانی را بهبود می‌بخشند (6, 16). پروپیلن گلیکول یکی از پلی‌ال‌ها است که در گروه‌های قطبی خود پیوندهای هیدروژنی تشکیل می‌دهد و آب قابل انجماد موجود در سیستم را غیر قابل دسترس نموده و بدین ترتیب فعالیت آبی محصول کاهش می‌یابد (7, 29). پورفرزاد و همکاران (2009) تاثیر پلی‌ال‌های گلیسرول، سوربیتول، مالتیتول و پروپیلن گلیکول را بر کیفیت و ماندگاری نان بربری غنی شده با آرد سویا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که در میان پلی‌ال‌های مختلف، پروپیلن گلیکول بیش‌ترین تاثیر را بر بهبود کیفیت و ماندگاری نان بربری غنی شده با آرد سویا داشته است (21).

کارایی امولسیفایر به فاکتورهای مختلفی از قبیل ساختار شیمیایی و آب‌گریزی وابسته است. یکی دیگر از فاکتورهای مهم، حالت فیزیکی امولسیفایرها است. امولسیفایرها به فرم آلفا، بهترین تاثیر را در حفظ حباب‌های هوا و سرعت مخلوط کردن و یکنواختی خمیر دارند (10, 28). زمانی که امولسیفایر با ساختار کریستالی بتا در آب حرارت داده شود، یک فاز لایه‌ای تشکیل می‌شود. این فاز متشکل از لیپیدهای دولایه‌ی نرمی است که توسط آب‌های حل شده بین گروه‌های سر قطبی، جدا شده‌اند. در طی سرد کردن، زنجیره‌های لیپیدی به فرم سخت آرایش پیدا کرده و فاز لایه‌ای به یک آلفا ژل تبدیل می‌شود. آلفا ژل یک قوام نرم و روغنی شکل دارد. لایه‌ی آب در آلفا ژل توانایی لیپیدها در حرکت نسبت به همدیگر را بهبود می‌بخشد. بنابراین، این لایه‌های انعطاف پذیر می‌توانند به آسانی سطح حباب‌ها را پوشش داده و یک فیلم پایدار کننده ایجاد کنند (13). ژل، یک حالت میانی بین فازهای جامد و مایع است که با توجه به ساختار ماکروسکوپی سه بعدی خود، آب را به دام می‌اندازد. تشکیل ژل تابعی از نوع ترکیبات مورد استفاده است. تعیین خواص ژل تشکیل شده به ما کمک می‌کند تا درک درستی از فرایند تشکیل ژل و نیز

بهبوددهنده، شبکه‌ای با حداقل پیچیدگی ایجاد می‌کنند زیرا با توجه به نوع و تعداد اجزا تشکیل دهنده، برهم کنش‌ها نیز کم‌تر و ساده‌تر بوده و لذا از آن‌ها می‌توان به عنوان ابزار مفیدی در پیشگویی برهم کنش‌های ساختاری عملکردی استفاده کرد (4). با انجام این تحقیق، از طریق درک برهم کنش بین اجزا ژل و رفتار رئولوژیکی ژل‌ها به سمت تولید در مقیاس انبوه صنعتی حرکت خواهیم نمود. پایداری (18, 23) و کاربرد (8) ژل‌های بهبوددهنده در تحقیقات مختلفی بررسی گردیده است. همچنین، تغییر فاز در ژل‌ها نیز به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است (9, 27). اما تاکنون مطالعات بسیار کمی در زمینه بررسی خواص مکانیکی ژل‌های بهبوددهنده به عنوان تابعی از اجزای تشکیل دهنده انجام گرفته است که همین امر، لزوم این پژوهش را نشان می‌دهد. در واقع، با توجه به اهمیت اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی ژل‌های بهبوددهنده نان در فاز صنعتی تولید و نیز عدم وجود مطالعات در این زمینه به خصوص در مورد نان‌های ایرانی، خواص مکانیکی ژل بهبود دهنده نان بربری مورد بررسی قرار گرفت. ژل بهبود دهنده‌ی نان بربری، محتوی سدیم استئاروئیل لاکتیلات، داتم و پروپیلن گلیکول بود که تاثیر ترکیب این اجزا بر خواص مکانیکی ژل‌های تولید شده، با استفاده از روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ بررسی گردید.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد

امولسیفایرهای مورد استفاده شامل سدیم استئاروئیل لاکتیلات (SSL) و دی استیل تارتاریک استرهای مونو و دی گلیسرید (DATEM) از شرکت ویستا تجارت پایا (تهران، ایران) تهیه گردید. پلی‌ال مورد استفاده، پروپیلن گلیکول (PG) بود که از شرکت شیمیایی قائم (تهران، ایران) تهیه شد.

2-2- روش‌ها

2-2-1- آماده‌سازی ژل‌های امولسیفایر

ژل‌ها با استفاده از امولسیفایر، آب و پلی‌ال به نسبت‌های 1:4:1 آماده شدند. در ابتدا، مخلوط آماده گردید و سپس تحت شرایط همزدن مداوم، مخلوط تا دمای 60 درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت داده شد. سپس در اثر سرد کردن، ژل‌ها تشکیل شدند.

مشخصات ژل تولید شده با توجه به خواص مکانیکی آن داشته باشیم (12). در واقع، مفاهیم مربوط به مکانیسم‌های تشکیل ژل و خواص رفتاری آن‌ها می‌تواند در تولید مواد غذایی به فرم ژل یا غذاهایی که در آن‌ها از ژل‌ها استفاده می‌شود تاثیر مطلوبی داشته باشد. از این رو، محققان مختلفی به بررسی خواص ژل‌های غذایی پرداخته‌اند (1, 24-25). از طرفی، ژل‌ها ویسکوالاستیک بوده و با توجه به سرعت تنش و کرنش به کار رفته، هم رفتار ویسکوز و هم رفتار الاستیک از خود بروز می‌دهند. به منظور ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک ژل‌ها، توجه به ترکیب، ترمودینامیک و سازگاری ساختاری بین ماکرومولکول‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است (30). رئولوژی متشکل از جریان و تغییر شکل مواد است که به طور خاص رفتار آن‌ها را در فاز بین جامد و سیال به تصویر می‌کشد. آزمون‌های رئولوژیکی دینامیک به خوبی رفتار ویسکوالاستیک ژل‌ها را ارزیابی می‌کند. آزمون‌های کرنشی کوچک¹ مربوط به مواقعی است که تغییر شکل نمونه در حدی است که شکستی در ساختار ایجاد نمی‌شود. در تولید صنعتی ژل‌ها، تنش و کرنش زیاد بوده و با توجه به زمان تغییر خواهند کرد. همین امر، اهمیت کاربرد آزمون‌های تقلیدی مکانیکی را در تعیین خواص رئولوژیکی ژل‌ها نشان می‌دهد (14). آزمون‌های کرنشی بزرگ² مربوط به تغییرات دائمی در ساختار می‌باشند که اغلب اطلاعات حاصل از آن‌ها نسبت به نتایج رئولوژی بنیادی، همبستگی بیش‌تری با ارزیابی حسی دارند (5, 25). بررسی رفتار مکانیکی روشی موثر برای طبقه‌بندی یک نمونه ژل از لحاظ قوی و ضعیف بودن است. در این زمینه، روش‌های غیرخطی³ با استفاده از تغییر شکل‌های بزرگ، متداول هستند (17). نمودارهای تنش - کرنش رفتار بافت را تا مرحله‌ی شکست، نشان می‌دهند و همچنین آزمون‌های دو مرحله‌ای که به عنوان تقلیدی از جویدن هستند، روش خوبی برای بررسی و طبقه‌بندی خواص تلقی می‌گردند. به عنوان مثال، ژل‌های آگار کاملاً شکننده هستند در حالی که ژل‌های آلژینات در حالت طبیعی به صورت چرمی هستند (11).

