

تعامل بین ترکیبات اصلی آرد در رفتار رئولوژیکی خمیر آرد گندم

چکیده

هنوز بحث قابل توجهی در مقالات در مورد نقش های مربوط به نشاسته و گلوتن در هر دو حالت رئولوژی خطی و غیرخطی خمیر آرد گندم وجود دارد. از این رو، برای روشن تر کردن نقش های انفرادی گلوتن و نشاسته در رفتار کلی خمیر، خواص رئولوژیکی خمیر و ترکیبات گلوتن نشاسته با نسبت های مختلف به طور سیستماتیکی در حالت برش و گسترش، با استفاده از جعبه کمک ابزار رئولوژیکی مناسب متشکل از دامنه کوچک خطی آزمون برش نوسانی و آزمون غیر خطی مانند خزش بازیابی در فرمت برشی و تک محوره مورد بررسی قرار گرفت. نشاسته یک نقش محوری در رئولوژی خطی خمیر بازی می کند. با افزایش مقدار نشاسته، محدوده ی خطی مشاهده شده در آزمون برش نوسانی به عنوان یک تابع قانون قدرت کاهش می یابد. همچنین نشاسته آشکارا بر ویسکوزیته کششی در محدوده های کوچک تاثیر می گذارد. به تبع آن، در منطقه خطی تفاوت های بین سیستم های مختلف گلوتن با حضور نشاسته ممکن است ناپدید شود. چنانچه شاخص های کیفیت تهیه نان ذاتا با شبکه گلوتن مرتبط شناخته شده است، بررسی رفتار غیر خطی خمیر به منظور افشای تفاوت در کیفیت آرد ضروری به نظر می رسد. تفاوت های کیفی بین انواع آرد قوی و ضعیف به وضوح در ارزش شاخص سختی تنش در آزمون تک محوره و انطباق بهبود کل در آزمون خزش بازیابی غیر خطی نشان داده شد. با وجود کاربردهای قبلی موفقیت آمیز در ژل گلوتن خالص، دقت مدل ژل بحرانی در پیش بینی خواص رئولوژیکی خطی خمیر، به علت داشتن محدوده ی خطی کوچک و نیاز به طولانی ترین زمان استراحت برای خمیر محدود بود.

کلمات کلیدی: رئولوژی خمیر، ترکیبات گلوتن نشاسته، خواص سختی کششی، خزش بازیابی، مدل ژل بحرانی، مدل

برگری

بحث و نتایج

ترکیبات گلوتن نشاسته در رفتار کلی خمیر

در رژیم خطی

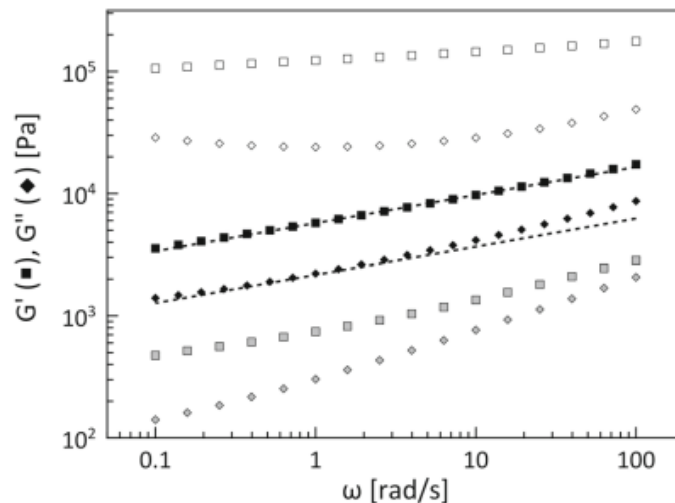
محدوده ی فرکانس خمیر بیلاکس، گلوتن و نشاسته در شکل 2 نشان داده شده است. برای هر سه ماده، در محدوده فرکانس تحت بررسی ضریب ذخیره سازی $G'(\omega)$ بالاتر از ضریب اتلاف $G''(\omega)$ است، که این ویژگی یکی از مشخصه های مواد با ساختار بالاست (لتانگ و همکاران 1999). مقدار $G'(\omega)$ تقریباً در فرکانس مستقل نمونه نشاسته است، که نشان می دهد که نشاسته به عنوان یک شبه بسته بندی منسجم و یا کاغذ خودنمایی تعلیق رفتار می نماید. برعکس منحنی $G'(\omega)$ برای خمیر و گلوتن یک شیب کوچک و مثبتی نشان می دهد. لازم به ذکر است که، به دلیل تفاوت در مقدار آب، مقایسه مقادیر مطلق $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ در سیستم های مختلف دشوار است، در حالیکه شیب $G'(\omega)$ نسبت به ω در برابر تغییرات کوچک در مقدار آب بیتاثر شناخته شده است (داده ها نشان داده نشده است). برای خمیر بیلاکس مقادیر $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ در $\omega = 10$ رادیان بر ثانیه به ترتیب مساوی با 10^4 پاسکال و 4×10^3 پاسکال می باشد، که با نتایج گزارش شده پیش از این در مقالات برای سیستم های خمیر آرد گندم با مقدار آب مشابه سازگاری دارد.

در شکل 2 منحنی های $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ خمیر بیلاکس اساساً به نظر می رسد که به صورت موازی حرکت می کند، که این حالت یکی از ویژگی هایی است که می تواند با مدل ژل بحرانی حاصل شود. اساساً، وینتر و شامبون (1986) این مدل برای توصیف خواص ویسکوالاستیک خطی در یک سیستم پلیمری در نقطه ژلی آن توسعه دادند، اما مدل برای بسیاری از سیستم های مواد غذایی (از جمله خمیر آرد گندم) نیز قابل اجراست؛ به عنوان مثال آنها همچنین ممکن است حاوی ساختارهای ابرمولکولی شامل زیر واحدها (قطرات، ذرات، و غیره) نیز باشند که توانایی

برهم کنش در مقیاسهای طولی مختلف را داراست (گابریل و همکاران 2001). بزرگترین مزیت مدل ژل بحرانی در این است که تنها دو پارامتر سفتی ژل (S) و قدرت ژل (n) برای توصیف رفتار خطی مواد مورد نیاز است:

$$G'(\omega) = \Gamma(1 - n) \cdot S \cdot \omega^n \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (6)$$

$$G''(\omega) = \Gamma(1 - n) \cdot S \cdot \omega^n \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (7)$$



شکل 2. ضریب دینامیکی خمیر بیلاکس (سیاه و سفید)، گلوتن (خاکستری) و نشاسته (سفید) در مقابل فرکانس. برای خمیر بیلاکس و گلوتن دامنه نوسان $\gamma_0 = 0.06$ ٪ منظور گردید و برای نشاسته $\gamma_0 = 0.04$ ٪ پایین آورده شد تا به محدوده ی خطی بسیار کوچک دست یابیم. خط چین ها نمودارهای $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ را برای مدل ژل بحرانی با سفتی ژل $S=5100$ پاسکال و و قدرت ژل $n=0.22$ نشان میدهند.

که در آن $\Gamma(n - 1)$ تابع گاما است. برازش این معادلات به منحنی های خمیر بیلاکس در شکل 2 در محدوده ی فرکانس 1-10 رادیان بر ثانیه، $S = 5100$ پاسکال و $n=0.22$ به دست می آید. این مقادیر نشان می دهد که خمیر به عنوان یک ژل نسبتاً ضعیف (از لحاظ فیزیکی) رفتار می کند. برای خمیر گاو میش کوهان دار امریکایی ضعیف $S = 6140$ پاسکال و $n=0.19$ به دست می آید. به طور کلی، مقادیر سفتی ژل S شاید بطور قابل توجهی برای انواع مختلف آرد و مقادیر آب تغییر کند، در حالی که مقادیر N همیشه بسیار مشابه است (ان جی 2007). در رکانس های بالا، منحنی های $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ معمولاً شروع به انحراف از تابع پاسخ ژل بحرانی پیش بینی شده می کنند. این انحراف به طور کلی به فرآیندهای آرامش در رژیم راوس (از خواب بیدار شدن) نسبت داده

