

# استفاده از تبخیر کننده فیلم ریزان و صعودی برای تغلیظ آب پرتقال بومی

مجتبی سمنانی رهبر<sup>۱</sup>، طاهره کاغذچی<sup>۲</sup>

1- دانشیار دانشگاه امام حسین (ع)

2- استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده

آب میوه‌ها به دلیل وجود ویتامین‌ها، پروتئین‌ها و مواد آلی دیگر نسبت به عملیات تبخیر حساس بوده و به همین دلیل تبخیر آنها باید در تجهیزاتی صورت پذیرد که کمترین زمان اقامت و حداکثر راندمان را دارا باشند تا امکان تخریب اجزاء آن به حداقل برسد. وجود این خصیصه در تبخیرکننده‌های لوله‌ای فیلم ریزان و صعودی آنها را برای تغلیظ آب میوه بسیار مناسب ساخته است. در این تحقیق تغلیظ آب پرتقال بدست آمده از مناطق شمالی ایران در یک پایلوت نیمه صنعتی متشکل از یک تبخیرکننده دو مرحله‌ای حاوی فیلم ریزان و صعودی انجام داده و تغییرات ضخامت فیلم مایع، ضرایب انتقال حرارت و زمان اقامت سیال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات ضخامت فیلم مایع، ضریب انتقال حرارت و خواص نیدرودینامیکی و حرارتی سیال کاملاً در محدوده جریان آشفته است و می‌توان با انجام شش مرحله، آب میوه را به غلظت مناسب رساند و به حد استاندارد لازم برای نسبت غلظت کنسانتره به اسیدیته دست یافت.

کلید واژه‌گان: تبخیر، آب پرتقال، خلاء، فیلم ریزان، فیلم صعودی، ضریب انتقال حرارت، درجه بریکس

## 1- مقدمه

روشهای دیگر برتری دارد [1].  
تغلیظ آب میوه‌ها به منظور دستیابی به اهداف زیر انجام می‌شود:  
الف - امکان تولید محصول با کیفیت یکنواخت در فواصل زمانی مختلف (فصول مختلف) با توجه به فصلی بودن تولید آب میوه تازه  
ب - کاستن از نوسان قیمت به دلیل فصلی بودن تولید آب میوه تازه  
ج - افزایش ظرفیت تولید  
د - کاستن از بار فرآیند خشک کردن که گاهی در صنایع

صنعت تولید آب میوه از جمله صنایعی است که سهم مهمی در بازار صنایع غذایی دارد و برای حصول به رقابت مؤثر باید بتوان آنرا با کیفیت بالا ارائه نمود. این کیفیت باید با استمرار ارائه محصول در بازار توأم باشد که یکی از روشهای مناسب برای امکان ارائه مستمر این محصول، تولید آب میوه کنسانتره است. صرفنظر از روش آبیگری از میوه‌ها، آب میوه‌هایی که بدست می‌آیند با روشهایی از قبیل تبخیر، تغلیظ انجمادی و روش اسمزی تغلیظ می‌گردند که روش تبخیر به دلیل امکان دستیابی به غلظت‌های بالاتر، ظرفیت تولید بیشتر و اقتصادی بودن به

\* مسئول مکاتبات: [msrahbar@yahoo.com](mailto:msrahbar@yahoo.com)

آبمیوه‌سازی برای تولید محصولات پودری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ه - صرفه‌جویی در سرمایه‌گذاری با توجه به اینکه تجهیزات مربوط به تغلیظ آب‌میوه‌ها نسبت به سیستم ذخیره‌سازی و انبار کردن و نگهداری آب‌میوه تازه هزینه کمتری دربر دارد.

و - کاهش مخارج حمل و نقل زیرا کمیت مواد بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد [2].

