

## طراحی آزمایش اندازه‌گیری درینج کف پودر سفیده تخم مرغ بر مبنای مدل‌سازی

### دینامیک جریان بین حباب‌ها

سمیرا یگانه‌زاد

استادیار گروه فرآوری مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد

s.yeganehzad@rifst.ac.ir

علی فائزبان

استادیار گروه طراحی ماشین‌آلات مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد

a.faezian@rifst.ac.ir

هاشم احمدی تیغ چی

دانشجو دکتری مهندس مکانیک- تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی

شاهرود، شاهرود

hashem7088@yahoo.com

### چکیده

این مقاله به طراحی آزمایش ساده و کاربردی برای اندازه‌گیری درینج مایع کف‌های آماده شده از پودر سفیده تخم مرغ مطابق با فرضیات مدل‌سازی دینامیک جریان مایع از میان حباب‌ها می‌پردازد. تحلیل جریان مایع از طریق کانال‌های ایجاد شده بین حباب‌های کف از دیدگاه تئوری منتهی به تشکیل معادله استاندارد درینج کف می‌گردد که یک مدل ساده از دینامیک جریان مایع بین حباب‌ها است. پس از اعمال ساده‌سازی در معادله دیفرانسیل درینج، حل تحلیلی برای نرخ درینج آزاد بر حسب پارامترهای قابل اندازه‌گیری به دست آمد. به منظور طراحی آزمایش بر پایه شرایط در نظر گرفته شده در مدل‌سازی، شیوه تولید کف یکنواخت کف از محلول پودر سفیده تخم مرغ و روش اندازه‌گیری مایع درین شده از درینج آزاد ستون کف منطبق حل مدل ارائه شده مشروح گردید. روش آزمایش طرح شده، برخلاف روش‌های مرسوم گذشته، علی‌رغم سادگی خطاهای کمتری را نیز در پی دارد. نتایج آزمایش پیشنهاد شده و مقایسه آنها با نتایج تئوری می‌تواند به خوبی در بررسی اثر روش‌های پایداری کف و کمی‌سازی پارامترهای تاثیرگذار بر درینج به کار برده شود.

**کلمات کلیدی:** آزمایش، مدل‌سازی، جریان مایع، درینج، کف، پودر سفیده تخم مرغ

### فهرست علائم

A	مساحت سطح مقطع	علائم یونانی
h	ارتفاع کف	$\alpha$ سطح بدون بعد
g	شتاب گرانش	$\mu$ لزجت دینامیکی
m	توان مکانیزم اتلاف	$\rho$ چگالی
p	فشار	$\sigma$ کشش سطحی
R	شعاع حباب	$\varepsilon$ کسر حجمی مایع
Re	عدد رینولدز	$\tau$ زمان بدون بعد
t	زمان	$\xi$ طول بدون بعد
u	سرعت مایع	$\zeta$ مقیاس طول مویبندی
$u_0$	پارامتر مشخصه سرعت	زیر نویس
v	سرعت ثابت	g گاز
V	حجم مایع درین شده	f مقدار نهایی
z	عمق	l مایع

## ۱- مقدمه

مطالعه پایداری کف‌ها در دهه‌های اخیر همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این امر به علت کاربرد فراوان کف‌ها در زمینه‌های مختلف مهندسی و علوم کاربردی است. پایداری کف که تأثیر مهمی در عملکرد آن‌ها دارد، از طریق ترکیب سه مکانیزم وابسته به زمان حاصل می‌شود: درینج<sup>۱</sup> مایع از طریق فیلم‌ها و کانال‌های جدا کننده حباب‌های کف که در چنین شرایطی حباب‌ها به یکدیگر متصل نمی‌گردند، اتصال حباب‌های مجاور به علت شکستن فیلم بین حباب‌ها که با تشکیل حباب‌های بزرگتر همراه است و تسهیم نامتناسب حباب‌ها به علت تفاوت فشار در لایه‌ها که گاز از فیلم حباب‌های کوچکتر به بزرگتر انتشار می‌یابد. اگرچه درینج مایع (آب اندازی کف) تنها یکی از عوامل مهم ناپایداری کف است، اما نزدیکترین روش برای یافتن عمر کف است. درینج کف جریان مایع از طریق کانال‌های تشکیل از منافذ بین حباب‌های کف است و با خروج مایع از پایین کف همراه است. این پدیده ناشی از جاذبه و فشار موینگی<sup>۲</sup> می‌باشد و البته با نیروهای لزجت<sup>۳</sup> نیز در تقابل است. معادله درینج کف، یک مدل ساده از دینامیک جریان مایع از طریق کانال‌های مرزهای پلاتیو<sup>۴</sup> [۱] بین حباب‌ها و گره‌ها<sup>۵</sup>، محل اتصال چهار کانال، توسط نیروی گرانش و گرادیان فشار موینگی است [۲]. در سال‌های گذشته، تحقیقات آزمایشگاهی [۳-۵] و تئوری [۶،۷] فراوانی پیرامون دینامیک درینج صورت پذیرفته است که موجب گزارش یافته‌های مهمی درباره جریان مایع در کف‌ها گردید. درینج آزاد<sup>۶</sup> از یک کف یکنواخت اولیه به سمت حالت تعادل یکی از اصلی‌ترین موضوعات مورد علاقه دانشمندان بوده‌است که در آن کف از ناحیه بالا با خشک شدن و نابودی مواجه می‌شود، در حالی‌که با خروج مایع از پایین آن همراه است [۸،۹].