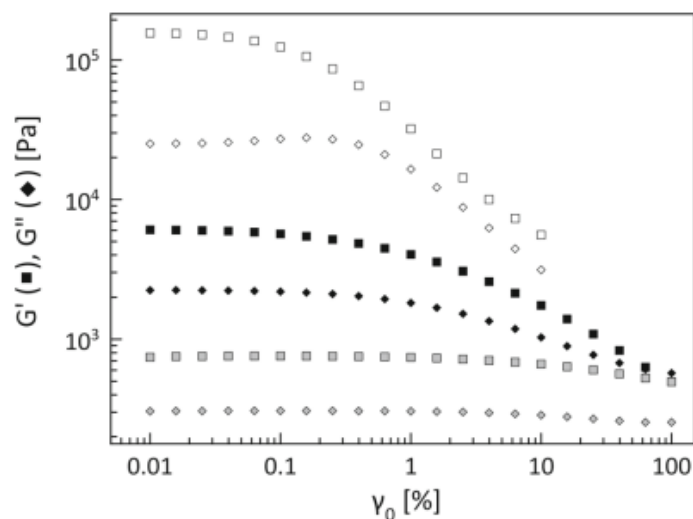
است (ان جی و مک کینلی 2008). با این حال، حتی در $\omega = 100$ رادیان بر ثانیه، شیب $G'(\omega)$ است همچنان بسیار پایین تر از مقدار پیش بینی شده توسط رژیم آرامش راوس است ($G'(\omega) \sim \omega^{0.5}$). همچنین در فرکانس های پایین، خمیر دقیقاً همانند یک ژل بحرانی رفتار نمی کند، از اینرو مقادیر $G''(\omega)$ تمایل به انحراف از خط مستقیم دارن، که خمیدگی به سمت بالا ظریفی را از خود نشان می دهند (ان جی 2007؛ تانر و همکاران 2008). ان جی (2007) این انحراف را به آرامش نمونه تابع گام در حال بارگذاری در رئومتر نسبت می دهد. با این حال حتی پس از زمان استراحت طولانی مدت نیز (1/5 ساعت)، منحنی $G''(\omega)$ هنوز هم این روند رو به بالا را نشان می دهد، بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که این ویژگی از خود مواد ناشی می شود. در زمان های به اندازه کافی طولانی، ژل به صورت فیزیکی باید جریان یابد، که این حالت نشان می دهد که منحنی های $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ باید همدیگر را در یک فرکانس بسیار پایین قطع کنند. به عبارت دیگر، هرچند مغایر با ژل بحرانی حقیقی، خمیر آرد گندم زمان استراحت محدود، البته بسیار بزرگ دارد (گابریل و همکاران 2001). روشن است که تقاطع منحنی های $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ در خارج از محدوده فرکانسی که قابل دسترس توسط رئومتر است، واقع شده است. اما با این حال شروع تقاطع در حال حاضر نیز می تواند با مشاهدهی خمیدگی به سمت بالا منحنی $G''(\omega)$ برای ω کوچکتر از 1 رادیان بر ثانیه تشخیص داده شود. تلاش ما برای گسترش محدوده فرکانس به مقادیر پایین تر به چند دلیل ناموفق بوده اند. اولاً، اصل برهمنهی زمان دما تنها می تواند بر خمیر در یک طیف درجه حرارت نسبتاً کوچکی اعمال شود (گابریل و همکاران 2001). دوماً، اصل برهمنهی فرکانس فشار نرخ (ویس و همکاران 2007) با توجه به محدودهی خطی کوچک خمیر شکست خورد. در نهایت، آزمایش خزش خطی نشان داد که حتی پس از 4 ساعت، یک تغییر شکل حالت پایدار هنوز به طور کامل محقق نشده است، که این نشان می دهد که تقاطع در مقدار فرکانس کوچکتر از 10^{-4} رادیان بر ثانیه واقع شده است. لوفور (2006) یک رویکرد مشابهی را برای پیدا کردن نقطه تقاطع مورد استفاده قرار داد و همچنین دریافت که نقطه $\omega_{\text{intersection}}$ برای سیستم خمیر او 10^{-4} رادیان بر ثانیه است.

داده های رفت و برگشت کششی در فرکانس 1 رادیان بر ثانیه در شکل 3 ارائه شده است. حدود خطی γ_c می تواند به عنوان تعریف دامنه کشش که در آن مقدار $G'(\gamma_0)$ تا 95 درصد G'_0 کاهش می یابد. از این تعریف، واضح است

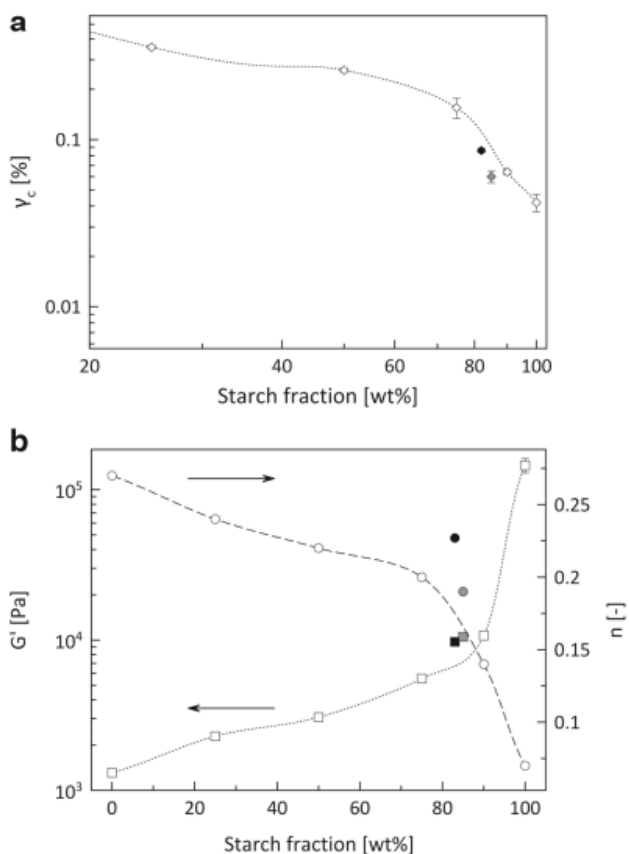
که برای خمیر بیلاکس قوی مقدار γ_c 0/09٪، در حالی که برای خمیر ضعیف گاومیش کوهان دار امریکایی محدوده ی خطی حتی کوچکتر است (0/06٪، داده ها نشان داده نشده است). مقادیر مشابه برای محدوده ی خطی توسط سایر گروه های تحقیقاتی گزارش شده است (آمییا و منجیوار 1992، برلاند و لانای 1995).

بالاتر از حد خطی، خمیر تحت کشش نرم شدگی قرار می گیرد، که به احتمال زیاد می توان به تفکیک تراکم نشاسته (اسمیت و همکاران 1970) و از دست دادن چسبندگی بین پروتئین گلوتن و گرده ی نشاسته نسبت داد (واتانابه و همکاران 2002). شکل 3 نشان می دهد که نشاسته دارای محدودیت خطی بسیار کوچک است (0/042٪) که هر دو مدول دینامیکی آن کاهش قابل ملاحظه ای می یابد. در مقابل، برای گلوتن خالص حد خطی بسیار بزرگتر است (در حدود 3/2٪) و مدول دینامیکی اساسا تا بزرگترین دامنه کشش ثابت باقی می ماند. مشخص است که نشاسته برای محدود کردن خطی کوچک از خمیر مسئول است (اسمیت و همکاران 1970، لارسون و همکاران 2000، خطکار و اسکوفیلد 2002a، واتانابه و همکاران 2002؛ اوت هایاکوماران و همکاران 2002). شکل 4a حدود خطی را به عنوان تابعی از محتوای نشاسته نشان می دهد. با افزودن نشاسته، حد خطی مخلوط گلوتن نشاسته کاهش قابل ملاحظه ای می یابد. اگر چه تمام مخلوط ها با مقادیر مختلفی از آب آماده شده، هنوز هم ممکن است محدوده خطی مقایسه شود، چرا که تایید شد که γ_c تنها به صورت خیلی ضعیفی وابسته به آب است (داده ها نشان داده نشده است). برای محتویات نشاسته ی بالاتر از حدود 75 درصد وزنی، γ_c به عنوان یک قانون توان با توجه به محتوای نشاسته تکامل می یابد (در درصد وزنی؛ شکل 4a). برای ژل کلئیدی خیلی بیشتر از غلظت ژلی و سفتی، شی و همکاران (1990) استدلال نمودند که محدوده ی خطی باید مقیاسی از نسبت حجمی به عنوان قانون توان باشد. در نتیجه، خمیر را می توان به عنوان یک پراکنش متمرکز گرده های نشاسته در ماتریس پروتئین گلوتن مورد بررسی قرار داد، حداقل تا آنجا که بر رفتار خطی آن تمرکز می شود (اوت هایاکوماران و همکاران 2002). در برخی موارد (اسمیت و همکاران 1970؛ پان-تین و سافاری-آردی 1998) این رفتار سوسپانسیون در میدان کششی خمیر آشکار می شود، همانطور که منحنی $G''(\gamma_0)$ گاهی اوقات نشان می دهد نزدیک شدن حداکثری سطحی به حد خطی، منعکس کننده فروپاشی شبکه ذرات است. در حالی که این حداکثر نقطه ای در $G''(\gamma_0)$ در هر دو سیستم خمیری ما وجود ندارد، اما آن در ترکیب

10 درصد وزنی گلوتن و 90 درصد وزنی نشاسته قابل مشاهده است (نتایج نشان داده نشده است) و آشکارا در 100 درصد وزنی نمونه نشاسته نیز می‌توان دید (شکل 3). اگر چه از طرفی تاثیر تفاوت در مقدار آب پنهان شده است، اما افزایش مقدار نشاسته منجر به افزایش G' می‌شود (شکل b4). اوت هایاکوماران و همکاران (2002) در هنگام استفاده از سطوح مطلوب آب برای هر یک از مخلوط‌های نشاسته-گلوتن به همان نتیجه رسیدند. با این حال، در سطح ثابت آب (10 میلی لیتر آب اضافه شده به 10 گرم پودر گلوتن نشاسته) رتبه بندی مقادیر G' معکوس شد. در مقابل، واتانابه و همکاران (2002) افزایش قابل توجهی در G' با افزایش نشاسته، حتی در سطح ثابت آب گزارش کرده اند (5/95 میلی لیتر آب اضافه شد به 10 گرم پودر گلوتن نشاسته). در نهایت، آزمون SAOS ما بر روی مخلوط گلوتن نشاسته نشان داد که با افزایش نسبت گلوتن نشاسته، $G'(\omega)$ وابستگی فرکانس قوی تری را نشان می‌دهد (شکل b4)، که این نتایج توسط هابرد (1970) و اسمیت و همکاران (1970) نیز گزارش شده است و در سازگاری با مشاهده قبلی ما که $G'(\omega)$ بیشتر وابسته به فرکانس خمیر و گلوتن است تا فرکانس نشاسته (شکل 2 را ببینید).



شکل 3. مدول دینامیکی در مقابل دامنه کشش برای خمیر بیلاکس (سیاه و سفید)، گلوتن (خاکستری) و نشاسته (سفید) محاسبه شده در $\omega = 1$ رادیان بر ثانیه.