از آنجائیکه آب‌میوه‌ها دارای درصد بالای از آب به مقدار حداقل 78% وزنی هستند افزایش غلظت اجزای جامد درون آنها توسط تبخیر و جداسازی آب صورت می‌پذیرد به دلیل حساسیت مواد موجود در آب‌میوه نسبت به حرارت معمولاً تبخیر در خلاء صورت می‌گیرد مقدار جامدات موجود در آب‌میوه می‌تواند سبب افزایش نقطه جوش آب میوه شود که میزان این افزایش با تغلیظ خوراک تغییر می‌کند افزایش نقطه جوش را می‌توان با رابطه (1) بیان کرد.

$$B.P.E = \frac{{}^0BX}{100 - {}^0BX} \quad (1)$$

معیار وجود اجزای جامد در آبمیوه‌ها درجه بریکس  ${}^0BX$  است که درصد وزنی مواد جامد در آبمیوه است از آنجائیکه مقدار اعظم جامدات درون آبمیوه را شکر به فرم‌های مختلف تشکیل می‌دهد گاهی درجه بریکس را بصورت درصد وزنی شکر موجود در آبمیوه تعریف می‌کنند. با تبخیر آبمیوه درجه بریکس آن افزایش می‌یابد که این امر خود سبب افزایش ویسکوزیته می‌گردد و افزایش ویسکوزیته به نوبه خود باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود.

مقدار حجم کنسانتره که با تبخیر آب از آب‌میوه تازه بدست می‌آید را می‌توان با رابطه (2) محاسبه نمود.

$$\frac{g}{G} = \frac{S_1 \times B}{S_2 \times b} \quad (2)$$

که  $G, B, S_1$  به ترتیب وزن مخصوص، درجه بریکس و حجم کنسانتره و  $g, S_2, b$  نیز وزن مخصوص، درجه بریکس و حجم آب میوه تازه می‌باشد [3].

نسبت  $\frac{{}^0BX}{[\text{acid}]}$  (نسبت غلظت آبمیوه به اسیدیته آن)، یکی از پارامترهای مهم در تغلیظ آبمیوه‌هاست. بر طبق استاندارد، این نسبت در آمریکا 16-17 و در کشورهای دیگر 13-14 است. اسیدیته آب پرتقال به اسید سیتریک بی آب باز می‌گردد و

مقدار آن نیز از تیتراسیون آب میوه با سود بدست می‌آید. غلظت مطلوب برای آب پرتقال کنسانتره حدود 42 درجه بریکس است [4].

پرتقال رسیده دارای غلظت بیشتری از جامدات محلول می‌باشد. پوست پرتقال دارای دی - لیمونن بعنوان جزء اصلی است و اجزای دیگر آن عبارتند از دی سیل آلدئید، سیترال، الکل اکتیل، لینانول. اسیدهای فرمیک، استیک، کاپریلیک، و کاپریک. وجود روغن حاصل از پوست پرتقال به مقدار کم درون آب میوه می‌تواند طعم مناسبی به آن بدهد اما در صورت بسته‌بندی آب میوه در قوطی، وجود مقادیر کم نیز بدلیل تبدیل دی لیمونین به سینول باعث تلخی در مزه و طعم می‌گردد. لیمونن، بتامیرسن، اتیل ایزوالریت، متیل آلفا اتیل نرمال کاپروات، استات سیترونیل و اجزای دیگر نیز در ترکیب پرتقال وجود دارد. قندهای موجود در این میوه، گلوکز، لولوز و ساکاروز می‌باشند. پراکسیداز، ایندوفنل اکسیداز و پکتین استراز اجزای عمده آنزیمی موجود در پرتقال هستند.

هیپسیریدین که یک گلیکوسید است در میوه‌های خام نسبتاً بیش از میوه‌های رسیده وجود دارد. ویتامین C (اسید اسکوربیک) ویتامین اصلی موجود در مرکبات است که مقدار آن با توجه به نوع، رسیده بودن و پارامترهای دیگر میوه تغییر می‌کند. با رسیده‌تر شدن میوه مقدار ویتامین مذکور کاهش می‌یابد. مقدار آن در آب پرتقال در محدوده 0/4 mg/ml - 0/25 متغیر است. اسید اسکوربیک در طی فرآیند و ذخیره‌سازی نسبتاً پایدار است. لیمونن نیز یکی از اجزای موجود در پرتقال است که بدلیل ایجاد تلخی، تولید آب میوه از میوه‌هایی که لیمونن آنها نسبتاً زیاد است خصوصاً در شکل بسته‌بندی با قوطی متداول نیست.