از دیدگاه کاربردی یکی از کف‌های پر کاربرد، کف حاصل از همزدن سفیده تخم مرغ است، که در فرآوری مواد غذایی همچون تولید کیک و دسر، مورد استفاده بسیاری قرار می‌گیرد. این کاربردها به علت کف‌کنندگی خوب سفیده تخم مرغ به دلیل داشتن پروتئین‌های متنوع است [۱۰]. پایداری کف سفیده تخم مرغ در سال‌های گذشته مورد بررسی گسترده محققان قرار گرفته است. برای شناخت بیشتر کف سفیده تخم مرغ و ویژگی‌های درینج کف، مقاله‌ای توسط کایننگهام<sup>۷</sup> [۱۱] ارائه شده است. استیونسون<sup>۸</sup> و همکاران [۱۲] با اندازه‌گیری پروفیل کسر حجمی با استفاده از تصویربرداری رزونانس مغناطیسی، درینج آزاد کف سفیده تخم مرغ و با افزودن شکر را بررسی کردند. علاوه بر این، اثرات ساکارز و کلرید سدیم بر خواص کف سفیده تخم مرغ توسط رایکوس<sup>۹</sup> و همکاران [۱۳] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود ساکارز، باعث پایداری بیشتری کف می‌شود. در مجموع مطالعات قبلی ثابت کرده‌است که نرخ درینج تابعی از خواص فیزیکی-شیمیایی محلول پایه است، لذا روش‌های همچون اضافه کردن افزودنی‌ها به محلول‌های اولیه موجب بهبود پایداری کف نهایی می‌گردد. اما اغلب آزمایش‌های انجام شده در کارهای گذشته برای بررسی پایداری کف، یا صرفاً محدود به روش‌هایی بوده است که میزان درینج کف‌های مختلف با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند و یا با استفاده از روش‌ها و دستگاه پیچیده تصویربرداری بوده که پروفیل لحظه‌ای کسر مایع را در طول کف مشخص می‌کند. درحالی‌که هیچ کدام از این روش‌ها بر مبنای یک روش ساده و در عین حال قابل کاربرد برای کمی سازی تأثیر اصلاح پارامترهای موثر بر درینج بر اساس روابط تئوری نیستند.

هدف اصلی این مقاله پیشنهاد یک روش آزمایش ساده بر اساس شرایط فرض شده در مدلسازی دینامیک جریان مایع بین حباب‌ها، برای اندازه‌گیری درینج و پایداری کف پودر سفیده تخم مرغ است که می‌تواند برای بررسی روش‌های بهبود پایداری کف همچون اضافه کردن افزودنی‌ها به کار برده شود. مبنای طراحی آزمایش معادله استاندارد درینج کف است که مدلسازی جریان و حل معادله آن در پژوهشی توسط فائزبان و همکاران [۱۴] برای توصیف درینج آزاد ارائه شده است.