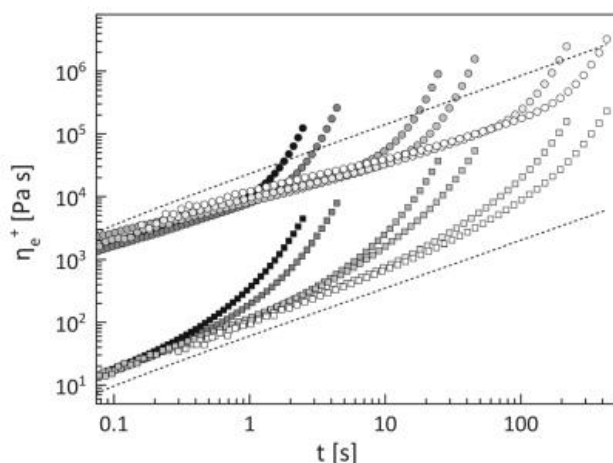


شکل 4. حدود خطی γ_c (a) مقادیر G' (در $\omega = 10$ رادیان بر ثانیه) و توان ژل n در $G'(\omega)$ (b) به عنوان تابعی از محتوای نشاسته (درصد وزنی). در G' (در $\omega = 10$ رادیان بر ثانیه) مقادیر در ناحیه خطی اندازه گیری شد و توان ژل n برای فاصله $\omega=1-10$ رادیان بر ثانیه مشخص شد (معادله 6). علامات سفید نشان دهنده مخلوط گلوتن نشاسته است، در حالی که علامت سیاه و سفید و خاکستری به ترتیب متناظر با ترکیب خمیر بیلاکس و گاویش کوهان دار امریکایی بود. نطه چین ها به منظور هدایت چشم اضافه شد. فاصله ی خطا دارند به طول یک واحد انحراف استاندارد است.

رژیم غیر خطی

اگرچه آزمون SAOS برای به دست آوردن اطلاعات در مورد زمان و حساسیت کششی خمیر بسیار مفید می باشد، ارتباط عملی آن ها محدود است، همانطور که تغییر شکل عملی به نوع تغییر شکلی که در روند تهیه نان مواجه می

شود مربوط نیست. در طول مخلوط کردن، تخمیر و افزایش دمای اجاق گاز، خمیر کشش و تغییر شکل کششی بیشتری را نسبت به کشش پایین در جریان برشی تجربه خواهد کرد. از این رو مطالعه رفتار خمیر تحت کشش ضروری است. راه اندازی روش EVF به منزله یک روش به خوبی تثبیت یافته برای توصیف مواد تحت کشش تک محوره است. نتایج حاصل از آزمایش کشش تک محوره بر روی خمیر بیلاکس و گلوتن در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به شکل روشن است که شباهت قابل توجهی در رفتار بین خمیر و گلوتن تحت تغییر شکل کششی وجود دارد (اسکوفیلد و اسکات بلر 1937). در کشش‌های بسیار بزرگ، هر دو ماده کشش سخت شدگی از خود نشان می‌دهند، یعنی استرس بیش از آنچه که متناسب با کشش است، در نرخ کشش ثابت افزایش می‌یابد. همچنین شکل 5 نشان می‌دهد که در کشش‌های پایین تمام منحنی‌های گلوتن کم و بیش منطبق بر حلقه‌ی ویسکوالاستیک خطی (LVE) هستند، اما منحنی خمیر این‌گونه نیست.



شکل 5. کشش تک محوره از خمیر بیلاکس (دایره) و گلوتن (مربع) در نرخ‌های کششی مختلف (1-0/5-0/1-0/05-0/01-0/005 s⁻¹). رنگ به تدریج از سفید به سیاه با افزایش نرخ کشش تغییر می‌کند. خط چین‌ها پیش‌بینی LVE برای خمیر بیلاکس و گلوتن را، با توجه به مدل ژل بحرانی نشان می‌دهند. برای واضح‌تر شدن، مقادیر ویسکوزیته کششی گلوتن (و LVE پیش‌بینی شده‌ی گلوتن) با یک عامل $\frac{1}{50}$ تغییر مقیاس تصویر شده است. در محدوده‌ی کششی‌های کوچک ($\epsilon \ll 1$) ویسکوزیته‌ی کششی $\eta_e^+(t)$ با استفاده از رابطه‌ی ان‌جی و من‌کنلی (2008) به دست می‌آید:

$$\eta_e^+(t) = \frac{3S}{1-n} t^{1-n} \quad (8)$$

خطچین‌ها در شکل 5 پیش بینی‌هایی از LVE را برای گلوتن و خمیر، به ترتیب با $S = 652$ پاسکال و $s0.24$ و 5100 پاسکال $s0.22$ و $n=0.24$ و $n=0.22$ نشان می‌دهد. برای گلوتن، همان‌طور که توسط پوکر و مک کینلی (2008) گزارش شده است، ما شاهد نسبتاً شرایط کیفی خوب، تا شروع کشش سفت‌شدگی هستیم. در مقابل، منحنی گرانروی کششی خمیر را وابستگی نسبت به نرخ کشش نشان می‌دهد و به شدت از حلقه‌ی ویسکوالاستیک خطی پیش بینی شده منحرف می‌شود. عدم وجود یک منطقه LVE روشن برای خمیر را می‌توان به محدوده‌ی خطی بسیار کوچک آن نسبت داد، همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شد. دومین دسته از مجموعه‌ی وابستگی کششی فعل و انفعالات بین گلوتن و نشاسته است. تنر و همکاران (2011) نشان دادند که مدل ژل بحرانی می‌تواند به عملکرد یک پیش بینی دقیق‌تر از رفتار کششی خمیر با در نظر گرفتن یک تابع آسیب بهبود یابد. با این حال، این تابع آسیب تنها می‌تواند با فیت کردن‌های بیشتر داده‌های غیرخطی به دست آید که فراتر از محدوده کار حاضر است.

علی‌رغم نبود یک LVE مناسب، هنوز هم می‌توان یک منحنی شبه LVE برای خمیر، با در نظر گرفتن خط مماس به همه‌ی منحنی‌های خمیر با نرخ کششی مختلف رسم نمود. این روش ممکن است برای تعریف یک شاخص کشش سفتی (SHI) برای گلوتن و خمیر به طور یکسان باشد که مشابه با تعریف لاگونا-گوتیرز و همکاران (2015) برای مخلوط پلی پروپیلن است.

$$SHI = \frac{\eta_e^+(\epsilon_{max})}{\eta_{e0}^+(\epsilon_{max})} \quad (9)$$

با رسیدن به حداکثر فشار ϵ_{max} که در اینجا $2/7$ است. به عبارت دیگر، $\eta_e^+(\epsilon_{max})$ نشان دهنده مقدار واقعی ویسکوزیته کششی گذرا در حداکثر کشش است و $\eta_{e0}^+(\epsilon_{max})$ مقدار LVE تعمیم در حداکثر فشار است. مقدار SHI برای خمیر بیلاکس و گلوتن در جدول 1 داده شده است. با افزایش مقدار کشش، مقدار SHI نیز افزایش می‌یابد، تا زمانی که به یک مقدار ثابت در حدود $0/1 S^{-1}$ می‌رسد. در نرخ کششی بالاتر، مقدار SHI برای خمیر بیلاکس به نظر می‌رسد که دوباره افت کند، اما این به سادگی می‌تواند ناشی از عدم دقت اجتناب ناپذیر در تجزیه و تحلیل

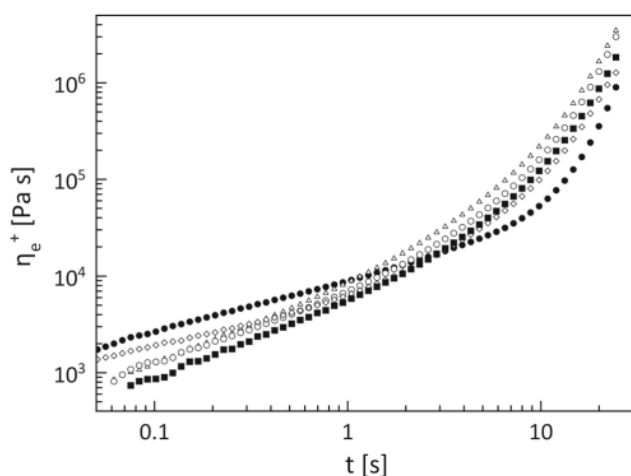
داده‌ها باشد، زیرا برای نرخ‌های کشش بالا منحنی ویسکوزیته خمیر تنها یک بخش مستقیم بسیار کوتاه دارد و در نتیجه به دست آوردن درست LVE مرجع برای محاسبه SHI دشوار است. هرچه منحنی گلوتن یک LVE به خوبی تعریف شده داشته باشد، مقدار SHI می‌تواند دقیق‌تر تعیین شود، و به نظر می‌رسد که این مقادیر در مقدار کشش بالا ثابت باقی بماند. اوت‌هایاکوماران و همکاران (2002) نیز گزارش دادند که با افزایش مقدار کشش، درجه فشار سفت‌شدگی کاهش می‌یابد، با این حال نویسندگان به ندرت از مقدار حداکثر ویسکوزیته کششی به عنوان مقدار کشش سفت‌شدگی استفاده کرده‌اند و تفاوت در بخش خطی منحنی ویسکوزیته به حساب نیاورده‌اند. در هر صورت، بالاترین مقدار کشش با توجه به روند تهیه‌ی نان بسیار مناسب نیست همانطور که نرخ کششی (دو محوره) موجود در تخمیر و مرحله‌ی پخت به طور معمول تنها در حدود 10^{-3}s^{-1} هستند.

جدول 1. مقادیر شاخص کشش سفت‌شدگی برای خمیر بیلاکس قوی، خمیر گاویش کوهان دار امریکایی ضعیف و گلوتن خالص در کشش تک محوره.

	0.005 s^{-1}	0.01 s^{-1}	0.05 s^{-1}	0.1 s^{-1}	0.5 s^{-1}	1 s^{-1}	5 s^{-1}
بیلاکس	6.2	7.3	11.1	10.1	10.4	8.8	8.6
گاویش	5.6	5.4	7.8	7.5	7.5	7.0	6.1
گلوتن	10.8	13.0	14.5	15.6	15.8	15.9	18.0

منحنی گلوتن در شکل 5 برای وضوح بیشتر تغییر مقیاس داده شده است، اما مقدار مطلق $\eta_e^+(\epsilon_{\max})$ است که تقریباً دو برابر بزرگی مقدار متناظر برای خمیر است. از آنجا که نمونه گلوتن تا به حال با آب مازاد آماده می‌شود، اظهار این مورد که که گلوتن ویسکوزیته‌ی کششی بسیار بالاتری نسبت به خمیر استاندارد از خود نشان می‌دهد، درست به نظر می‌رسد. مقادیر SHI نیز برای گلوتن بالاتر از مقادیر متناظر برای خمیر هستند، چراکه SHI نسبت به تغییرات در محتوای آب بسیار حساس است. برای خمیر SHI در $\epsilon = 0.1 \text{ s}^{-1}$ فقط با اضافه کردن 1 میلی لیتر آب در نمونه تقریباً 50٪ افزایش می‌یابد. به همین دلیل، مقادیر SHI بالاتر برای گلوتن در مقایسه با خمیر به نظر می‌رسد صرفاً ناشی از استفاده از میزان بالاتری از آب در آماده سازی آنهاست.