اغلب محصولات غذایی، محتوی مجموعه‌ای از برهم کنش‌ها هستند که در تشکیل ساختار کلی نقش دارند. ژل‌های پلیمری غذایی در مقایسه با اغلب غذاهای جامد، پیچیدگی کم‌تری داشته و بنابراین، برای بررسی‌های مکانیکی مناسب هستند. ژل‌های

1 - Small-strain testing

2 - Large-strain testing

3 - Non-linear testing

2-2-2- خصوصیات مکانیکی ژل

آزمون‌های نفوذ¹ و اکستروژن پرسو² به ترتیب به منظور مطالعه‌ی رفتار رئولوژیکی نمونه‌های شبه جامد و شبه مایع انجام شد که نمودارهای عمومی آن‌ها در شکل 1-2 نشان داده شده است. هردو آزمایش در دمای اتاق (25 درجه‌ی سانتی‌گراد) و با استفاده از دستگاه بافت سنج³ با سل اعمال نیروی 5 کیلوگرمی اعمال گردید. برای ارزیابی خصوصیات نمونه‌ی شبه جامد، پروب 10 میلی‌متری، نفوذ 50%، سرعت 1/5 میلی‌متر در ثانیه و کاپی با قطر 35 میلی‌متر استفاده گردید. در آزمون نفوذ، نیرو تا نقطه شکست ژل اعمال گردیده و تا عمق تعریف شده ادامه می‌یابد. حداکثر نیرو (نقطه شکست ژل)، به عنوان شاخص سفتی⁴ ژل و شیب (گرادیان⁵) بخش خطی منحنی، به عنوان شاخص جزء الاستیک ژل در نظر گرفته می‌شود. برای ارزیابی خصوصیات ویسکوالاستیک نمونه‌ی شبه مایع، از پروب 35 میلی‌متری استفاده گردید. آزمون‌ها با استفاده از ظرف استاندارد اکستروژن پرسو (قطر 50 میلی‌متر)، نفوذ 30% و سرعت 1 میلی‌متر در ثانیه انجام شد. در این نقطه (اغلب حداکثر نیرو)، پروب به جایگاه اولیه‌ی خود برمی‌گردد. پیک یا حداکثر نیرو برای ارزیابی سفتی⁶ استفاده می‌شود که هر چه این مقدار بیش تر باشد، سفتی نمونه، بیش تر است. سطح زیر منحنی تا این نقطه به عنوان شاخص قوام⁷ در نظر گرفته می‌شود و هر چه بیش تر باشد نمونه، قوام بیش تری دارد. ناحیه‌ی منفی منحنی که در مرحله‌ی برگشت پروب کشیده می‌شود ناشی از وزن نمونه‌ی است که روی سطح بالایی پروب بلند می‌شود و شاخصی از ویسکوزیته⁸ تلقی می‌شود. حداکثر نیروی منفی، نشان دهنده‌ی پیوستگی⁹ نمونه است. بنابراین، هر چه مقدار آن منفی تر باشد، پیوستگی نمونه، بیش تر است (1).

2-2-3- تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی فرآیند تولید ژل

امولسیفایر برای بهبود خصوصیات رئولوژیکی خمیر، کیفیت و ماندگاری نان بربری غنی شده با سویا از طرح مرکب مرکزی

جدول 1- تیمارهای تصادفی آزمایش بر اساس متغیرهای فرمول^a ژل در طرح مرکب مرکزی.

تیمار	SSL (g/100g)	DATEM (g/100g)	PG (g/100g)
1	0/31	0/31	0/31
2	0	0/31	0/31
3	0/13	0/50	0/50
4	0/31	0/31	0/31
5	0/31	0/63	0/31
6	0/50	0/50	0/13
7	0/31	0/31	0/63
8	0/31	0/31	0/31
9	0/31	0/31	0/31
10	0/13	0/50	0/13
11	0/50	0/13	0/50
12	0/31	0	0/31
13	0/50	0/13	0/13
14	0/31	0/31	0/31
15	0/31	0/31	0/31
16	0/63	0/31	0/31
17	0/13	0/13	0/13
18	0/31	0/31	0
19	0/13	0/13	0/50
20	0/50	0/50	0/50

^a سدیم استاروئیل لاکتیلات (SSL)،

دی استیل تارتاریک استرهای مونو و دی گلیسرید (DATEM)،

پروپیلن گلیکول (PG).

چرخش پذیر¹⁰ برای سه جزء ژل شامل سدیم استاروئیل لاکتیلات، داتم و پروپیلن گلیکول با حدود مشخص بالا و پائین استفاده شد. در این طرح، مجموع کل تیمارها با سه متغیر مستقل، پنج سطح و سه تکرار برابر با 60 بود. سطوح متغیرهای مستقل و کدهای مربوطه در جدول 1 و تیمارهای آزمایش در جدول 2 ذکر شده اند.

- 1 - Penetration
- 2 - Back extrusion
- 3 - QTS Texture Analyser, CNS Farnell, Hertfordshire, UK.
- 4 - Hardness
- 5 - Gradient
- 6 - Firmness
- 7 - Consistency
- 8 - Viscosity
- 9 - Cohesiveness

¹⁰ - Central composite rotatable design (CCRD)

آن نداشته‌اند. بررسی تغییرات سفتی ژل نشان می‌دهد که معادله‌ی حاصل از R^2 (adj) و R^2 متناسب، بالا و بسیار معنی‌داری ($p \leq 0/001$) برای پیشگویی آن برخوردار است. آزمون ضعیف برازش آن بی معنی ($p \leq 0/05$) و ضریب تغییرات آن نیز پائین می‌باشد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن مدل ارائه شده است. بررسی جدول آنالیز واریانس نشان می‌دهد که اجزای ژل به صورت معادله‌ی درجه‌ی اول و درجه‌ی دوم ($p \leq 0/001$) بر سفتی موثر هستند و با توجه به جدول 2-3، مشخص می‌شود که تنها سدیم استئاروئیل لاکتیلات بر سفتی تاثیر دارد. والسترا (2003) بیان کرد که افزایش سفتی، پدیده‌ی ای است که به واسطه‌ی حضور پلیمرهای قوی اتفاق می‌افتد زیرا در یکدیگر درگیر شده و در حین کشش به تغییر شکل مقاومت می‌کنند (31). مکانیسم سفتی در ژل‌های مختلف متفاوت است مثلاً در ژل‌های آژینات در کرنش‌های بالاتر، مولکول‌ها با یکدیگر پیوندهای عرضی برقرار کرده و در نتیجه، شاهد افزایش سفتی خواهیم بود (19).