1 . Drainage

2 . Capillary

3 . Viscous

4 . Plateau borders

5 . Nodes

6 . Free drainage

7 . Cunnimgham

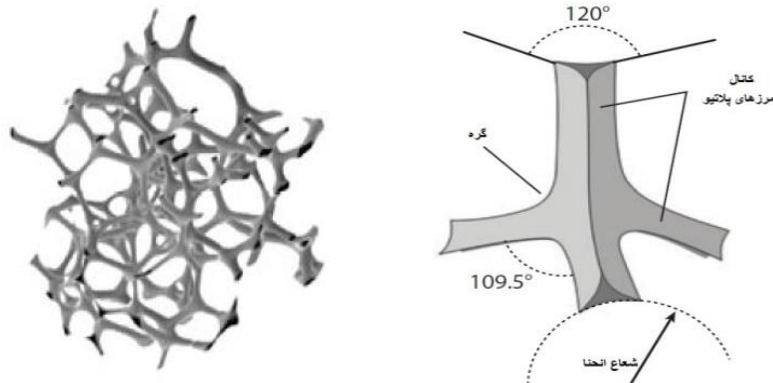
8 . Stevenson

9 . Raikos

## ۲- مدلسازی و اندازه‌گیری درینج

### ۲-۱- معادله استاندارد درینج

در این بخش دینامیک درینج کف، که در بسیاری از منابع همچون [۶،۱۵] آمده است، ارائه می‌گردد. معادله درینج یک مدل برای تعیین کسر مایع در کف بر حسب زمان است. در کف‌ها، مایع از طریق کانال مرزهای پلاتیو، که از اتصال سه حباب مجاور تشکیل می‌شوند، گره‌هایی که از اتصال چهار پلاتیو تشکیل شده‌اند (مطابق شکل ۱) و فیلم‌هایی که دو حباب مجاور را جدا می‌کنند، جریان می‌یابند. فرض اصلی در مدل استاندارد معادله درینج این است که اثر جریان مایع در لایه‌های بین دو حباب بر فرآیند درینج ناچیز باشد و جریان مایع در شبکه مرزهای پلاتیو رخ دهد. فرض دیگر در نظر گرفتن جریان پوزولی<sup>۱۰</sup> برای جریان مایع در کانال است که شرط عدم لغزش در مرزها اعمال می‌شود.



شکل ۱: مرزهای پلاتیو و گره‌های تشکیل شده از فضای بین حباب‌ها.

برای به دست آوردن معادله درینج، ابتدا یک کانال عمودی تشکیل شده از مرزهای پلاتیو با سطح مقطع  $A(z,t)$  که در آن  $z$  و  $t$  به ترتیب موقعیت عمودی به سمت پایین و زمان را نشان می‌دهند، را باید در نظر گرفت. از آنجا که درینج از طریق کانال مرز پلاتیو انجام می‌شود، سطح مقطع کانال به کسر حجم مایع  $\varepsilon(z,t)$  در کف مرتبط می‌گردد. به منظور تخمین  $A(z,t)$  یا به طور معادل مقدار نسبت حجم مایع  $\varepsilon$ ، معادله پیوستگی که نشان دهنده قانون بقا است، مطابق زیر اعمال می‌شود:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(uA) = 0 \quad (1)$$

سرعت مایع  $u$  در مرزهای پلاتیو تحت تاثیر ترکیبی از سه نیرو: نیروی گرانش، نیروی فشار موینگی به دلیل فشار پایین مایع در مرزهای پلاتیو و نیروی ناشی از اتلاف لزجت قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن جریان استوکس<sup>۱۱</sup> برای حرکت مایع در کانال‌ها، که یک فرض منطقی برای اعداد کوچک رینولدز ( $0.01 \leq Re \leq 1$ ) است، می‌توان بالانس نیروهای ذکر شده را به صورت زیر بیان کرد:

$$\rho g + (-\nabla p) + \mu \nabla^2 u = 0 \quad (2)$$

که جمله اول بیانگر نیروی گرانشی در واحد حجم  $\rho g$ ، جمله دوم اثر موینگی و معادل با  $-\left(\frac{\partial}{\partial z}\right) p_1 = -\left(\frac{\partial}{\partial z}\right) \left(\frac{\sigma}{r_c}\right)$  است و جمله سوم نشان دهنده نیروی لزجت است که به صورت  $-\frac{\mu u}{A}$  تقریب می‌گردد. ویسکوزیته  $\mu$  در این رابطه با ویسکوزیته مایع  $\mu_1$  متناسب است، اما ضریب تناسب آن بستگی به شکل کانال دارد. این ضریب برای مقطع مرزهای پلاتیو برابر ۵۰ می‌باشد [۱۴]. سرعت مایع  $u$  با حل معادله بالا بر حسب سطح مقطع  $A$  مطابق زیر به دست می‌آید:

<sup>10</sup> . Poiseuille flow

<sup>11</sup> . Stokes

$$u = \frac{1}{\mu} \left( \rho g A - \frac{C \sigma}{2\sqrt{A}} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \quad (۳)$$

معادله (۳) را می‌توان در معادله پیوستگی جایگزین کرد تا معادله استاندارد درینج بر حسب A به دست آید:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho g A^2 - \frac{C \sigma}{2} A^{1/2} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = 0 \quad (۴)$$

باید توجه داشت که مرزهای پلاتیو در عمل عمودی نیستند. از این رو نشان داده شده است که با به کار بردن ویسکوزیته مؤثر،  $\mu^* = 3\mu = 150\mu_l$  در معادله استاندارد درینج می‌توان شبکه مرزهای پلاتیو به طور واقعی در نظر گرفت. به این ترتیب، معادله دیفرانسیل غیرخطی برای تخمین سطح مقطع کانال  $A(z,t)$ ، که به طور معادل مقدار کسر حجم مایع را مشخص می‌کند، حاصل می‌گردد.