به منظور تبیین سهم گلوتن و نشاسته در رفتار کششی خمیر، مخلوط گلوتن نشاسته نیز در کشش مشخص شد (شکل 6 را ببینید). نشاسته خالص نمی تواند آزمایش شود، زیرا این نمونه‌ها بیش از حد شکننده هستند. شکل 6 نشان می دهد که با افزایش مقدار نشاسته، منحنی ویسکوزیته به تدریج از نوع گلوتن مانند به نوع خمیر مانند تغییر رفتار می دهد، همچنین شیب بخش اولیه منحنی سیستماتیک کاهش می یابد. این مشاهدات نشان می دهد که نشاسته تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار خمیر در تنش‌های کوچک دارد. به دلیل تغییر در انحراف LVE حضور گرده‌های نشاسته منجر به افزایش در مقدار SHI می شود، باینکه قدر مطلق $\eta_e^+(\varepsilon_{max})$ با افزایش مقدار نشاسته (شکل 6) کاهش می یابد. مورد دوم توسط اوت هایاکوماران و همکاران (2002) نیز ذکر شده است.



شکل 6. رفتار کششی از خمیر بیلاکس (دایره سیاه و سفید) و گلوتن (مربع سیاه و سفید)، نسبت به مخلوط گلوتن- نشاسته در ترکیب های مختلف در $\varepsilon = 0.1 \text{ s}^{-1}$: 75 درصد وزنی- 25 درصد وزنی (مثلث سفید)، 50 درصد وزنی- 50 درصد وزنی (دایره سفید) و 10 درصد وزنی- 90 درصد وزنی (لوزی سفید)

یافته های ما بیشتر در چارچوب اثبات اصل توسعه یافته توسط آمامیا و منجیوار (1992) است که هدفشان توضیح فعل و انفعالات بین گلوتن و نشاسته و تعیین رفتار خمیر در برش راه اندازی و جریان کششی است. آمامیا و منجیوار (1992) چهار منطقه را در رابطه‌ی تنش-کشش برای خمیر در این نوع جریان مشخص کردند. در کشش های بسیار کوچک، فعل و انفعالات نشاسته- نشاسته و نشاسته- گلوتن (یعنی فعل و انفعالات کوتاه برد) پاسخ خمیر را تعیین می کند. در این منطقه‌ی پیش عملکرد، فعل و انفعالات گلوتن- گلوتن احتمالاً اهمیت خیلی کمی دارد. با افزایش

کشش، فعل و انفعالات کوتاه برد شروع به شکستن می کنند و مولکول گلو تن تحرک اندکی از خود نشان می دهد. این منطقه عملکرد مربوط به بخش مستقیم در منحنی های شکل 5 بوده و با منطقه کشش سفت شدگی دنبال می شود، که در آن فعل و انفعالات دوربرد گلو تن- گلو تن نقش محوری را بازی می کند. در کشش به اندازه کافی بزرگ، استرس حداکثر و شبکه گلو تن در نهایت پاره می شود. با راه اندازی EVF، ممکن است برای رسیدن به این منطقه فراشکستی بسیاری از نمونه های ما در حداکثر کشش قابل دسترسی $e_{max} = 2.7$ هنوز شکست را تجربه نمی کنند. در آزمایش کشش، اوت هایاکوماران و همکاران (2002) دریافتند که کشش کسپختگی بین 2/2 تا 2/9 برای خمیر تغییر می کند، برای گلو تن نیز مقادیر مشابه است. آن ها همچنین دریافتند که کشش کسپختگی با افزایش نرخ کشش افزایش می یابد. در نهایت، لازم به ذکر است که مخلوط گلو تن- نشاسته به طور کامل نمی تواند برای رفتار کششی از خمیر به حساب آید، زیرا هنوز برخی تفاوت ها بین منحنی خمیر و منحنی 10 درصد وزنی گلو تن 90 درصد وزنی نشاسته نشان داده شده در شکل 6، وجود دارد. بدیهی است که گلو تن و نشاسته محصولات تجاری هستند و در نتیجه با گلو تن و نشاسته به کار برده شده در خمیر یکسان نیستند (به بخش مواد و روش ها "رجوع شود). خمیر همچنین شامل چندین مولفه ی جزئی است، که (تا حدی) در مخلوط گلو تن نشاسته وجود ندارد، اما ممکن است همچنان اثر مهمی بر روی رفتار خمیر داشته باشند.

تمییز دادن خمیر آرد ضعیف و قوی

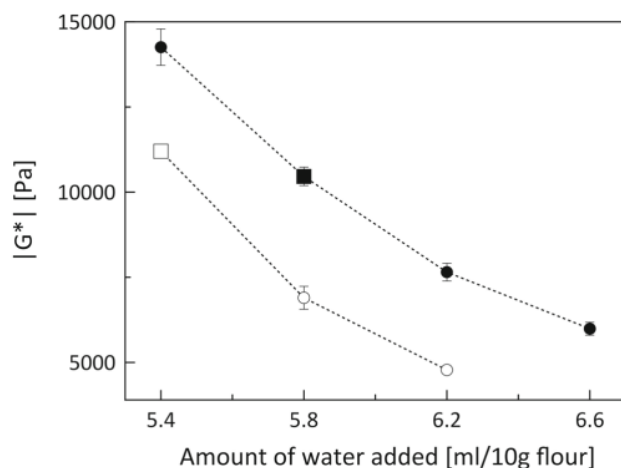
رژیم خطی

بحث در بخش قبلی نشان داد که شبکه گلو تن در درجه اول تحت شرایط تغییر شکل غیر خطی بزرگ رفتار خمیر را تعیین می کند، در حالی که برای تغییر شکل خطی کوچک فعل و انفعالات نشاسته- نشاسته و نشاسته- گلو تن نقش محوری بازی می کند و به احتمال زیاد حتی بر فعل و انفعالات گلو تن- گلو تن نیز تسلط دارند. هر چند عملکرد تهیه ی نان از آرد گندم تا حد زیادی توسط شبکه گلو تن تعیین می شود (ورابریکه و دلکار 2002) می توان پیش بینی کرد

که آزمون SAOS برای تشخیص خمیر آرد قوی از ضعیف، حداقل در محدوده فرکانس در دسترس مناسب نخواهد بود.

شکل 7 مقادیر $|G^*|$ را در فرکانس ثابت 10 رادیان بر ثانیه و دامنه کشش از 0/06٪ برای هر دو خمیر قوی (بیلاکس) و ضعیف (گاویش کوهان دار امریکایی) به عنوان تابعی از مقدار آب، از جمله داده های آب مطلوب نشان می دهد. واضح است که در مقدار مطلوب آب، آزمایش SAOS در تمایز بین خمیر آرد قوی و ضعیف نتیجه نمی دهد. مقدار $|G^*|$ خمیر گاویش کوهان دار امریکایی ضعیف در 5/4 میلی لیتر آب حتی کمی بالاتر از مقدار متناظر برای خمیر قوی بیلاکس در 5/8 میلی لیتر آب است. خمیر با همان عملکرد ثبات فارینوگراف بسیار مشابه اند ولی مقادیر یکسان $|G^*|$ ندارند. به طور کلی، آرد ضعیف تمایل به نشان دادن مقادیر بیشتر از آرد قوی دارد (ناویکیس و همکاران 1982؛ آمیا و منجیوار 1992، کاکلیار و همکاران 1996؛ سافری آردی و فاننوم تین 1998؛ کین تاک و همکاران 2002؛ خط کار و اسکوفیلد 2002b). آرد قوی به دلیل داشتن محتوای پروتئین بالا به طور معمول آب بیشتری برای رسیدن به همان قوام فارینوگراف نیاز دارد (مردیت 1966) و به نظر می رسد که این تفاوت کوچک در محتوای آب در حال حاضر لفافه ی کافی به تفاوت در شبکه گلوتن بین آرد قوی و ضعیف است. در مقابل، در مقدار آب برابر، مقدار $|G^*|$ به طور مداوم برای خمیر قوی بیلاکس بیشتر است و تفاوت نسبی به خمیر گاویش کوهان دار امریکایی ضعیف به نظر می رسد که با افزایش مقدار آب افزایش یابد، که این شرایط با یافته های قبلی از ناویکیس و همکاران (1982) سازگاری دارد. هیبرد (1970) و اسمیت و همکاران (1970) هر دو مخلوط گلوتن نشاسته را مورد مطالعه قرار دادند که به طور گسترده ای متفاوت با نسبت گلوتن نشاسته به مقدار آب است و آنها دریافتند که وابستگی آب به مدول دینامیکی با افزایش گلوتن کاهش می یابد. تغییر در محتوای آب بیشتر نشاسته را تحت تاثیر قرار می دهد تا شبکه گلوتن را، آرد با محتوای پروتئین بیشتر مقدار $|G^*|$ دارد که به محتوای آب کمتر حساس است. در مقابل، در بالاترین مقدار آب (6/6 میلی لیتر در 10 گرم آرد)، نمونه گاویش کوهان دار امریکایی شروع به از هم پاشیدن کرد و دیگر مناسب برای تست نبود. سافری-آردی و پان-تین (1998) نیز آزمون SAOS را بر روی انواع آردهای متفاوت اما با مقدار آب برابر انجام دادند، آنها تفاوت قابل توجهی بین سیستم های خمیر آرد ضعیف و قوی مشاهده نکردند. بنابراین