گرادیان ژل، رفتار الاستیک آن را نشان می‌دهد. افزودن سدیم استئاروئیل لاکتیلات موجب افزایش معنی‌دار ($p \leq 0/001$) گرادیان تیمارها و در نتیجه، الاستیسیته آن‌ها شده است. بررسی تغییرات گرادیان ژل، نشان می‌دهد که معادله‌ی حاصل از R^2 و R^2 (adj) متناسب، بالا و بسیار معنی‌داری ($p \leq 0/001$) برای پیشگویی آن برخوردار است. آزمون ضعیف برازش آن بی معنی ($p \leq 0/05$) و ضریب تغییرات آن نیز پائین می‌باشد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن مدل ارائه شده است. اجزای ژل به صورت معادله‌ی درجه‌ی اول و درجه‌ی دوم ($p \leq 0/001$) بر گرادیان موثر هستند و با توجه به جدول 2-3، مشخص می‌شود که تنها سدیم استئاروئیل لاکتیلات بر گرادیان تاثیر دارد و داتم و پروپیلن گلیکول تاثیر معنی‌داری بر آن ندارند. بنابراین، تنها از طریق تغییر میزان سدیم استئاروئیل لاکتیلات می‌توان ژلی الاستیک تولید کرد.

3-2- خصوصیات مکانیکی ژل در آزمون اکستروژن پسر
در جدول 3، آنالیز واریانس خصوصیات مکانیکی ژل در این آزمون مشاهده می‌گردد. جدول 4 نیز معادلات مناسب برای پیشگویی این خصوصیات را نشان می‌دهد. روند تغییر پارامترهای مکانیکی ژل در آزمون اکستروژن پسر با توجه به اجزای فرمول و به صورت نمودار رویه‌ی پاسخ در شکل‌های 3 و 4 نمایان است. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن سدیم استئاروئیل لاکتیلات موجب افزایش معنی‌دار ($p \leq 0/001$) سفتی

برای طراحی آزمایش، آنالیز نتایج و بهینه‌سازی از نرم افزار دیزاین اکسپرت¹ (نسخه 6) استفاده شد. بدین منظور، معادلات ریاضی درجه‌ی دوم کامل با استفاده از آنالیز رگرسیون گام به گام پس رونده² بر روی متغیرهای وابسته برازش شدند. برای نشان دادن رابطه‌ی هر یک از متغیرهای وابسته در مدل رگرسیون با متغیرهای مستقل، نمودار سطوح³ آن‌ها به وسیله این نرم افزار، ترسیم شدند. به منظور ارزیابی صحت مدل‌های برازش داده شده، آزمون ضعیف برازش⁴، ضریب تغییرات⁵، مقادیر R^2 ⁶، R^2 (adj)⁷ مدل و P ⁸ ضرایب تعیین شدند.

3- نتایج و بحث

هر چند ارزیابی ویسکوالاستیسیته باید بر اساس تغییر شکل‌های کوچک انجام گردد تا ویسکوالاستیسیته خطی لحاظ گردد اما برای نشان دادن خواص بافتی در سیستم‌های حمل و نقل صنعتی که تحت تغییرات تنش - کرنش است تغییر شکل‌های بزرگ نیز باید مد نظر قرار گیرند. تغییر شکل‌های بزرگ در آزمون‌های مکانیکی، تغییرات ساختاری را همانند تفکیک غذا در دهان یا حین فرایند شبیه‌سازی می‌کند. در آزمون نفوذ و اکستروژن پسر، اطلاعات خوبی در خصوص پارامترهای بافتی از قبیل نرمی، سفتی، پیوستگی و شاخص ویسکوزیته به ما می‌دهد (1).

3-1- خصوصیات مکانیکی ژل در آزمون نفوذ

در جدول 3، آنالیز واریانس خصوصیات مکانیکی ژل در این آزمون ملاحظه می‌گردد. جدول 2-3 نیز معادلات مناسب برای پیشگویی این خصوصیات را نشان می‌دهد. روند تغییر پارامترهای مکانیکی ژل در آزمون نفوذ با توجه به اجزای فرمول و به صورت نمودار رویه‌ی پاسخ در شکل 1 نمایان است. نیروی حداکثر شاخص سفتی نمونه‌های ژل تلقی می‌شود. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن سدیم استئاروئیل لاکتیلات موجب افزایش معنی‌دار ($p \leq 0/001$) سفتی تیمارها شده است و داتم و پروپیلن گلیکول تاثیر معنی‌داری بر

1 - Design-Expert (Version 6)

2 - Backward multiple stepwise regression

3 - Surface Plot

4 - Lack of fit

5 - Coefficient of Variation (CV)

6 - R square

7 - R square (adj)

8 - P Value

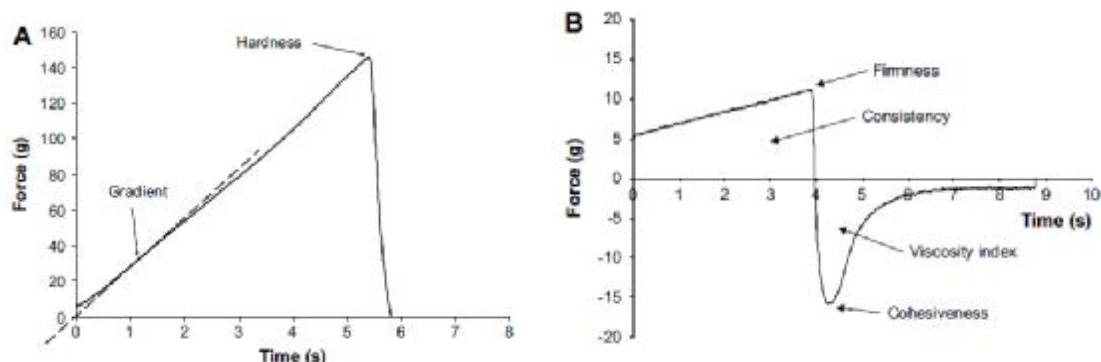
می‌دهد که اجزای ژل به صورت معادله‌ی درجه‌ی اول و درجه‌ی دوم ($p \leq 0/001$) بر قوام موثر هستند و با توجه به جدول 3-4، مشخص می‌شود که تنها سدیم استئاروئیل لاکتیلات بر قوام تاثیر دارد. یک ماده با قوام بسیار پائین معمولاً نامطلوب بوده و به نظر می‌رسد که بسیار نرم یا خیس باشد (25). از طرفی، ماده‌ای با قوام متوسط برای مصرف کننده مطلوب بوده و مشکلات حمل و نقل و انبارداری که در مورد بهبوددهنده‌های مایع و ژلی وجود دارد را مرتفع می‌کند.