به دلیل حساسیت مواد موجود در آب‌میوه نسبت به حرارت معمولاً تبخیر در خلاء صورت می‌گیرد. چگونگی تغلیظ آبمیوه و به ویژه اثر رسوبات و غلظت مایع در ضرایب انتقال حرارت قبلاً توسط چندین محقق مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات قبلی عمدتاً بر روی استفاده از تبخیرکننده فیلم ریزان انجام گرفته و از تبخیرکننده فیلم ریزان و صعودی به صورت همزمان استفاده نشده است به ویژه آنکه خواص آب میوه بر روی عملکرد تبخیرکننده تاثیر می‌گذارد. در تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که می‌توان انواع آب پرتقال را توسط

ضریب انتقال حرارت مایع درون فیلم ریزان نیز با معادلات (12-15) ارائه شده‌اند [9 و 10]:  
جریان آرام:

$$h = 1.1 \left( \frac{k^3 g}{v^2} \right)^{0.33} \text{Re}^{-0.33} \quad (12)$$

جریان آرام موجدار:

$$h = 0.822 \left( \frac{k^3 g}{v^2} \right)^{0.33} \text{Re}^{-0.22} \quad (13)$$

جریان درهم:

$$h = 0.0038 \left( \frac{k^3 g}{3v^2} \right)^{0.33} \text{Pr}^{0.65} \text{Re}^{0.4} \quad (14)$$

$$\text{Pr} = \frac{cm}{k} \quad (15)$$

که در رابطه فوق  $C$  ظرفیت حرارتی،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $v$  ویسکوزیته سینماتیکی،  $k$  ضریب هدایت حرارتی سیال هستند و  $g$  شتاب ثقل است.

در سالهای اخیر مطالعات آدومیت و رنز نشان می‌دهد که ویژگیهای سه‌بعدی ساختمان امواج در فیلم مایع کاملاً تحت تأثیر کنش‌های موجود در امواج است [11]. هیدرودینامیک تشکیل امواج در چند مرحله توسط چانگ مطالعه گردید. وی سعی کرد که با استفاده از معادله ارائه شده توسط کوراماتو و سیواشینسکی و همچنین معادله مربوط به امواج بلند، چگونگی رفتار فیلم مایع را در محدوده عدد رینولدز بسیار کم و عدد کاپیتزا زیاد توجیه نماید. او همچنین روابط ریاضی بین ضخامت فیلم مایع، سرعت امواج و خواص مایع ارائه نمود [12]. یو و همکارانش یک مدل برای تشریح دینامیک امواج بلند موجود در فیلم مایع ارائه دارند [13]. نوگین و بالاکوتایه این مطالعات را ادامه داده و مدل ساده‌تری برای حرکت فیلم مایعی با عدد رینولدز کم و در محدوده‌های مختلف از عدد کاپیتزا ارائه کردند [14]. موزا و همکارانش چگونگی جریان فیلم ریزان برای نفت سفید و آب را در حضور هوا بعنوان سیال گازی بصورت جریان متقابل بررسی نموده و تأثیر ابعاد لوله بر رسیدن به حالت طغیان در فیلم مایع را مورد بررسی قرار دادند [15]. موران و همکارانش نیز هیدرودینامیک حرکت روغن سیلیکون به شکل فیلم ریزان در یک سطح شیب‌دار و در حالت جریان آرام را توسط عکسبرداری مورد بررسی قرار

تبخیرکننده‌های با فیلم ریزان حداقل با 10 مرحله به غلظت 40 درجه بریکس رساند [5]. هدف این تحقیق تغلیظ آب پرتقال به دست آمده از میوه‌های بومی ایران (منطقه شمال ایران) با تبخیرکننده‌های با فیلم ریزان و صعودی و رسیدن به درجه بریکس 40 بوده است.

#### مرور مبانی تئوری و داده‌های پیشین

جریان فیلم ریزان تحت تأثیر نیروی لزجت، ثقل و کشش سطحی صورت می‌پذیرد عدد رینولدز در جریان فیلمی به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$\text{Re} = \frac{4U_{ave} d_p}{m} = \frac{4\Gamma}{m} = \frac{4Q}{p d v} \quad (3)$$

که  $d$  قطر لوله،  $v$  ویسکوزیته سینماتیکی و  $Q$  شدت جریان حجمی سیال است.