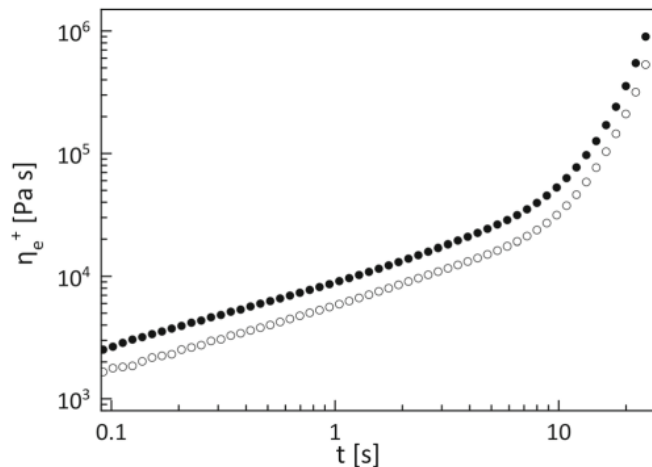
می‌توان به این نتیجه رسید که آزمون SAOS هستند قادر به تمایز بین خمیر آرد ضعیف و قوی نیست. نمی‌توان انواع مختلف آرد گندم را تنها بر اساس محدود خطی آن‌ها متمایز کرد. اگرچه در بخش قبلی محدوده‌ی خطی γ_C برای تغییر از یک خمیر به نوع دیگر مشخص شد، به طور کلی این تفاوت‌ها بیش از حد کوچک بوده و اجازه‌ی تمایز بدون ابهام را نمی‌دهد (کین تاک و همکاران 2002).



شکل 7. تکامل مقادیر $|G^*|$ برای خمیر قوی بیلاکس (دایره سیاه و سفید) و خمیر ضعیف گاویش کوهان‌دار امریکایی (دایره سفید) با آب. بهینه مقدار آب به وسیله علامت مربع نشان داده شده است. $\omega = 10$ رادیان بر ثانیه و $\gamma_0 = 0.06\%$. میله خطا دارای طول یک برای انحراف معیار هستند.

رژیم غیر خطی

اندازه‌گیری دینامیک در ناحیه خطی قادر به تمایز بین آردهای مختلف نیست و به تبع موفق به پیش‌بینی عملکرد تیه‌ی نان نخواهد بود، خمیر باید به منظور انتخاب تغییرات در محتوای گلوتن و کیفیت واکنش مکانیکی تحت تغییر شکل بزرگتری قرار گیرد. روش رئولوژیکی که شامل تغییر شکل‌های بزرگ است مثالی برای آزمایش کششی و آزمون خزش بازبایی غیر خطی است.



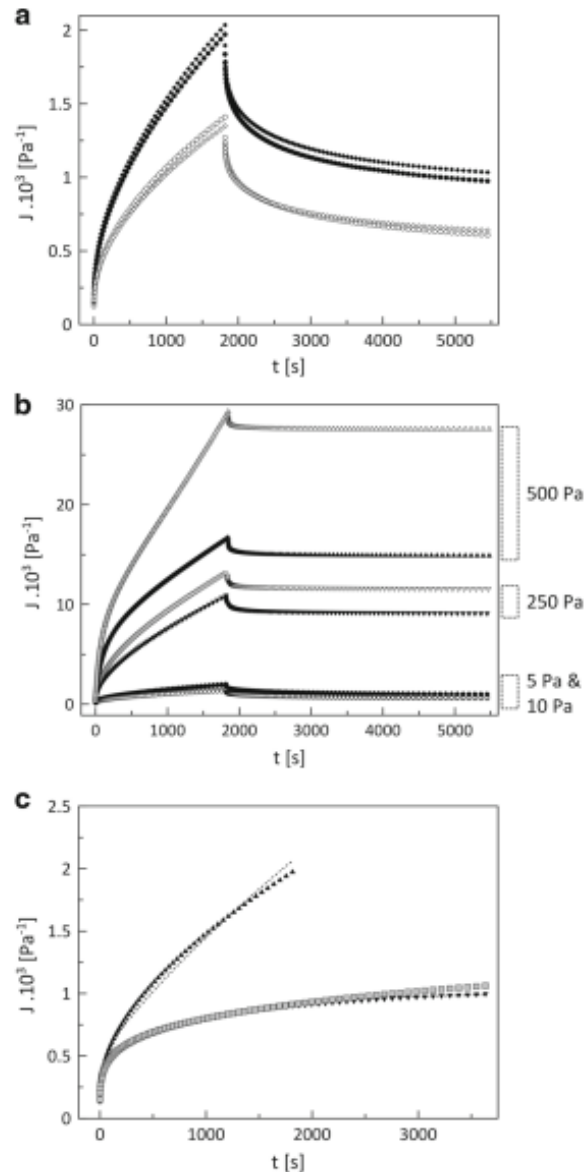
شکل 8. منحنی گرانروی کششی برای خمیر قوی بیلاکس (سیاه و سفید دایره) و خمیر گاویش کوهان دار

امریکایی ضعیف (دایره سفید) در $\epsilon = 0.1s^{-1}$ تهیه شده با مقدار آب بهینه

شکل 8 نشان می دهد که ویسکوزیته کششی گذرای هر دو خمیر آرد قوی و ضعیف در یک نرخ کشش ثابت $0.1s^{-1}$. از این شکل روشن است که آزمون کششی در واقع قادر به تشخیص خمیر آرد قوی از ضعیف، حتی در مقدار بهینه آب است. در نگاه اول، به نظر می رسد که این دو سیستم خمیر به شیوه ای مشابهی رفتار کنند، اما مقادیر ویسکوزیته مطلق آنها در واقع کاملاً متفاوت اند ($\eta_e^+(\epsilon_{max}) = 9.9 \cdot 10^5$ and $5.3 \cdot 10^5 Pa s$ به ترتیب). این تفاوت همچنین در شاخص کششی سفت شدگی منعکس شده است: مقدار SHI برای خمیر قوی به طور سیستماتیکی بالاتر از مقدار متناظر برای خمیر ضعیف است (جدول 1). SHI در حال حاضر به عنوان یک شاخص بسیار عالی از عملکرد تهیه ی نان برای هرگونه خمیر داده شده اذعان شده است (ون لیت 2008). رفتار کشش سفت شدگی مانع انعقاد سلول های گاز، با ایجاد ثبات در فیلم خمیر بین گسترش سلولهای گاز در برابر پارگی زودرس خواهد شد. علاوه بر این، کشش سفت شدگی ممکن است بیش از حد از تسهیم نامتناسب و اطمینان از رشد برابر سلول های گاز در طول تخمیر و پخت جلوگیری نماید (ون ولیت 2008). تفاوت در درجه کششی سفت شدگی نمایش داده شده توسط انواع مختلف آرد ممکن است تفاوت در نسبت گلوٹنین-گلیادین را از شبکه گلوٹن منعکس کند، اما خواص شکستگی جداگانه نیز به نظر می رسد که نقش مهمی را بازی کند (کوکلیار و همکاران 1996). علاوه بر این، مشاهده گردید که برای آرد بیلاکس قوی نسبت به برای آرد گاویش کوهان دار امریکایی ضعیف شروع کشش سفت شدگی در کشش

کوچکتر رخ می دهد. برای مثال، در $\varepsilon = 0.1s^{-1}$ ، منحنی ویسکوزیته 10٪ انحراف از پایه‌ی برون‌بندی حاضر در $43\varepsilon = 0$ را نشان می‌دهد، در حالی که برای گاومیش کوهان دار امریکایی این نقطه انتقال تنها در $\varepsilon = 0.58$ رخ می دهد.

کشش سفت‌شدگی که احتمالاً تنها عامل توضیح عملکرد تهیه‌ی نان نیست. داده‌های کششی کوکلیار و همکاران (1996) و کین‌تاک و همکاران (2002) نشان می‌دهد که عملکرد تهیه‌ی نان وابسته به کشش سفت‌شدگی و فشار پارگی ε_b در یک رابطه پیچیده‌ی مثلثی است و این فشار پارگی بالا می‌تواند میزان کشش سفت‌شدگی را خنثی کند و بالعکس. در آزمایش EVF، نه خمیر قوی و نه ضعیف شکست کامل در محدوده قابل دسترسی فشار تجربه نمی‌کند که این نشان می‌دهد که فشار پارگی هر دو سیستم باید بالاتر از 2/7 باشد. در نهایت، ون ولیت (2008) استدلال کرد که ارزش مطلق قدرت خمیر (تعریف شده به عنوان ارزش استرس یا گرانیروی در نقطه پارگی نمونه) به احتمال زیاد از اهمیت کمتری نسبت به درجه‌ای از کشش سفت‌شدگی در تعیین عملکرد تهیه‌ی نان موثر است. که در آزمایشات تجهیزات کیفر کیندل اسپایر و همکاران (2015) در واقع دریافتند که میزان کشش سفت‌شدگی بسیار قوی است در رابطه با حجم نان از قدرت خمیر.



شکل 9. آزمون خزش بازیابی بر روی خمیر بیلاکس قوی (علامت سیاه و سفید) و خمیر ضعیف گاومیش کوهان دار امریکایی (علامت سفید). (a) در منطقه خطی: $\sigma = 10$ پاسکال (دایره) و $\sigma = 10$ پا (الماس). (b) در منطقه غیر خطی: $\sigma = 250$ پاسکال (مثلث رو به پایین) و $\sigma = 500$ پاسکال (مثلث رو به بالا). (c) مدل ژل بحرانی (مربع های خاکستری) به خوبی پیش بینی می کند منحنی های بازیابی در ناحیه خطی (خمیر Bilux، 5 پاسکال، مثلث رو به پایین)، در حالی که با استفاده از مدل های رولتی (خط چین ها)، هر دو منحنی های خزشی (مثلث به سمت بالا) و منحنی بازیابی می تواند فیت شود.