## ۲-۲- بی بعدسازی و شرایط مرزی

مساله مورد نظر در پژوهش حاضر تخمین تخلیه مایع از یک کف اولیه با ارتفاع کل h است. با استفاده از ترکیب پارامترهای تاثیرگذار می‌توان معادله استاندارد درینج را به فرم بدون بعد بازنویسی کرد. به این ترتیب، روند حل معادله و بحث درباره نتایج حاصل، در مقایسه با فرم اولیه معادله، ساده‌تر خواهد شد. کوهرل<sup>۱۲</sup> و همکاران [۶] متغیرهای بدون بعد را با استفاده از شعاع حباب معادل کره به شرح زیر ارائه کرده‌اند:

$$(z, t) = C^2 R^2 \alpha(\xi, \tau), \quad z = \frac{\sigma}{2\rho g R} \xi, \quad t = \frac{\mu^* \sigma}{2C^2 R^3 (\rho g)^2} \tau \quad (۵)$$

که  $\xi$  و  $\tau$  طول و زمان بدون بعد هستند. قابل ذکر است که در تحلیل جریان مایع داخل کانال می‌توان، سطوح می‌تواند متحرک باشد به طوری که جریان در کانال‌های مرزهای پلاتیو به صورت جریان پلاگ<sup>۱۳</sup> فرض شود [۱۶]. در این حالت، مقیاس سرعت مشخصه که توسط گرانش و مقادیر درینج تعیین می‌شود، به صورت  $A^{0.5}$ ، به جای A در معادله سرعت ظاهر می‌شود. بنابراین، دو شرایط مرزی در مرزهای پلاتیو می‌تواند اعمال گردد؛ شرط بدون لغزش (یا جریان پوزلی) و لغزش آزاد (جریان پلاگ). برای هر دو مورد، معادله درینج استاندارد بدون بعد را می‌توان به صورت بیان کرد:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \alpha^{m+1} - \frac{1}{2m+1} \frac{\partial \alpha^{m+1/2}}{\partial \xi} \right) = 0 \quad (۶)$$

که پارامتر m مقادیر m=1 را برای جریان پلاگ و m=1/2 را برای جریان با تلافات برشی در محل اتصالات کانال‌ها می‌گیرد. از آنجایی که معادله درینج کف یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی است، دانستن شرایط مرزی در بالا و پایین نمونه کف ضروری می‌باشد. در بالای کف  $\xi=0$ ، به دلیل فرض درینج آزاد، جریان ثابت و برابر صفر است:

$$\alpha^{3/2}(\tau) - \frac{\partial}{\partial \xi} \alpha(\tau) = 0 \quad (۶)$$

در پایین کف که معمولا در تماس با مایع قرار دارد، شرایط مرزی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\alpha(\tau) = 1 \quad (۷)$$

<sup>12</sup>. Koehler

<sup>13</sup>. Plug flow

کراینیک<sup>۱۴</sup> [۱۷] و سینت<sup>۱۵</sup> [۹] با در نظر گرفتن ساده‌سازی منطقی در معادله استاندارد درینج که کاهش غیر خطی بودن معادله را در پی دارد، روش حلی برای درینج آزاد ارائه نمودند. با استفاده از این تقریب، مدل را به معادله دیفرانسیل درجه اول تبدیل می‌کند و شرط جریان صفر در بالای فوم شرط مرزی موردنیاز است. بنابراین، نتیجه زیر از حل معادله به دست می‌آید:

$$A(z, t) = A_0 \begin{cases} \left(\frac{z}{u_0 t}\right)^{1/m} & z \leq u_0 t \\ 1 & z \geq u_0 t \end{cases} \quad (۸)$$

علاوه بر این  $u_0$  حداکثر سرعت مشخصه پیشروی خشک شدن کف است که از بالای فوم حرکت می‌کند و رابطه آن بر اساس سطح مقطع اولیه به صورت  $u_0 = 2\rho g A_0 / \mu^*$  نشان داده می‌شود. از این رو کسر حجم مایع را می‌توان برحسب مقدار اولیه آن  $\varepsilon_0$  به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon_0 \begin{cases} \left(\frac{z}{vt}\right)^{1/m} & z \leq vt \\ 1 & z \geq vt \end{cases} \quad (۹)$$