از سوی دیگر، افزودن سدیم استئاروئیل لاکتیلات و پروپیلن گلیکول موجب افزایش معنی دار ($p \leq 0/001$) شاخص ویسکوزیته تیمارها شده است در حالی که داتم تاثیر معنی داری بر آن نداشته است. بررسی تغییرات شاخص ویسکوزیته ژل، نشان می‌دهد که معادله‌ی حاصل از R^2 و R^2 (adj) متناسب، بالا و بسیار معنی داری ($p \leq 0/001$) برای پیشگویی آن برخوردار است. آزمون ضعف برازش آن بی معنی ($p \leq 0/05$) و ضریب تغییرات آن نیز پائین می‌باشد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن مدل ارائه شده است. بررسی جدول آنالیز واریانس نشان می‌دهد که اجزای ژل به صورت معادله‌ی درجه‌ی اول و درجه‌ی دوم ($p \leq 0/001$) بر شاخص ویسکوزیته موثر هستند و با توجه به ضریب هر جزء در جدول 3-4، مشخص می‌شود که سدیم استئاروئیل لاکتیلات بیش ترین تاثیر را دارد. بر هم کنش و در نتیجه، سطح تماس بین سدیم استئاروئیل لاکتیلات و پروپیلن گلیکول احتمالاً به نحوی است که از جریان یافتن ژل جلوگیری کرده و در نتیجه ویسکوزیته را افزایش می‌دهد. خاصیت امولسیفایری سدیم استئاروئیل لاکتیلات در تثبیت آب ژل و نیز خاصیت کاهش فشار اسمزی توسط پروپیلن گلیکول در افزایش این شاخص تاثیر بسزایی دارند (21). از آن جا که ویسکوزیته در نقل و انتقالات محصول در حین تولید ژل و نیز در کارخانه‌های غلات اهمیت زیادی داشته و نیروی لازم را تحت تاثیر قرار می‌دهد باید در فرموله کردن ژل‌ها، با حفظ کیفیت مورد نظر در محصول این فاکتور را در حد متوسط نگه داشت.

تیمارها شده است و داتم و پروپیلن گلیکول تاثیر معنی داری بر آن نداشته اند. بررسی تغییرات سفتی ژل نشان می‌دهد که معادله‌ی حاصل از R^2 و R^2 (adj) متناسب، بالا و بسیار معنی داری ($p \leq 0/001$) برای پیشگویی آن برخوردار است. آزمون ضعف برازش آن بی معنی ($p \leq 0/05$) و ضریب تغییرات آن نیز پائین می‌باشد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن مدل ارائه شده است. بررسی جدول آنالیز واریانس، نشان می‌دهد که اجزای ژل به صورت معادله‌ی درجه‌ی اول و درجه‌ی دوم ($p \leq 0/001$) بر سفتی موثر هستند و با توجه به جدول 4، مشخص می‌شود که تنها سدیم استئاروئیل لاکتیلات بر سفتی تاثیر دارد.

پیوستگی، شاخصی از پیوندهای داخلی یک نمونه‌ی نیمه جامد است. افزودن سدیم استئاروئیل لاکتیلات موجب افزایش معنی دار ($p \leq 0/001$) پیوستگی تیمارها شده است. بررسی تغییرات پیوستگی ژل، نشان می‌دهد که معادله‌ی حاصل از R^2 و R^2 (adj) متناسب، بالا و بسیار معنی داری ($p \leq 0/001$) برای پیشگویی آن برخوردار است. آزمون ضعف برازش آن بی معنی ($p \leq 0/05$) و ضریب تغییرات آن نیز پائین می‌باشد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن مدل ارائه شده است. اجزای ژل به صورت معادله‌ی درجه‌ی اول و درجه‌ی دوم ($p \leq 0/001$) بر پیوستگی موثر هستند و با توجه به جدول 3-4، مشخص می‌شود که تنها سدیم استئاروئیل لاکتیلات بر پیوستگی تاثیر دارد و داتم و پروپیلن گلیکول تاثیر معنی داری بر آن ندارند. مقادیر بالای پیوستگی بدین معنی است که ژل‌های مورد بررسی، بیش تر الاستیک هستند تا پلاستیک. بنابراین، باید انرژی بیش تری به آن وارد شود تا ساختار آن شکسته شود (25). در مورد محصولات نانویی نیز باید این خصوصیت مد نظر قرار گیرد که به ژل‌های با مقادیر بالاتر از سدیم استئاروئیل لاکتیلات در حین مخلوط کردن خمیر باید انرژی و زمان بیش تری وارد گردد.

همچنین، افزودن سدیم استئاروئیل لاکتیلات موجب افزایش معنی دار ($p \leq 0/001$) قوام تیمارها شده است و داتم و پروپیلن گلیکول تاثیر معنی داری بر آن نداشته اند. بررسی تغییرات قوام ژل، نشان می‌دهد که معادله‌ی حاصل از R^2 و R^2 (adj) متناسب، بالا و بسیار معنی داری ($p \leq 0/001$) برای پیشگویی آن برخوردار است. آزمون ضعف برازش آن بی معنی ($p \leq 0/05$) و ضریب تغییرات آن نیز پائین می‌باشد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن مدل ارائه شده است. بررسی جدول آنالیز واریانس، نشان



شکل 1- نمودارهای عمومی خصوصیات مکانیکی ژل؛ نفوذ (چپ) و اکستروژن پسرو (راست).

جدول 2- سطوح متغیرهای مستقل و کدهای مربوطه.

کد و سطح مربوطه					نماد ریاضی	متغیر مستقل
-1/6818	-1	0	+1	+1/6818		
0	0/13	0/31	0/50	0/63	SSL	سدیم استاروئیل لاکتیلات (g/100g)
0	0/13	0/31	0/50	0/63	DATEM	داتم (g/100g)
0	0/13	0/31	0/50	0/63	PG	پروپیلن گلیکول (g/100g)

جدول 3- آنالیز واریانس خصوصیات مکانیکی ژل در آزمون اکستروژن پسرو.