در مراحل تخمیر و پخت، خمیر در درجه اول تغییر شکل کششی را تجربه می‌کند و در نتیجه، به نظر می‌رسد که آزمون کششی انتخاب مناسبی برای مطالعه پتانسیل تهیه‌ی نان از خمیر است (کوکلیار و همکاران 1996). اگرچه پاسخ شبکه گلوتن همچنان می‌تواند با تغییر شکل برشی غیر خطی بزرگ جستوجو شود، آزمون خزش بازیابی غیر خطی در برش همچنین می‌تواند به ارائه اطلاعات مفید در مورد عملکرد تهیه‌ی نان بپردازد. نتایج آزمایش خزش بازیابی در خمیر بیلاکس و خمیر گاومیش کوهان دار امریکایی در شکل 9 ارائه شده است. هر دو سیستم خمیر در تنش‌های برشی در محدوده 5 تا 500 پاسکال قرار گرفتند. برای مقادیر پایین تنش برشی (شکل 9a) از منحنی انطباق مربوط به مقدار تنش‌های مختلف اساساً بر روب هم قرار گرفتند، به این معنی که تنش 10 پاسکال هنوز هم پایین‌تر از محدوده‌ی خطی است. مقدار تنش مشابه برای محدوده‌ی خطی توسط چندین محقق دیگر نیز گزارش شده است (ادواردز و همکاران، 2001؛ لوفور 2006؛ ون باکستیاال و همکاران 2011). در شکل 9b، مقدار تنش بسیار بالاتر به کار گرفته شد، و در نتیجه نمونه خمیر وارد منطقه غیر خطی گردید. تحت این تنش بالا، خمیر گاومیش کوهان دار امریکایی ضعیف

جریان با سهولت بیشتری نسبت به خمیر بیلاکس قوی دارد و پس از حذف تنش خمیر دومی می‌تواند به یک محدوده‌ی بسیار بزرگتر نسبت به میزان اولی واکنش دهد. در مقابل، در منطقه خطی، خمیر گاومیش کوهان دار امریکایی ضعیف به وضوح مقاومت بیشتری به جاری شدن نسبت به خمیر بیلاکس قوی از خود نشان می‌دهد (بحث بیشتر در ادامه آمده است).

به طور مشابه در مدول دینامیکی خطی در آزمون برش نوسانی، مدل ژل بحرانی نیز می‌تواند برای پیش‌بینی انطباق خزش $J_C(t)$ در آزمایشات خزش بازیابی خطی به کار رود (ان جی و مک کینلی 2008):

$$J_C(t) = \frac{t^n}{S \cdot \Gamma(1-n) \cdot \Gamma(1+n)} \quad (10)$$

با توجه به مدل ژل بحرانی، $J_C(t)$ یک وابستگی قدرتی در حال رشد بدون محدودیتی در طول زمانی نشان می‌دهد و مواد فاقد ویسکوزیته حالت پایدار خواهد شد. ژل بحرانی واقعی بنابراین هرگز به یک رژیم جریان حالت پایدار نمی‌رسد و مواد زمان استراحت طولانی محدود نخواهند داشت. با این حال، آزمایش SAOS نشان داد که خمیر آرد گندم

دارای طولانی ترین زمان استراحت محدود است (شکل 2). به همین ترتیب، در آزمون خزش خطی، به نظر می رسد که خمیر رویکرد رژیم جریان حالت پایدار را پس از 1800 ثانیه دارد، بنابراین می توان ویسکوزیته متناهی، (شبه) حالت پایدار تعیین نمود. به تبع آن، خمیر مدل ژل بحرانی تنها قادر به توصیف بخش الاستیک (اما نه قسمت چسبناک) از منحنی خزش خطی خواهد بود. این بخش الاستیک از $J_c(t)$ برابر با $J_r(t)$ به عنوان منحنی بازیابی تنها شامل پاسخ الاستیک از مواد است. شکل 9c نشان می دهد که $J_r(t)$ در واقع نزدیک به پیش بینی مدل ژل بحرانی است، در حالی که $J_c(t)$ به شدت از پیش بینی با توجه به هم‌بخشی‌های ویسکوز مهم در پاسخ کلی خمیر انحراف دارد. در واقع، انطباق مناسب از $J_c(t)$ تنها می تواند وقتی حاصل شود که سهم چسبناک به دست آمده (با مقدار η داده شده توسط مدل برگر، به ادامه مراجعه کنید) به صراحت به پیش بینی‌های ژل بحرانی اضافه گردد (نتایج نمایش داده نشده است). در مقابل، برای ژل گلوتن خالص، ان جی و مک کینلی (2008) به دست آوردند پیش بینی بسیار خوبی از منحنی خزش خطی $J_c(t)$ (برای t بین 0 تا 2000 ثانیه) با مدل ژل بحرانی به دست می‌آید. این اختلاف آشکار را می توان با این واقعیت که برای ژل گلوتن خالص طولانی ترین زمان استراحت بسیار طولانی تر از خمیر است، توضیح داد (دوباره به شکل 2 نگاه کنید). در نتیجه، ژل گلوتن خالص به رژیم جریان حالت پایدار تنها پس از زمان بسیار طولانی خزش بار خواهد رسید ($t_c \gg 1800 s$)، در حالی که برای $t_c = 2000 s$ ، سهم ویسکوزیته به طور کلی به پاسخ مواد نمی تواند قابل توجه باشد.

منحنی انطباق همچنین می تواند با روش مدل سازی برگری مدل سازی شود، که امکان تعیین کمیت الاستیک و چسبناکی را به رفتار کلی جریان می دهد. گر چه این مدل در اصل تنها برای محدوده‌ی خطی توسعه داده شده است، آن را می توان برای بررسی نمودارهای خزش بازیابی به دست آمده در خارج از منطقه خطی نیز مورد استفاده قرار داد، به شرطی که ویسکوزیته غیر نیوتنی به زمان بستگی نداشته باشد (لوفور 2006). برای فاز خزش، $J_c(t)$ توافق یافته می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$J_c(t) = J_0 + J_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{r_1}\right)\right) + J_2 \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{r_2}\right)\right) + \frac{t}{\eta} \quad (11)$$

که در آن J_0 انطباق سریع و آنی، J_1 و J_2 تطبیقات الاستیک عقب مانده هستند، $R1$ و $R2$ مربوط به زمان عقب ماندگی (تاخیری) و η ویسکوزیته حالت پایدار است. مقدار $J_c(t)$ در پایان مرحله خزش حداکثر انطباق خزش J_c^{max} نامیده می شود. انطباق بازیابی $J_r(t)$ توسط یک رابطه مشابه داده می شود:

$$J_r(t) = J_0 + J_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{r_1}\right)\right) + J_2 \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{r_2}\right)\right) \quad (12)$$

مجموع J_0 ، J_1 و J_2 نشان دهنده انطباق بازیابی کل J_r^{max} است. شکل 9c نشان می دهد که با این دو حالت مدل های رولتی پر شده، در واقع امکان به دست آوردن انطباق خزش مناسب مانند منحنی بازیابی، با وجود این واقعیت که در رفتار خمیر حقیقی توسط یک استمرار توزیع زمانهای استراحت مشخص می شود، همانطور که با مدل ژل بحرانی نشان داده شده است. مقادیر J_c^{max} ، J_r^{max} ، $R2$ در خزش ($R2$ طولانی ترین زمان عقب ماندگی (تأخیر) است) و η در جدول 2 برای خمیر بیلاکس و گامیش کوهان دار امریکایی داده شده است. در رژیم خطی، سهم الاستیک به پاسخ مواد باید در فاز خزش و بازیابی یکسان باشد. در نتیجه، پارامترهای بازیابی را به منظور تناسب داده های خزش در رژیم خطی مورد استفاده قرار می گیرند. در رژیم غیر خطی منحنی خزش و بازیابی تا به حال به طور مستقل از یکدیگر فیت شده اند.

جدول 2. مقادیر پارامترهای خزش بازیابی رولتی پر شده برای خمیر بیلاکس قوی و خمیر گامیش کوهان دار امریکایی ضعیف در سطوح تنش های مختلف از منحنی خزش، می توان مقدار ویسکوزیته حالت پایدار $\eta(\sigma)$ مربوط به سطوح استرس های مختلف را به دست آورد. باید توجه داشت که توانایی خمیر در جاری شدن نشان می دهد که پروتئین گلوئن در خمیر انجام به طور دائم شبکه وابسته را تشکیل نمی دهند (به مقدمه رجوع کنید).

	5 Pa		10 Pa		250 Pa		500 Pa	
	بیلاکس	گامیش آمریکایی	بیلاکس	گامیش آمریکایی	بیلاکس	گامیش آمریکایی	بیلاکس	گامیش آمریکایی
$J_c^{max} [10^{-3} \text{ Pa}^{-1}]$	1.98	1.42	1.99	1.35	10.95	13.19	16.78	29.14
$J_r^{max} [10^{-3} \text{ Pa}^{-1}]$	1.00	0.80	1.00	0.80	1.80	1.50	2.10	1.60
recovery (%)	50.6	56.4	50.3	59.4	16.4	11.4	12.5	5.50
r_2 [s] in creep	984	1082	978	1020	313	314	245	117
$\eta [10^6 \text{ Pa s}]$	1.59	2.45	1.48	2.48	0.25	0.22	0.20	0.09
R^2 in creep	0.993	0.995	0.988	0.996	0.999	0.999	0.999	0.999
R^2 in recovery	0.997	0.997	0.996	0.997	0.993	0.991	0.993	0.993

از جدول 2، پیداست که برای مقادیر تنش بالاتر از 50 پاسکال مقدار ویسکوزیته حالت پایدار $\eta(\sigma)$ اساساً، مستقل از تنش است. در مقادیر آب مطلوب، سطح ویسکوزیته خمیر گاومیش کوهان دار امریکایی ضعیف تا حدودی بالاتر از خمیر بیلاکس قوی است. ادواردز و همکاران (2001) و لوفور (2006) نیز ویسکوزیته نیوتنی مشابه برای آرد با کیفیت مختلف مزالعه کردند، اما مقادیر سطحی گزارش شده‌ی آن‌ها کمی بالاتر (3/5-6/7 $\cdot 10^6$ پاسکال) از مقادیر ما بود. در مقادیر تنش بالاتر $\eta(\sigma)$ به شدت کاهش می‌یابد و برای خمیر ضعیف کمتر از خمیر قوی است. در مقابل، ون باکس تیال و همکاران (2011) هنوز هم ویسکوزیته بالاتر برای آرد کم کیفیت حتی در منطقه غیر خطی مشاهده کردند. به این ترتیب، به نظر می‌رسد که گرانروی زیاد به قدرت آرد، بدون در نظر گرفتن بزرگی مقدار تنش خزشی بستگی ندارد.