محدوده‌های گذر از حالت جریان آرام به جریان آرام موجدار و حالت درهم با معادلات (4-6) ارائه شده است:

$$\text{Re}_{L \rightarrow WL} = 0.61 \text{Ka}^{-\frac{1}{11}} \quad (4)$$

$$\text{Re}_{WL \rightarrow T} = 5800 \text{Pr}^{-1.06} = 0.215 \text{Ka}^{-0.333} \quad (5)$$

$$\text{Ka} = \frac{gm^4}{r a^3} \quad (6)$$

که  $\rho$  دانسیته،  $\mu$  ویسکوزیته،  $\alpha$  کشش سطحی و  $\text{Ka}$  عدد کاپیتزا است.

ضخامت فیلم مایع ریزان،  $\delta$ ، نیز در هر یک از انواع جریانات سیال به صورت رابطه‌های (7-11) ارائه شده است [6-8]:  
جریان آرام:

$$d = 0.91 \left( \frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \text{Re}^{0.333} \quad (7)$$

جریان آرام موجدار:

$$d = 0.93 \left( \frac{3vQ}{g} \right)^{0.333} \quad (8)$$

جریان درهم:

$$d = (0.5 \text{Re})^{0.5} \quad 0 \leq d \leq 5 \quad (9)$$

$$\text{Re} = 20d \text{Lnd} \quad 5 \leq d \leq 30 \quad (10)$$

$$\text{Re} = 4d(3 + 2.5\text{Lnd}) - 256 \quad d > 30 \quad (11)$$

## 2- مواد و روش ها

### 1-1- مواد

از آب پرتقال آب گیری شده در کارخانه افشره تنکابن (شمال ایران) برای تغلیظ استفاده گردید که مشخصات فیزیکی آنها در جدول (1) ارائه شده است [15].

جدول 1 مشخصات آب پرتقال مورد استفاده

در آزمایشات [18]

ظرفیت	هدایت	دانسسته، kg/m <sup>3</sup>	دمه، °C	درصد
حرارتی، kJ/kg°C	حرارتی، W/m°C		وزنی آب	موجود
3/987	0/577	1000	20	87

### 2-1- دستگاه ها

آزمایش ها در یک واحد نیمه صنعتی متشکل از تبخیرکننده های با فیلم صعودی و ریزان مطابق شکل (1) صورت پذیرفت. این واحد شامل دو لوله عمودی دوجداره است که یکی از آنها برای تبخیر به صورت فیلم صعودی و دیگری برای تبخیر به شکل فیلم ریزان مورد استفاده قرار گرفت که جدول (2) مشخصات هر یک از آنها را ارائه می کند. جریان خروجی از تبخیرکننده فیلم صعودی بعنوان خوراک تبخیرکننده فیلم ریزان بکار می رفت که توسط توزیع کننده از بالای لوله بصورت یک فیلم نازک بر روی جداره داخلی آن جریان می یافت. با استفاده از کندانسور، بخار آب ایجاد شده در فیلم ریزان به مایع تبدیل شده و بدینوسیله مقدار بخارات ایجاد شده طی عمل تبخیر بدست می آمد. ترموکوپل ها و فشارسنج ها شرایط عملیاتی در نقاط مختلف تبخیرکننده را ارائه می دادند. سیستم خلاء این واحد می توانست بصورت پایدار، خلأی به مقدار 70 kPa تولید نماید و بخار درون جداره (ژاکت) محیط گرماده لازم را فراهم می ساخت که بخار مورد استفاده در آزمایش ها دارای فشار نسبی 20-40 kPa و دمای °C 107- بود.

دادند و نشان دادند که حداکثر سرعت سیال از پیش بینی معادله ناسلت بیشتر ولی ضخامت فیلم کمتر است [16]. این محققین همچنین تأثیر خواص سیال بر روی ایجاد حالت طغیان در فیلم ریزان را با اندازه گیری ضخامت فیلم مایع در حالت های مختلف مورد بررسی قرار داده و معادلات جدیدی برای تخمین حالت طغیان ارائه کردند [17].