منبع	درجه‌ی آزادی	سفتی (نیوتن)		پیوستگی (نیوتن)		قوام (نیوتن ثانیه)		شاخص ویسکوزیته (نیوتن ثانیه)	
		احتمال F	مجموع مربعات	احتمال F	مجموع مربعات	احتمال F	مجموع مربعات	احتمال F	مجموع مربعات
میانگین	1		19/67		17/76		84/64		47/26
خطی	3	0/0001<	5/32	0/0001<	4/74	0/0001<	22/78	0/0001<	12/84
بر هم کنش	3	0/9823	0/02	0/9945	0	0/9746	0/09	0/12	0/8883
درجه‌ی دوم	3	0/0001<	1/12	0/0001<	0/79	0/0001<	4/97	2/26	0/0001<
درجه‌ی سه	5	0/3993	0/06	0/8296	0/02	0/4372	0/23	0/06	0/7564
خطای باقیمانده	5		0/05		0/04		0/20		0/11
کل	20		26/24		23/36		110/90		62/64

جدول 4- مدل‌های پیشگو برای خصوصیات مکانیکی ژل در آزمون اکستروژن پسر^a.

خصوصیات ژل	مدل پیشگو ^b										R ²	R ² (Adj)	احتمال F ضعف برازش	ضریب پراکندگی
	مدل	S	D	P	S ²	D ²	P ²	SD	SP	DP				
= سفتی	0/05**	5/91**	ns	ns	-5/65**	ns	ns	ns	ns	ns	0/9808	0/9786	0/7273	8/68
= پیوستگی	0/08**	5/21**	ns	ns	-4/7**	ns	ns	ns	ns	ns	0/9850	0/9832	0/9193	7/46
= قوام	0/08**	12/34**	ns	ns	-11/88**	ns	ns	ns	ns	ns	0/9816	0/9794	0/7245	8/61
= شاخص ویسکوزیته	-0/03**	8/66**	ns	0/58	-7/94**	ns	ns	ns	ns	ns	0/9790	0/9751	0/5969	9/24

^a سدیم استئاروئیل لاکتیلات (S)، دی استیل تارتاریک استرهای مونو و دی گلیسرید (D) و پروپیلن گلیکول (P).
^b بدون ستاره (p ≤ 0/05)، یک ستاره (p ≤ 0/01)، دو ستاره (p ≤ 0/001)، ns در سطح 95 درصد معنی دار نمی باشد.

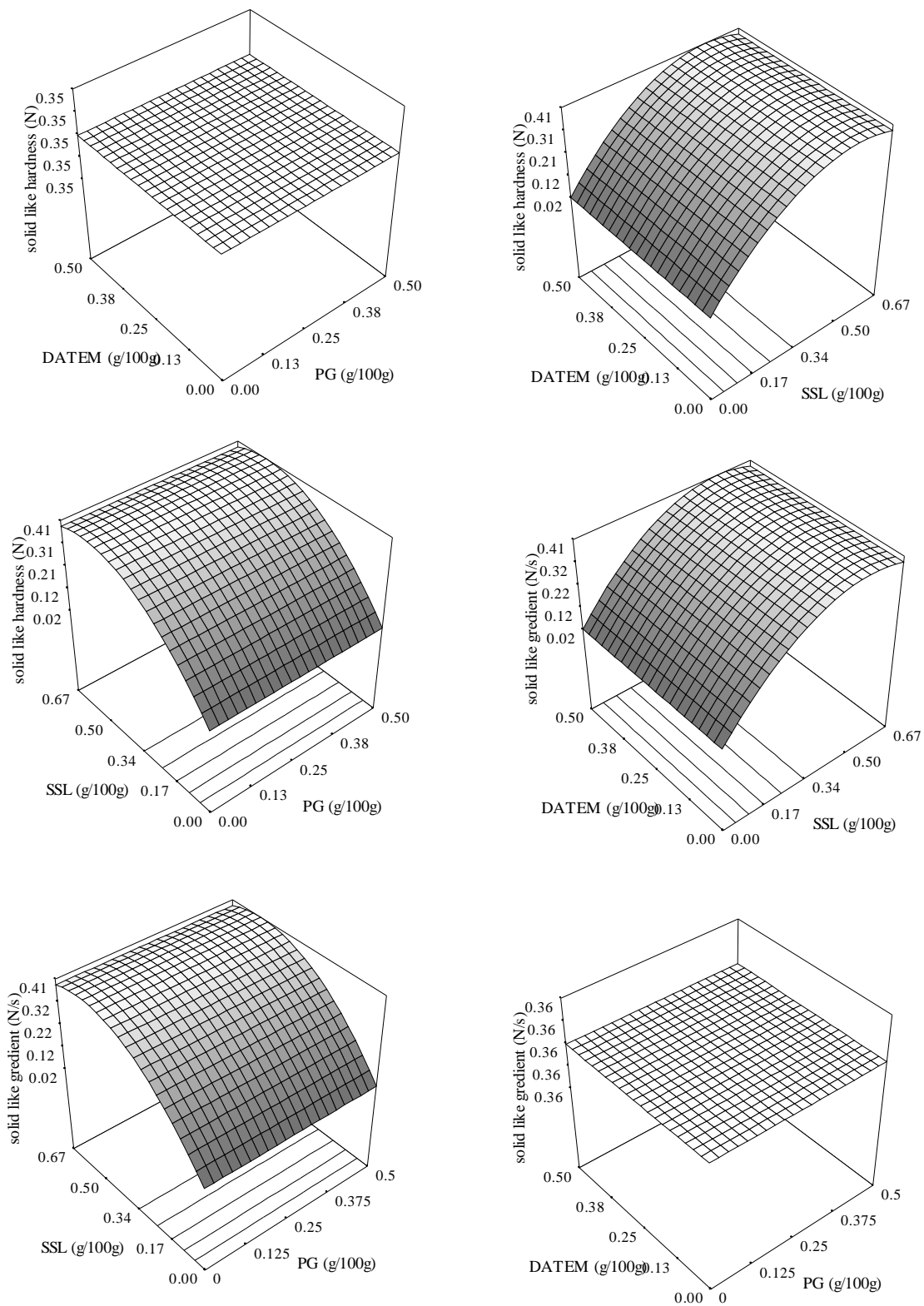
جدول 5- آنالیز واریانس خصوصیات مکانیکی ژل در آزمون نفوذ.