که ثابت سرعت برابر  $v = u_0(m+1)\varepsilon_0^m$  است. بنابراین میزان کسر مایع اولیه و شرایط مرزی جریان مایع بر سرعت آب‌اندازی تاثیر می‌گذارد. اما همانگونه که از رابطه بالا مشخص است کسر حجمی مایع درون کف برحسب زمان به صورت محلی به دست می‌آید و در هر موقعیتی از کف کسر مایع تغییر می‌کند. بررسی این رابطه به روش آزمایشگاهی بسیار پیچیده و نیازمند تجهیزات گران قیمت و دقیق می‌باشد. زیرا که سیستم اندازه‌گیری آزمایشگاهی باید توزیع کسر حجمی مایع را در طول کف در هر لحظه مشخص نماید و از طرفی چون ناپودی کف در طول کف یکنواخت نمی‌باشد این روش‌ها با وجود پیچیدگی دارای خطای بسیاری نیز می‌باشند. بهترین و ساده‌ترین روش برای اندازه‌گیری میزان درینج و بررسی عمر کف اندازه‌گیری مایع تخلیه شده از یک ستون کف می‌باشد. بنابراین با انتگرال‌گیری کسر حجمی مایع در طول کف می‌توان مایع درین شده را در طی زمان مدل‌سازی نمود. بنابراین حجم مایع جمع شده در پایین ستون کف در درینج آزاد با استفاده از رابطه قبل به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{V(t)}{V_f} = \begin{cases} \frac{1}{m+1} \left(\frac{vt}{h}\right) & vt \leq h \\ 1 - \frac{m}{m+1} \left(\frac{h}{vt}\right)^{1/m} & vt \geq h \end{cases} \quad (۱۰)$$

که  $V_f$  مقدار نهایی مایع درینج شده است که برابر با مقدار کل مایع در کف در شرایط اولیه است. از رابطه بالا مشخص می‌گردد که مقادیر مایع تخلیه شده به دو مرحله تقسیم می‌گردد. نرخ درینج در بازه زمانی اول به صورت خطی و زیاد می‌باشد در حالی که با گذشت زمان میزان درینج به صورت توانی است و با کاهش روبه‌رو می‌گردد. مزیت این رابطه سادگی و کاربردی بودن آن است که می‌تواند نرخ درینج را برحسب پارامترهای قابل اندازه‌گیری پیش بینی کند.

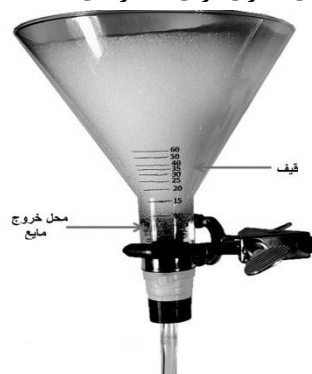
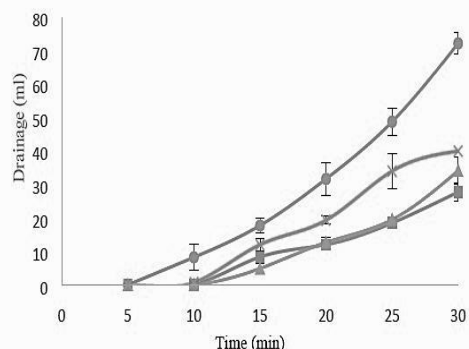
## ۲-۳- آزمایش

روش‌های مختلفی برای تولید کف‌های آبدار استفاده می‌گردد. یکی از این روش‌ها، تکان دادن شدید یک ظرف بسته پر شده از محلول می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های رایج تزریق حباب‌های گازی به یک محلول است. از آنجا که تولید کف یکنواخت از طریق این روش‌ها در طی زمان طولانی رخ می‌دهد، درینج از لایه‌های بالایی کف آغاز می‌گردد. از این‌رو، ناحیه بالای کف خشک‌تر از نواحی پایین می‌شود و باعث غیر یکنواختی کف می‌گردد. در پژوهش حاضر برای تولید مقدار زیادی کف یکنواخت، روش هم‌زدن مکانیکی پیشنهاد می‌گردد که باعث کاهش عدم قطعیت‌ها می‌شود. محلول ۱۰ درصد پودر سفیده تخم مرغ در آب مقطر مناسب‌ترین محلول برای تولید کف به کار می‌رود. هنگامی که حجم مشخصی از محلول در مدت زمان مشخص با دور ثابت در یک همزن کاسه‌دار هم‌زده شود، می‌تواند حجم مناسبی از کف یکنواخت مطابق پژوهش‌های تجربی گذشته [۱۸] برای اندازه‌گیری فراهم کند. در واقع این روش می‌تواند یکنواخت‌ترین کف را با حجم زیاد ایجاد کرد.