از جدول 2، می‌توان استنباط کرد که با افزایش تنش خزشی، مقادیر حداکثر انطباق خزش نشان داده شده با J_c^{max} و همچنین انطباق کل بازیابی نشان داده شده با J_r^{max} هر دو افزایش می‌یابند. با این حال در همان زمان، بخشی از تغییر شکل خزش کل که می‌توان بازیابی شود، متمایل به کاهش است، که این نشان می‌دهد که ساختار خمیر به تدریج افزایش میزان آسیب با افزایش تنش برشی تجربه می‌کند (ون باکس تیال و همکاران 2008). در منطقه غیر خطی، خمیر بیلاکس دارای انطباق خزش ماکزیمم کوچکتری است، اما در همان زمان مقادیر بازیابی کل (و نسبی) از خمیر گاومیش کوهان دار امریکایی بیشتر است. انطباق بازیابی کل J_r^{max} در منطقه غیر خطی در حال حاضر مشخص شد که به خوبی با عملکرد تهیه‌ی نان ارتباط دارد (ون باکس تیال و همکاران 2011). با این وجود، اختلاف نظر‌های زیادی در مورد نحوه‌ی ارتباط J_c^{max} به عملکرد تهیه‌ی نان وجود دارد. برای آرد گندم دوروم در منطقه غیر خطی، ادواردز و همکاران (1999) دریافتند که حداکثر انطباق خزش آرد قوی پایین‌تر از آرد ضعیف است. در یک نشریه جدید، ادواردز و همکاران (2001) همین روند را برای خمیر گندم معمولی بررسی کردند، اما آزمایش خزش در منطقه خطی انجام شد. یافته‌های ما نشان می‌دهد که آرد قوی لزوماً حداکثر انطباق خزش پایین‌تری را در مقایسه با آرد ضعیف‌تر خود نشان نمی‌دهد. شکل 9a نشان می‌دهد که در ناحیه خطی، خمیر گاومیش کوهان دار امریکایی ضعیف J_c^{max} کمی کوچکتری از خمیر بیلاکس قوی دارد، که به خوبی موافق با این واقعیت است که مقدار $|G^*|$ تا حدودی

برای خمیر گاویش کوهان دار امریکایی بالاتر از خمیر بیلاکس در محتوای مطلوب آب است (شکل 7 را ببینید). علاوه بر این، ترتیب معکوس در مقدار J_c^{max} با توجه به قدرت آرد در حال حاضر در منطقه غیر خطی نیز مشاهده شده است (ون باکس تیال و همکاران 2008). در نهایت، وانگ و سان (2002) هیچ رابطه ای بین J_c^{max} و حجم نان در آزمون خزش فشرده سازی پیدا نکردند. از این رو، می توان نتیجه گرفت که تفاوت در قدرت آرد همیشه در حداکثر انطباق خزش منعکس نشده است. در مقابل انطباق بازیابی کل J_r^{max} حداکثر انطباق خزش J_c^{max} شامل اطلاعات در هر دو پاسخ الاستیک و چسبناک مواد است. با این حال، نمی توان به خوبی ارتباطی بین ویسکوزیته برشی با قدرت آرد کشف کرد (بحث قبلی را ببینید). علاوه بر این، اهمیت نسبی تفاوت در پاسخ الاستیک تمایل به کاهش شدید هرچه t_c افزایش می یابد (از اینرو خزش چسبناک تر رخ می دهد)، و در نتیجه رتبه بندی آردها نیز تحت تاثیر مقدار زمان نمونه خمیر قرار داده شده، تحت تنش خزش قرار دارد.

برای زمان عقب ماندگی R2 (همانند R1)، کاهش قابل توجهی را می توان با افزایش تنش برشی مشاهده (در هر دو فاز خزش و بازیابی). این بدین معنی است که هرچه سطح تنش افزایش یابد، در مرحله خزش حالت پایدار، رسیدن به تغییر شکل سریع تر و در فاز بازیابی، فرآیند بازیابی سریعتر به پایان می رسد. به طور کلی، زمان عقب ماندگی (تاخیر) برای خمیر بیلاکس و گاویش کوهان دار امریکایی به نظر می رسد که کاملاً مشابه باشد و در نتیجه نمی توان به عنوان وجه تمایز مورد استفاده قرار گیرد. در حالت کلی، داده های خزش- بازیابی ادواردز و همکاران (2001) و ون باکس تیال و همکاران (2011) نشان می دهد که حجم نان بالاتر می تواند از خمیرهایی که زمان عقب ماندگی (تاخیر) بالاتر دارد، به دست آید، اما در پایان هیچ همبستگی بین زمان عقب ماندگی و حجم نان ایجاد نشد. در مقابل، یک رابطه معکوس از زمان عقب ماندگی (تاخیر) با حجم نان گزارش شده است (کاوایی و همکاران 2006).

نتیجه گیری

نقد و بررسی های طولانی مدت در مقالاتی که رفتار خمیر در درجه اول تنها هنگامی توسط شبکه گلو تن تعیین معتبر است که تغییر شکل های بزرگ در نظر گرفته شود. در مقابل، در منطقه خطی، دانه های نشاسته نیز تاثیر روشنی در

رئولوژی خمیر، در هر دو جریان برشی و کششی و ممکن است تفاوت در محتوای گلوتن و کیفیت آن را بیوشانند. فقط آزمون‌های خزش بازیابی و کششی غیر خطی در نتیجه قادر به تشخیص به وضوح بین خمیر آرد قوی و ضعیف است. انطباق بازیابی کل و شاخص تنش سفت شدگی تبدیل به شاخص‌های کیفیت بسیار امیدوار می‌شوند. با این حال، از آنجا که تنها دو نوع آرد در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت، تحقیقات بیشتری به منظور بررسی اعتبار کاربرد آن‌ها برای سایر انواع آردها مورد نیاز است.

داده‌های کششی تک محوره با راه اندازی EVF یا SER در رئومتر برشی چرخشی تعیین شد. هر دو راه‌اندازها به منظور تنظیم تولید یک جریان کششی خالص در مقابل تجهیزات توسعه‌پذیر کیفر تجربی استفاده می‌شود. از این رو اطلاعات به دست آمده اجازه‌ی تعیین پارامترهای مواد درست را می‌دهد، که می‌تواند برای توسعه و اعتبار معادلات سازنده برای رئولوژی خمیر مورد استفاده قرار گیرد.

با داده‌های نوسانی خطی به عنوان نقطه شروع، مدل ژل بحرانی می‌تواند برای برآورد پاسخ خطی خمیر در هر دو حالت خزش و گسترش تک محوره مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، در روشنی عناصر بسیار غیر خطی و ترکیبات مایع معنی دار که رفتار خمیر را توصیف می‌کند، شرایط غیرقابل پیش‌بینی از مدل ژل بحرانی نشان داده شد که نسبتاً محدود است. در مقابل، مدل‌های رولتی پر شده دو حالت در مدل سازی رفتار خزشی بازیابی خمیر در هر دو حالت خطی و غیر خطی موفق بود، با وجود این واقعیت که خمیر دارای طیف استراحت بسیار وسیع است.

References

- AACC International. (2000). *Approved methods of analysis*. St Paul: American Association of Cereal Chemists International.
- Amemiya, J.I., & Menjivar, J.A. (1992). Comparison of small and large deformation measurements to characterize the rheology of wheat flour doughs. *Journal of Food Engineering*, 16(1–2), 91–108.
- AOAC International. (1995). *Official methods of analysis of AOAC international*. Washington: Association of Official Analytical Chemists International.
- Belton, P.S. (1999). On the elasticity of wheat gluten. *Journal of Cereal Science*, 29(2), 103–107.
- Berland, S., & Launay, B. (1995). Shear softening and thixotropic properties of wheat flour doughs in dynamic testing at high shear strain. *Rheologica Acta*, 34(6), 622–625.
- Bloksma, A.H. (1975). Thiol and disulfide groups in dough rheology. *Cereal Chemistry*, 52(3s), 170r–183r.
- Bloksma, A.H. (1990). Dough structure, dough rheology and baking quality. *Cereal Foods World*, 35(2), 237–244.
- Delcour, J.A., & Hosenev, R.C. (2010). *Principles of Cereal Science and Technology*, (pp. 1–270). St Paul: American Association of Cereal Chemists International.
- Dobraszczyk, B., & Morgenstern, M.P. (2003). Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*, 38(3), 229–245.
- Dunnewind, B., Sliwinski, E.L., Grolle, K., & van Vliet, T. (2004). The Kieffer dough and gluten extensibility rig—an experimental evaluation. *Journal of Texture Studies*, 34(5–6), 537–560.
- Edwards, N.M., Dexter, J.E., Scanlon, M.G., & Cenkowski, S. (1999). Relationship of creep-recovery and dynamic oscillatory measurements to durum wheat physical dough properties. *Cereal Chemistry*, 76(5), 638–645.
- Edwards, N.M., Peressini, D., Dexter, J.E., & Mulvaney, S.J. (2001). Viscoelastic properties of durum wheat and common wheat dough of different strengths. *Rheologica Acta*, 40(2), 142–153.
- Edwards, N.M., Dexter, J.E., & Scanlon, M.G. (2002). Starch participation in durum dough linear viscoelastic properties. *Cereal Chemistry*, 79(6), 850–856.
- Edwards, N.M., Mulvaney, S.J., Scanlon, M.G., & Dexter, J.E. (2003). Role of gluten and its components in determining durum semolina dough viscoelastic properties. *Cereal Chemistry*, 80(6), 755–763.
- Gabriele, D., de Cindio, B., & D'Antona, P. (2001). A weak gel model for foods. *Rheologica Acta*, 40(2), 120–127.
- Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W.S., Courtin, C.M., Gebruers, K., & Delcour, J.A. (2005). Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 16(1–3), 12–30.
- Hibberd, G.E. (1970). Dynamic viscoelastic behaviour of wheat flour doughs III. The influence of the starch granules. *Rheologica Acta*, 9(4), 501–505.
- Jekle, M., & Becker, T. (2015). Wheat dough microstructure: the relation between visual structure and mechanical behavior. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(3), 369–382.
- Jones, I.K., & Carnegie, P.R. (1971). Binding of oxidised glutathione to dough proteins and a new explanation, involving thiol-disulphide exchange, of the physical properties of dough. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 22(7), 358–364.
- Kawai, H., Tanaka, F., Takahashi, H., Hashimoto, N., & Yamauchi, H. (2006). Relationship between physical properties of dough and expansion ability during breadmaking. *Food Science and Technology Research*, 12(2), 91–95.
- Keentok, M., Newberry, M.P., Gras, P., Bekes, F., & Tanner, R.I. (2002). The rheology of bread dough made from four commercial flours. *Rheologica Acta*, 41(1), 173–179.
- Khatkar, B.S., & Schofield, J.D. (2002a). Dynamic rheology of wheat flour dough. I. Non-linear viscoelastic behaviour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 827–829.