منبع	درجه آزادی	سفتی (نیوتن)		گرادیان (نیوتن بر ثانیه)	
		مجموع مربعات	احتمال F	مجموع مربعات	احتمال F
میانگین	1	1/28		1/34	
خطی	3	0/33	0/0001<	0/35	0/0001<
بر هم کنش	3	0	0/9881	0	0/9535
درجه‌ی دوم	3	0/06	0/0001<	0/07	0/0001<
درجه‌ی سه	5	0	0/0976	0/01	0/0873
خطای باقیمانده	5	0		0	
کل	20	1/69		1/76	

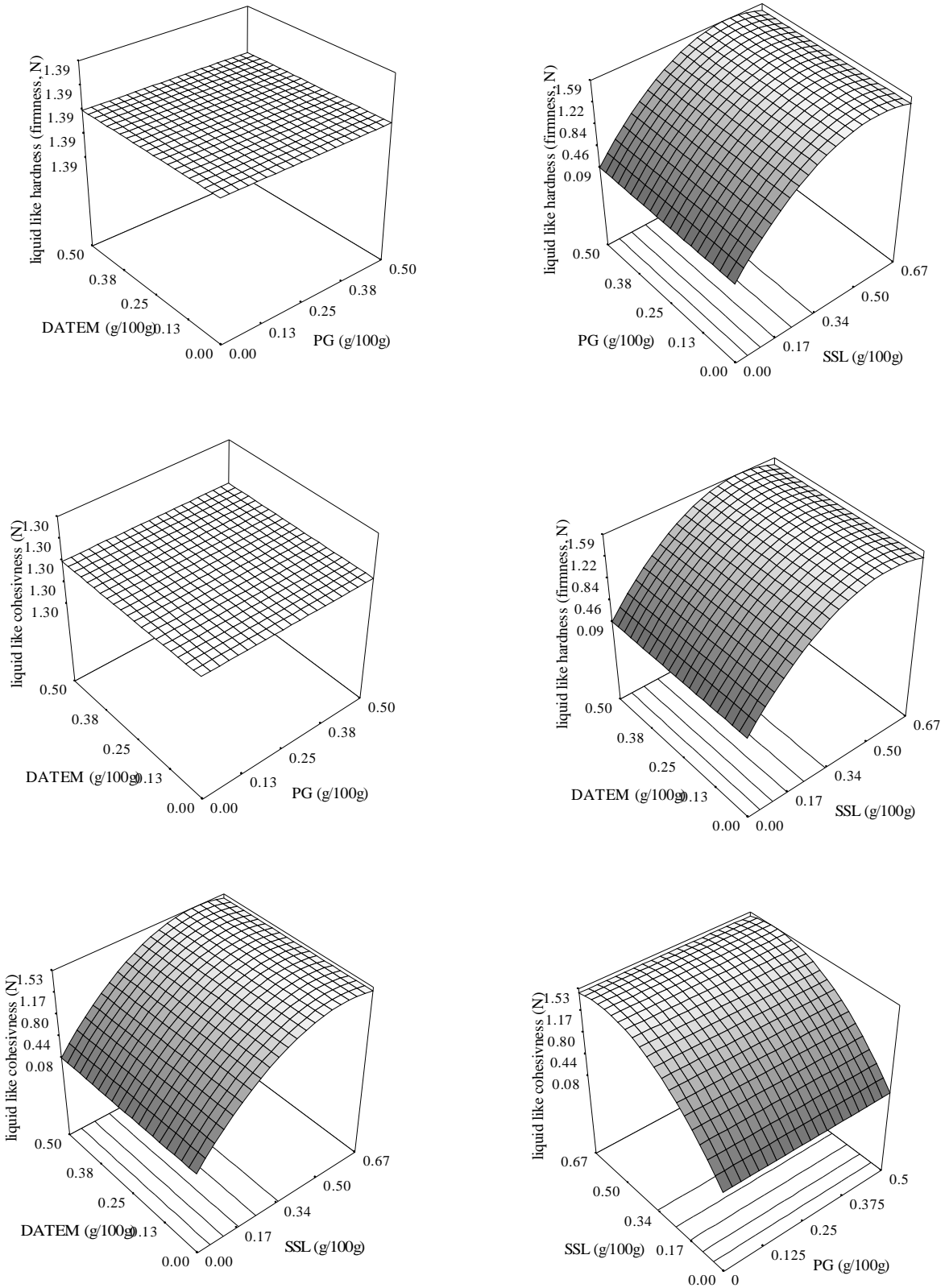
جدول 6- مدل‌های پیشگو برای خصوصیات مکانیکی ژل در آزمون نفوذ^a.

خصوصیات ژل	مدل پیشگو ^b										R ²	R ² (Adj)	احتمال F ضعف برازش	ضریب پراکندگی
	مدل	S	D	P	S ²	D ²	P ²	SD	SP	DP				
= سفتی	0/02**	1/43**	ns	ns	-1/33**	ns	ns	ns	ns	ns	0/9788	0/9763	0/1269	8/84
= گرادیان	0/02**	1/47**	ns	ns	-1/37**	ns	ns	ns	ns	ns	0/9774	0/9747	0/1903	9/19

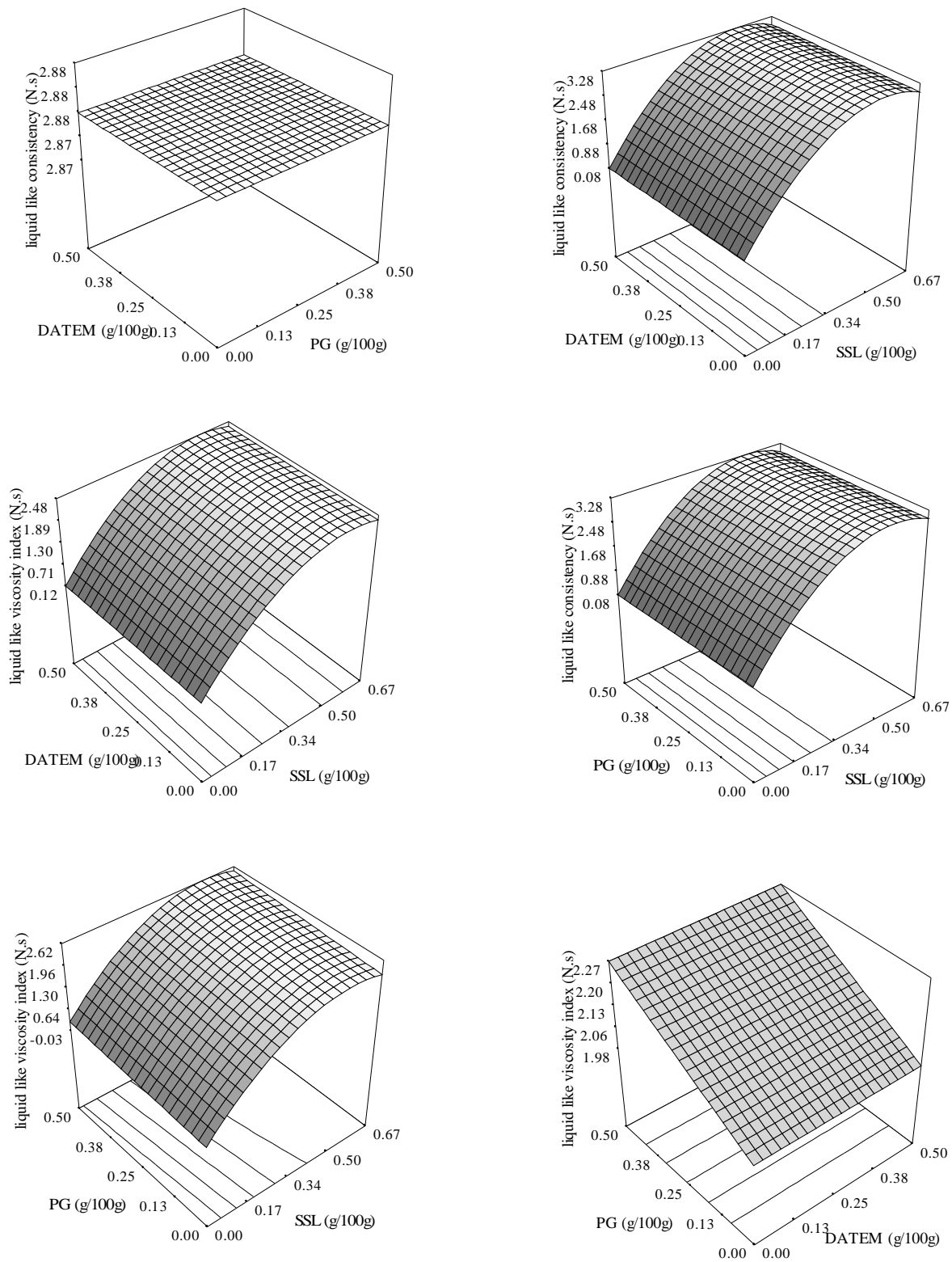
^a سدیم استئاروئیل لاکتیلات (S)، دی استیل تارتاریک استرهای مونو و دی گلیسرید (D) و پروپیلن گلیکول (P).
^b بدون ستاره (p ≤ 0/05)، یک ستاره (p ≤ 0/01)، دو ستاره (p ≤ 0/001)، ns در سطح 95 درصد معنی دار نمی باشد.