<sup>14</sup> . Kraynik

<sup>15</sup> . Saint

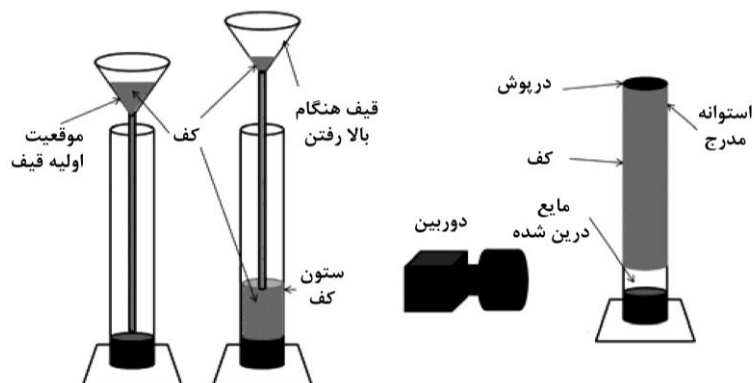
درینج آزاد، فرآیندی خود به خودی از تغییرات کسر مایع درون کف به علت گرانش، از حالت اولیه به سمت حالت تعادلی است. آزمایش درینج آزاد، با اندازه‌گیری حجم آب‌اندازی در انتهای ستون کف، با بررسی میزان کسر مایع در طول ستون کف بر حسب زمان و یا با اندازه‌گیری سرعت حباب در دیوار ستون کف صورت می‌پذیرد. برای تفسیر این داده‌ها به صورت کمی، باید به طور دقیق تعیین لحظه‌ای پروفیل کسر مایع و اتصال حباب‌ها را در نظر گرفت، زیرا تاثیرات قابل توجهی بر نرخ درینج دارند. کسر حجمی مایع در کف در طی گذشت زمان با استفاده از روش‌های مختلفی طی فروپاشی حجم مشخصی از کف تعیین می‌گردد. به‌عنوان مثال بسیاری از پژوهش‌ها بر اساس طیف‌سنجی NMR و یا ارزیابی عکس‌های MRI این کار را انجام داده‌اند. این دست روش‌ها نه تنها دشوارند و نیازمند دستگاه‌هایی پیچیده هستند بلکه به دلیل یکنواخت نبودن فروپاشی کف دارای خطای زیادی نیز می‌باشند. روش دیگری که در پژوهش‌های تجربی صنایع غذایی بسیار استفاده می‌شود این است که مقداری از کف با کمترین تنش درون یک قیف شیشه‌ای قرار گیرد. سپس قیف با یک گیره نگه داشته می‌شود آب‌اندازی به‌صورت قطره قطره درون ظرف مدرج ریخته می‌شود و میزان آن در طی زمان گزارش می‌شود (شکل ۲). این روش با وجود سادگی آن فقط می‌تواند برای مقایسه پایداری چند نمونه کف با تیمارهای مختلف به کار رود و منطبق مدلسازی‌های تئوری نمی‌باشد که بتواند اثرات تغییرات پارامترهای تاثیرگذار بر نرخ درینج را به صورت کمی و از تئوری‌ها بیان کند. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود نتایج حاصل از اندازه‌گیری به روش درینج آزاد از قیف پر شده از کف با پروفیلی که از مدلسازی پیش بینی شده است، تشابهی ندارد. علت آن است که در مدلسازی فرض شد که نمونه کف یکنواخت به صورت ستون با سطح مقطع ثابت باشد، از بالا جریانی وارد نگردد و پایین کف در تماس با مایع خارج شده باشد. این شرایط مرزی برای حل معادله استفاده گردید. همچنین حجم آب‌اندازی کف به صورت مداوم باید گزارش شود تا نمودار دقیق درینج برای مقایسه با مدل به دست آید. در حالی که در روش اخیر سطح مقطع ظرف ثابت نمی‌باشد و همچنین درینج در بازه‌های زمانی گسسته اندازه‌گیری می‌شود که نمی‌تواند نمودار دقیق لحظه‌ای درینج را نتیجه دهد. لذا این روش فقط از دیدگاه مقایسه‌ای و به کار بردن برخی روش‌های آماری برای تیمارهای مختلف یک کف مناسب است.



شکل ۲: (a) قیف پر شده از کف برای اندازه‌گیری درینج، (b) نتایج اندازه‌گیری درینج کف‌های سفیده تخم مرغ [۱۹].

بنابراین، در پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود که مایع تخلیه شده از تمام ستون یک کف یکنواخت در شرایط درینج آزاد اندازه‌گیری شود، که مطابق با مدل ارائه شده نیز می‌باشد. با به کار بردن این روش می‌توان تغییرات نرخ درینج با توجه مدل ارائه شده با جزئیات بیشتری تحلیل نمود و حتی اثرات هر کدام از عوامل تاثیرگذار کمی‌سازی شود. برای اندازه‌گیری درینج، کف‌ها با کمترین تنش و سریعاً به استوانه مدرج منتقل می‌شوند. پر کردن سریع و بادقت استوانه به این دلیل می‌باشد که تغییراتی در توزیع و شکل حباب‌ها ایجاد نشود و همچنین با توجه به مدل ارائه شده نرخ درینج در ابتدای عمر کف بسیار سریع می‌باشد لذا باید اندازه‌گیری از ستون کامل کف به سرعت آغاز شود تا خطاها کاهش یابند. استوانه از پایین به بالا با استفاده از قیف انعطاف‌پذیر مطابق شکل ۳ پر می‌شود. زمانی که استوانه کاملاً از کف پر می‌شود، با درپوش بسته می‌گردد تا اثرات فشار محیطی بر جریان مایع ناچیز گردد. این روش ایده گرفته شده از روش توصیف شده در مرجع [۴] می‌باشد. ارتفاع اولیه نمونه کف طبق مدلسازی صورت گرفته از پارامترهای تاثیرگذار است که باید به آن توجه نمود. با گذر زمان، مایع تخلیه