- Khatkar, B.S., & Schofield, J.D. (2002b). Dynamic rheology of wheat flour dough. II. Assessment of dough strength and bread-making quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 823–826.
- Kindelspire, J.Y., Glover, K.D., Caffè-Treml, M., & Krishnan, P.G. (2015). Dough strain hardening properties as indicators of baking performance. *Cereal Chemistry*, 92(3), 293–301.
- Kokelaar, J.J., van Vliet, T., & Prins, A. (1996). Strain hardening properties and extensibility of flour and gluten doughs in relation to breadmaking performance. *Journal of Cereal Science*, 24(3), 199–214.
- Kontogiorgos, V. (2011). Microstructure of hydrated gluten network. *Food Research International*, 44(9), 2582–2586.
- Kontogiorgos, V., Shah, P., & Bills, P. (2016). Influence of supramolecular forces on the linear viscoelasticity of gluten. *Rheologica Acta*, 55(3), 187–195.
- Laguna-Gutierrez, E., Van Hooghten, R., Moldenaers, P., & Rodriguez-Perez, M.A. (2015). Understanding the foamability and mechanical properties of foamed polypropylene blends by using extensional rheology. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(33), 42430/1–42430/14.
- Larsson, H., & Eliasson, A.-C. (1997). Influence of the starch granule surface on the rheological behaviour of wheat flour dough. *Journal of Texture Studies*, 28(5), 487–501.
- Larsson, H., Eliasson, A.-C., Johansson, E., & Svensson, G. (2000). Influence of added starch on mixing of dough made with three wheat flours differing in high molecular weight subunit composition: rheological behavior. *Cereal Chemistry*, 77(5), 633–639.
- Lauger, J., Wollny, K., & Huck, S. (2002). Direct strain oscillation: a new oscillatory method enabling measurements at very small shear stresses and strains. *Rheologica Acta*, 41(4), 356–361.
- Lefebvre, J. (2006). An outline of the non-linear viscoelastic behaviour of wheat flour dough in shear. *Rheologica Acta*, 45(4), 525–538.
- Letang, C., Piau, M., & Verdier, C. (1999). Characterization of wheat flour-water doughs I. Rheometry and microstructure. *Journal of Food Engineering*, 41(2), 121–132.
- Macosko, C.W. (1994). Viscous liquid, In Macosko, C.W. (Ed.) *Rheology: Principles, Measurements and Applications* (pp. 65–108). New York: Wiley-VCH.
- McNaught, A.D., & Wilkinson, A. (1997). *Compendium of Chemical Terminology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Meredith, P. (1966). Dependence of water absorption of wheat flour on protein content and degree of starch granule damage. *New Zealand Journal of Science*, 9(2), 324–330.
- Navickis, L.L., Anderson, R.A., Bagley, E.B., & Jasberg, B.K. (1982). Viscoelastic properties of wheat flour doughs: variation of dynamic moduli with water and protein content. *Journal of Texture Studies*, 13(2), 249–264.
- Ng, T.S.K. (2007). *Linear to Nonlinear Rheology of Bread Dough and its Constituents*. Ph.D. Thesis. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Ng, T.S.K., & McKinley, G.H. (2008). Power law gels at finite strains: the nonlinear rheology of gluten gels. *Journal of Rheology*, 52(2), 417–449.
- Ng, T.S.K., McKinley, G.H., & Padmanabhan, M. (2006). Linear to non-linear rheology of wheat flour dough. *Applied Rheology*, 16(5), 265–274.
- Petrofsky, K., & Hosney, R. (1995). Rheological properties of dough made with starch and gluten from several cereal sources. *Cereal Chemistry*, 72(1), 53–58.
- Phan-Thien, N., & Safari-Ardi, M. (1998). Linear viscoelastic properties of flour-water doughs at different water concentrations. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 74(1–3), 137–150.
- Safari-Ardi, M., & Phan-Thien, N. (1998). Stress relaxation and oscillatory tests to distinguish between doughs prepared from wheat flours of different varietal origin. *Cereal Chemistry*, 75(1), 80–84.
- Schofield, R.K., & Scott Blair, G.W. (1937). The relationship between viscosity, elasticity and plastic strength of a soft material as illustrated by some mechanical properties of flour dough IV. The separate contributions of gluten and starch. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 160(900), 87–94.

- Sentmanat, M.L. (2004). Miniature universal testing platform: from extensional melt rheology to solid-state deformation behavior. *Rheologica Acta*, 43(6), 657–669.
- Shih, W.-H., Shih, W.Y., Kim, S.-I., Liu, J., & Aksay, I.A. (1990). Scaling behavior of the elastic properties of colloidal gels. *Physical Review A*, 42(8), 4772–4780.
- Shogren, M.D., & Finney, K.F. (1984). Bread-making test for 10 grams of flour. *Cereal Chemistry*, 61(5), 418–423.
- Smith, J.R., Smith, T.L., & Tschoegl, N.W. (1970). Rheological properties of wheat flour doughs III. Dynamic shear modulus and its dependence on amplitude, frequency, and dough composition. *Rheologica Acta*, 9(2), 239–252.
- Sofou, S., Muliawan, E.B., Hatzikiriakos, S.G., & Mitsoulis, E. (2008). Rheological characterization and constitutive modeling of bread dough. *Rheologica Acta*, 47(4), 369–381.
- Steffe, J.F. (1996). *Rheological Methods in Food Engineering*, (pp. 1– 418). East Lansing: Freeman Press.
- Tanner, R.I., Qi, F., & Dai, S. (2008). Bread dough rheology and recoil I. Rheology. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 148(1– 3), 33–40.
- Tanner, R.I., Qi, F., & Dai, S. (2011). Bread dough rheology: an improved damage function model. *Rheologica Acta*, 50(1), 75– 86.
- Tanner, R.I., Qi, F., Uthayakumaran, S., & Dai, S.C. (2013). The effect of pre-test deformation on dough rheology. *Rheologica Acta*, 52(1), 33–38.
- Tomic, J., Torbica, A., Popović, L., Strelec, I., Vaštáček, Z., Pojić, M., & Rakita, S. (2013). Albumins characterization in relation to rheological properties and enzymatic activity of wheat flour dough. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(4), 805– 816.
- Uthayakumaran, S., Newberry, M., Phan-Thien, N., & Tanner, R.I. (2002). Small and large strain rheology of wheat gluten. *Rheologica Acta*, 41(1), 162–172.
- Van Bockstaele, F., De Leyn, I., Eeckhout, M., & Dewettinck, K. (2008). Rheological properties of wheat flour dough and the relationship with bread volume. I. Creep-recovery measurements. *Cereal Chemistry*, 85(6), 753–761.
- Van Bockstaele, F., De Leyn, I., Eeckhout, M., & Dewettinck, K. (2011). Non-linear creep-recovery measurements as a tool for evaluating the viscoelastic properties of wheat flour dough. *Journal of Food Engineering*, 107(1), 50–59.
- van Vliet, T. (2008). Strain hardening as an indicator of bread-making performance: a review with discussion. *Journal of Cereal Science*, 48(1), 1–9.
- Veraverbeke, W.S., & Delcour, J.A. (2002). Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 42(3), 179–208.
- Villegas, E., Pomeranz, Y., & Shellenberger, J. (1963). Effects of thiolated gelatins and glutathione on rheological properties of wheat doughs. *Cereal Chemistry*, 40(6), 694–703.
- Wang, F.C., & Sun, X.S. (2002). Creep-recovery of wheat flour doughs and relationship to other physical dough tests and breadmaking performance. *Cereal Chemistry*, 79(4), 567–571.
- Watanabe, A., Larsson, H., & Eliasson, A.-C. (2002). Effect of physical state of nonpolar lipids on rheology and microstructure of gluten-starch and wheat flour doughs. *Cereal Chemistry*, 79(2), 203–209.
- Weegels, P.L., Orsel, R., van de Pijpekamp, A.M., Lichtendonk, W.J., Hamer, R.J., & Schofield, J.D. (1995). Functional properties of low Mr wheat proteins. II. Effects on dough properties. *Journal of Cereal Science*, 21(2), 117–126.
- Winter, H.H., & Chambon, F. (1986). Analysis of linear viscoelasticity of a crosslinking polymer at the gel point. *Journal of Rheology*, 30(2), 367–382.
- Wyss, H.M., Miyazaki, K., Mattsson, J., Hu, Z., Reichman, D.R., & Weitz, D.A. (2007). Strain-rate frequency superposition: a rheological probe of structural relaxation in soft materials. *Physical Review Letters*, 98(23), 238303.
- Yang, Y., Song, Y., & Zheng, Q. (2011). Rheological behaviors of doughs reconstituted from wheat gluten and starch. *Journal of Food Science and Technology*, 48(4), 489–493.