شکل 2- نمودار رویه‌ی پاسخ سفتی و گرادیان ژل در آزمون نفوذ



شکل 3- نمودار رویه‌ی پاسخ سفتی و پیوستگی ژل در آزمون اکستروژن پسر



شکل 4- نمودار رویه‌ی پاسخ قوام و شاخص ویسکوزیته‌ی ژل در آزمون اکستروژن پسر

به منظور بهینه سازی فرمولاسیون و فرآیند تولید ژل بهبود دهنده برای خصوصیات رئولوژیکی خمیر، کیفیت و ماندگاری نان بربری، ابتدا تاثیر این اجزا بر خواص مورد نظر، بررسی گردیدند. جذب آب آرد، خصوصیات خمیر شامل زمان گسترش، شاخص تحمل، سفتی، قابلیت جویدن و صمغیت و سفتی نان در روزهای اول تا هفتم با افزایش سدیم استئاروئیل لاکتیلات، داتم و پروپیلن گلیکول کاهش یافتند. سپس حد بالا، پائین و مطلوب هر یک از صفات و وزن و اهمیت آن‌ها تعیین شد. نتایج، نشان داد که از اختلاط 0/5 g/100g سدیم استئاروئیل لاکتیلات، 0/28 g/100g داتم و 0/5 g/100g پروپیلن گلیکول بهترین حالت حاصل می‌شود. در این شرایط، مقدار گرادیان ژل، 0/41 نیوتن بر ثانیه؛ سفتی ژل در آزمون نفوذ، 0/40 نیوتن؛ سفتی ژل در آزمون اکستروژن پسر، 1/59 نیوتن؛ پیوستگی ژل، 1/51 نیوتن؛ قوام ژل، 3/27 نیوتن ثانیه؛ شاخص ویسکوزیته‌ی ژل، 2/61 نیوتن ثانیه خواهد بود.

5- منابع

- 1- Angioloni, A. and Collar, C. 2009. Small and large deformation viscoelastic behaviour of selected fibre blends with gelling properties. *Food Hydrocolloids*, 23: pp. 742-748.
- 2- Azizi, M.H. and Rao, G.V. 2004. Influence of selected surfactant gels and gums on dough rheological characteristics and quality of bread. *Journal of Food Quality*, 27: pp. 320-336.
- 3- Azizi, M.H. and Rao, G.V. 2005. Effect of storage of surfactant gels on bread making quality of wheat flour. *Food Chemistry*, 89: pp. 133-138.
- 4- Barrangou, L.M., Drake, M.A., Daubert, C.R. and Foegeding, E.A. 2006. Textural properties of agarose gels. II. Relationships between rheological properties and sensory texture. *Food Hydrocolloids*, 20(2-3): pp. 196-203.
- 5- Bollarín, C., Angioloni, A. and Collar, C. 2005. Bread staling assessment of enzyme supplemented pan breads by dynamic and static deformation measurements. *European Food Research and Technology*, 220: pp. 83-89.

علت رفتارهای مشاهده شده را از طریق بررسی مکانیسم تشکیل ژل می‌توان بررسی نمود. افزودنی‌های مورد استفاده در ساختار ژل به عنوان پرکن عمل کرده و نقش عملکردی خود را از طریق موارد زیر ایفا می‌کنند: 1- تاثیر بر تشکیل ژل پیوسته در مرحله‌ی حرارت دهی 2- تغییر ویسکوزیته، تحرک پذیری و سایر خواص فاز آبی 3- تاثیر بر بافت و ظاهر ژل از طریق اندازه‌ی ذرات، توزیع پذیری، خواص رئولوژیکی و جزء حجمی (15) مکانیسم دیگری که برای این پدیده‌ها متصور می‌گردد بدین صورت است که یک ژل متشکل از یک شبکه پلیمری از اجزا فعال و غیرفعال تشکیل شده است. زمانی که ماده‌ی غیرفعال را به سیستم محلول حاوی جزء فعال اضافه می‌کنیم حلالیت جزء فعال کاهش یافته و برهم کنش‌های داخل و خارج مولکولی بین اجزاء فعال، تشدید می‌گردد. بنابراین، جزء غیر فعال می‌تواند بدون پیوند مستقیم با جزء فعال جهت گیری آن‌ها را تغییر دهد. حالت دیگری که مطرح می‌باشد مربوط به مواقعی است که ژل از اجزای فعال تشکیل شده و برهم کنش بین هر جزء و نیز با سایر اجزاء، بر تشکیل ژل نقش مستقیمی دارد. تشکیل شبکه در این حالت متاثر از جدا شدن فازها در مرحله‌ی قبل از تشکیل ژل است و بنابراین، حساسیت زیادی به شرایط فرایند دارد (20).