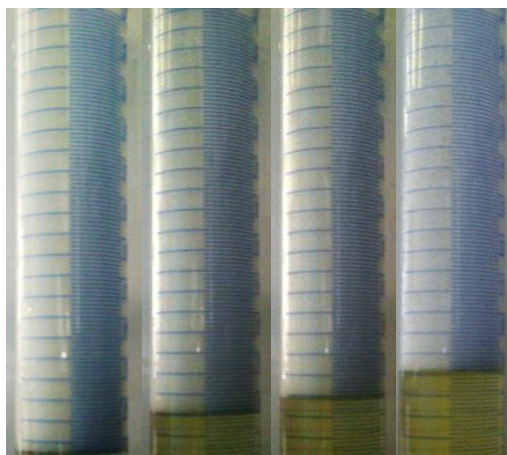
شده از کف در پایین استوانه مدرج جمع آوری شده و در پی آن ارتفاع کف کاهش می‌یابد. حجم مایع خروجی از کف  $V$  بر حسب زمان به عنوان نرخ درینج گزارش می‌شود.



شکل ۳: طرح‌واره روش پرکردن استوانه و اندازه‌گیری درینج.

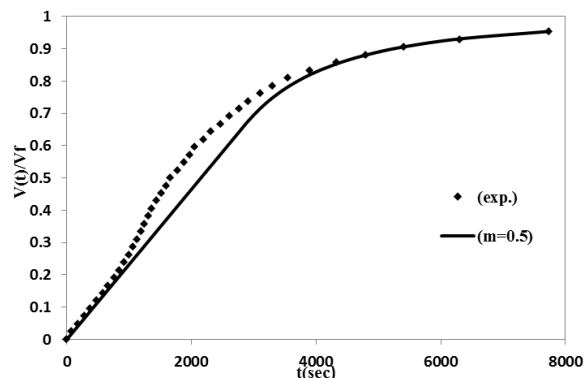
## ۲-۴- نتایج و بحث روی نتایج

مقاله حاضر با هدف آزمایش اندازه‌گیری میزان مایع تخلیه شده از کف یکنواخت بر حسب زمان و مقایسه آن با مدل ارائه شده است. حجم آب‌اندازی صورت گرفته از ستون کف توسط استوانه مدرج در طی زمان اندازه‌گیری شده است و این کار تا زمانی که کف به طور کامل از بین می‌رود، ادامه می‌یابد. به عنوان مثال، چند تصویر گرفته شده در طول درینج کف پودر سفیده تخم مرغ در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: عکس از فرآیند آب‌اندازی کف به ترتیب از چپ به راست ۱، ۱۵، ۳۰ و ۹۰ دقیقه پس از تشکیل.

به عنوان نمونه نمودار درینج کف سفیده تخم مرغ، که از آزمایش طراحی شده و مدلسازی صورت گرفته حاصل شده است، در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که نمودار درینج مایع به دست آمده از آزمایش، مطابق پیش بینی مدل ارائه شده (معادله ۱۰)، دارای شیب تقریباً ثابت و زیاد در ناحیه اول زمانی است و سپس با کاهش نرخ در ناحیه دوم زمانی است. بنابراین نتایج هر دو دیدگاه تقریباً مشابه یکدیگر هستند. البته نتایج نشان می‌دهد که بین داده‌های تجربی و نظری در اواسط مرحله اول تفاوت کمی وجود دارد. اختلاف این نتایج می‌تواند به دلیل ساده‌سازی در مدل تئوری ارائه شده نظیر کاهش ترم اثرات موینگی و در نظر گرفتن کف ایده‌آل کاملاً یکنواخت باشد.



شکل ۵: مقایسه نتایج مدل‌سازی و تجربی درینج کف پودر سفیده تخم مرغ.

در صنایع غذایی پایداری کف سفیده تخم مرغ در مدت زمان ۳۰ دقیقه اول بسیار مهم چون بعد از آن کف کیفیت کاربردی خود را از دست می‌دهد. در نتیجه، شیب بخش اولیه مدل  $U_0 E_0^m / h$  می‌تواند به عنوان یک مشخصه مهم مورد توجه قرار گیرد که نشان دهنده ترکیب تاثیر پارامترهای موثر بر نرخ درینج است. به این ترتیب، می‌توان تغییرات نرخ درینج هنگامی که خواص با استفاده از روش‌هایی همچون اضافه کردن مواد افزودنی اصلاح می‌شوند، با دو دیدگاه تئوری و تجربی مورد بررسی قرار داد و ضمن بررسی اعتبار دو دیدگاه با مقایسه نتایج، میزان تاثیرگذاری تغییر هر پارامتر به صورت کمی بیان شود.

### ۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش آزمایش اندازه‌گیری درینج کف سفیده تخم مرغ که شرایط آن با فرضیات صورت گرفته برای مدل‌سازی جریان بین حباب‌ها و حل نهایی معادله حاصل منطبق است، پیشنهاد گردید. نرخ درینج آزاد بر اساس حل معادله درینج شامل دو مرحله است: در ابتدا رفتار درینج بر حسب زمان خطی و در مرحله بعدی، رفتار درینج توانی می‌باشد که به مکانیزم اتلاف لزجت جریان در کانال‌ها بستگی دارد. برای اندازه‌گیری طبق این مدل، کف یکنواخت باید از همزدن محلول در همزن کاسه‌دار تشکیل شود و به سرعت با قیف انعطاف پذیر استوانه مدرج را پر کند. اندازه‌گیری مایع جمع شده در پایین کف در طی زمان برای بررسی نرخ درینج و پایداری کف‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### مراجع

- [1] D. Weaire, S. Hutzler, G. Verbist, and E. Peters, 1997, A review of foam drainage, *Advances in Chemical Physics*, Vol. 102, pp. 315-374.
- [2] S. A. Koehler, S. Hilgenfeldt, and H. A. Stone, 2000, A generalized view of foam drainage: experiment and theory, *Langmuir*, vol. 16, no. 15, pp. 6327-6341.
- [3] D. Weaire, S. Hutzler, S. Cox, N. Kern, M. D. Alonso, and W. Drenckhan, 2002, The fluid dynamics of foams, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 15, no. 1, pp. 65-73.
- [4] S. Jun, D. Pelot, and A. Yarin, 2012, Foam consolidation and drainage, *Langmuir*, vol. 28, no. 12, pp. 5323-5330.
- [5] R. J. Germick, A. S. Rehill, and G. Narsimhan, 1994, Experimental investigation of static drainage of protein stabilized foams -comparison with model, *Journal of food engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 555-578.
- [6] S. Koehler, H. Stone, M. Brenner, and J. Eggers, 1998, Dynamics of foam drainage, *Physical Review E*, vol. 58, no. 2, pp. 2097-2106.



- [7] M. Durand, and D. Langevin, 2002, Physicochemical approach to the theory of foam drainage, *The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics*, vol. 7, no. 1, pp. 35-44.
- [8] S. Magrabi, B. Dlugogorski, and G. Jameson, 2001, Free drainage in aqueous foams: model and experimental study, *AIChE journal*, vol. 47, no. 2, pp. 314-327.
- [9] A. Saint-Jalmes, M. Vera, and D. Durian, 1999, Uniform foam production by turbulent mixing: new results on free drainage vs. liquid content, *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 67-73.
- [10] M. S. Sadahira, F. C. R. Lopes, M. I. Rodrigues, and F. M. Netto, 2014, Influence of protein–pectin electrostatic interaction on the foam stability mechanism, *Carbohydrate polymers*, vol. 103, pp. 55-61.
- [11] F. Cunningham, 1976, Properties of egg white foam drainage, *Poultry Science*, vol. 55, no. 2, pp. 738-743.
- [12] P. Stevenson, M. D. Mantle, and J. M. Hicks, 2007, NMRI studies of the free drainage of egg white and meringue mixture froths, *Food hydrocolloids*, vol. 21, no. 2, pp. 221-229.
- [13] V. Raikos, L. Campbell, and S. R. Euston, 2007, Effects of sucrose and sodium chloride on foaming properties of egg white proteins, *Food Research International*, vol. 40, no. 3, pp. 347-355.
- [14] A. Faezian, S. Yeganehzad, and H. Ahmadi Tighchi, 2019, A simplified model to describe drainage of egg white powder foam containing additives, *Journal of Chemical Engineering Science*, Vol. 195, pp. 631-641.
- [15] G. Verbist, D. Weaire, and A. Kraynik, 1996, The foam drainage equation, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 8, no. 21, pp. 3715-3724.
- [16] A. Saint-Jalmes, and D. Langevin, 2002, Time evolution of aqueous foams: drainage and coarsening, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 14, no. 40, pp. 93-97.
- [17] A. M. Kraynik, 1983, *Foam drainage*, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA).
- [18] C. Pernel, E. Foegeding, P. Luck, and J. Davis, 2002, Properties of whey and egg white protein foams, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 204, no. 1, pp. 9-21.
- [19] M. Dabestani, and S. Yeganehzad, 2018, Effect of persian gum and xanthan gum on Foaming properties and stability of pasteurized fresh egg white foam, *Food Hydrocolloids*, vol. 87, pp. 550-560.