4- نتیجه گیری

آنالیز رویه‌ی پاسخ، مربوط به طرح مرکب مرکزی چرخش پذیر با سه متغیر مستقل شامل سدیم استئاروئیل لاکتیلات، داتم و پروپیلن گلیکول به عنوان اجزای ژل امولسیفایر، پاسخ‌های مربوط به خصوصیات مکانیکی ژل به منظور بهینه سازی خصوصیات مذکور به انجام رسید. نتایج به دست آمده، حاکی از آن بودند که متدولوژی رویه‌ی پاسخ را می‌توان به خوبی در بهینه سازی این خصوصیات به کار برد.

مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش از R^2 و R^2 (adj) متناسب، بالا و معنی داری برخوردار هستند. همچنین آزمون ضعف برازش آن‌ها بی معنی و ضریب تغییرات آن‌ها نیز پائین می‌باشد که نشان دهنده‌ی کارایی مدل‌های ارائه شده در پیش بینی پارامترهای مورد ارزیابی است. با استفاده از این مدل‌ها از سویی می‌توان با توجه به هدف و کاربرد ژل، ترکیبات آن را فرموله و تنظیم نمود و از طرفی می‌توان با توجه به ترکیب اجزای ژل تولید شده، خصوصیات مورد نظر را پیش بینی و اصلاح نمود.

- Technologie-Food Science and Technology*, 33: pp. 138- 143.
- 17- MANCINI, M., MORESI, M. and RANCINI, R. 1999. Uniaxial compression and stress relaxation tests on alginate gels. *Journal of texture studies*, 30(6): pp. 639-657.
- 18- Martino, A. and Kaler, E.W. 1995. The stability of lamellar phases in water, propylene glycol, and surfactant mixtures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 99(2-3) : (pp. 91-99).
- 19- Mitchell, J. and Blanshard, J. 1976. Rheological properties of alginate gels. *Journal of texture studies*, 7(2): pp. 219-234.
- 20- MORRIS, V.J., 1985, *Multicomponent gels, in Gums and Stabilizers for the Food Industry* (editors: G.O. Phillips, D.J. Wedlock, and P.A. Williams). Elsevier Applied Science: London, U.K. pp. 87-99.
- 21- Pourfarzad, A., Khodaparast, M.H.H., Karimi, M., Mortazavi, S.A., Davoodi, M.G., Sourki, A.H. and Jahromi, S.H.R. 2009. Effect of polyols on shelf life and quality of flat bread fortified with soy flour. *Journal of Food Process Engineering*.
- 22- Prabhasankar, P., Rajiv, J., Indrani, D. and Rao, G.V., *Emulsifier composition for cakes and a method of making improved quality cakes thereof*. 2003, US Patent App. 2.191,387.0,040.
- 23- Richardson, G., Bergenståhl, B., Langton, M., Stading, M. and Hermansson, A. 2004. The function of (alpha)-crystalline emulsifiers on expanding foam surfaces. *Food Hydrocolloids*, 18(4): pp. 655-663.
- 24- Roopa, B. and Bhattacharya, S .2010 . Texturized alginate gels: Screening experiments to identify the important variables on gel formation and their properties. *LWT-Food Science and Technology*, 43(9): pp. 1403-1408.
- 25- Roopa, B.S. and Bhattacharya, S. 2008. Alginate gels: I. Characterization of textural attributes. *Journal of Food Engineering*, 85: pp. 123-131.
- 26- Rosell, C.M., Rojas, J.A. and Benedito, C. 2001. Combined effect of different anti staling agents on the pasting properties of
- 6- Gliemmo, M.F., Campos, C.A. and Gerschenson, L.N. 2006. Effect of several humectants and potassium sorbate on the growth of *Zygosaccharomyces bailii* in model aqueous systems resembling low sugar products. *Journal of Food Engineering*, 77(4): pp. 761-770.
- 7- Hallberg, L. and Chinachoti, P. 1992. Dynamic Mechanical Analysis for Glass Transitions in Long Shelf Life Bread. *Journal of Food Science*, 57(5): pp. 1201-1229.
- 8- Heertje, I., Hendrickx, H.A.C., Knoops, A.J., Royers, E.C., Turksma, H. and Wesdorp, L.H., *Use of mesomorphic phases in food products*. 2002, Google Patents.
- 9- Heertje, I., Roijers, E. and Hendrickx, H. 1998. Liquid Crystalline Phases in the Structuring of Food Products* 1. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 31(4): pp. 387-396.
- 10- Howard, N.B. 1972. The role of some essential ingredients in the formation of layer cake structures. *Baker's Dig*, 46(5): pp. 28-37.
- 11- HSIEH, Y.I.N.L. and REGENSTEIN, J.O.E.M. 1992. Elastic attributes of heated egg protein gels. *Journal of Food Science*, 57(4): pp. 862-868.
- 12- JENA, R. and BHATTACHARYA, S. 200 .3 Viscoelastic characterization of rice gel. *Journal of texture studies*, 34(4): pp. 349-360.
- 13- Krog, N.J. and Sparsø, F.V., 2004, *Food Emulsifiers: Their Chemical and Physical Properties, in Food Emulsions*, (editors: S.E. Friberg and K. Larsson). Marcel Dekker: New York. pp. 45-91.
- 14- Lazariduo, A., Biliaderis, C.G. and Idzydorzyc, M.S. 2003. Molecular size effects on rheological properties of oat b-glucans in solution and gels. *Food Hydrocolloids*, 17: pp. 693-712.
- 15- LEE, C.M., WU, M.-G. and OKADA, M., 1992, *Ingredients and formation for surimi-based products, in Surimi Technology*, (editors: T.C. Lanier and C.M. Lee). Marcel Dekker: New York. pp. 273-302.
- 16- Lombard, G.E., Weinert, I.A.G., Minnaar, A. and Taylor, J.R.N. 2000. Preservation of South African steamed bread using Hurdle technology. *Lebensmittel-Wissenschaft und-*

wheat flour. *Eur Foods Res technol*, 212 :
pp. 473-476.

- 27- Sein, A., Verheij, J.A. and Agterof, W.G.M. 2002. Rheological Characterization, Crystallization, and Gelation Behavior of Monoglyceride Gels. *Journal of Colloid and Interface Science*, 249(2): pp. 412-422.
- 28- Silva, R.F. 2000. Uses of alpha-crystalline emulsifiers in the sweet goods industry. *Cereal Foods World*, 45: pp. 405-411.
- 29- Suhendro, E., Waniska, R., Rooney, L. and Gomez, M. 1995. Effects of polyols on the processing and qualities of wheat tortillas. *Cereal Chemistry*, 72(1):(pp. 122-127.
- 30- Tabilo-Munizaga, G. and Barbosa-Ca'novas, G.V. 2005. Rheology in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67: pp. 147-156.
- 31- Walstra, P. 2002. *Physical chemistry of foods*. CRC Press.