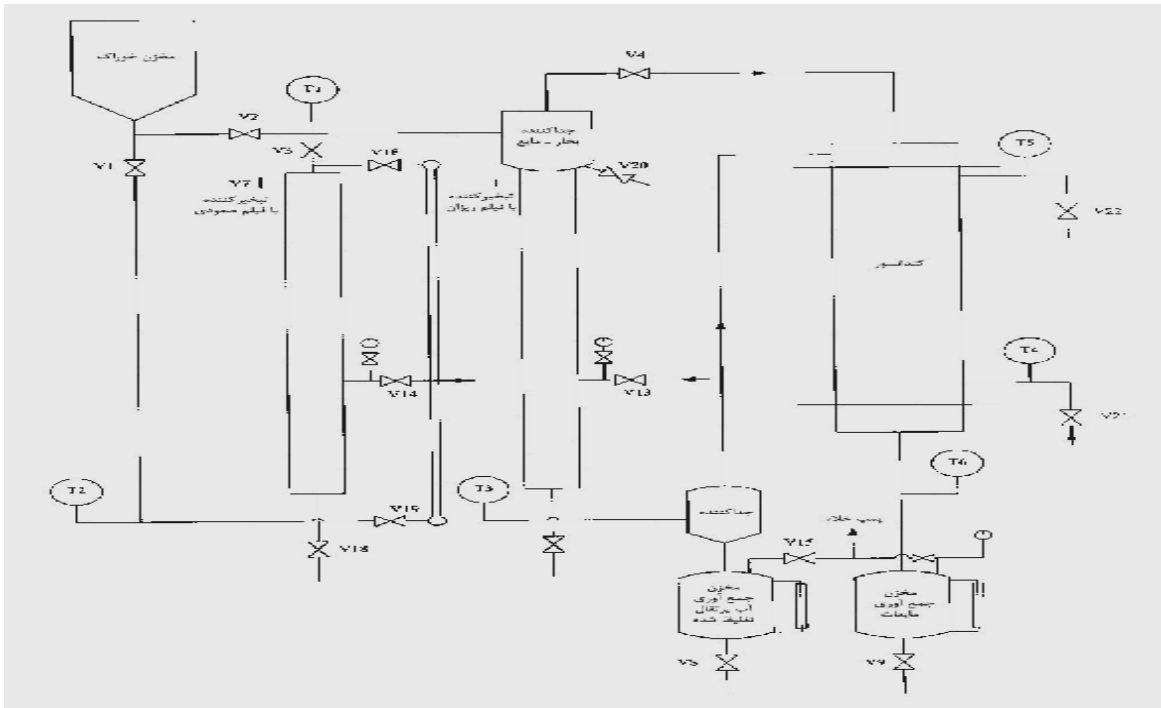
طراحی تبخیرکننده های فیلم صعودی غالباً بدلیل فقدان تئوری جامع لازم برای توضیح و تشریح تأثیر فاکتورهای مختلف در عملکرد این واحدها با اشکال روبرو بوده است روابطی که وجود دارد عمدتاً تجربی بوده و فقط به محدوده کوچکی از کاربردها مربوط می گردد. لوله های مورد استفاده در این تبخیرکننده دارای قطر بین 2 - 0/75 اینچ و طول 25 - 10 فوت هستند بطوریکه نسبت طول به قطر حدود 125 خواهد بود به منظور استفاده از حداکثر طول لوله برای تبخیر و راندمان مطلوب تر، خوراک باید در نقطه جوشش خود وارد تبخیرکننده گردد.

ضرایب انتقال حرارت سیال درون لوله با فیلم صعودی را می توان از معادله (16 و 17) محاسبه کرد:

$$Nu = (1.3 + 39d) Pr^{0.9} Re_L^{0.34} \left( \frac{r_L}{r_V} \right)^{0.25} \left( \frac{m_V}{m_L} \right) \quad (16)$$

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (17)$$

که اندیس  $L$  و  $V$  بیانگر فازهای مایع و گاز است حداقل سرعت بخار درون لوله باید 30 ft/s باشد و سرعت 100 ft/s برای عملیات در یک اتمسفر مناسب است حداقل شدت جریان خوراک ورودی برای لوله های با قطر حداکثر یک اینچ، سه برابر مقدار مایعی است که باید در طی تبخیر در لوله، بخار شود و برای داشتن یک جریان پایدار و دائمی از فیلم مایع درون لوله مقدار خوراک باید 1/5 برابر این مقدار حداقل باشد. بهترین نتیجه از عملیات در فیلم صعودی زمانی بدست می آید که نسبت طول لوله به قطر آن حدود 100 باشد [18 و 19].



شکل 1 شمای دستگاه نیمه صنعتی شامل تبخیرکننده فیلم صعودی و فیلم ریزان

جدول 2 مشخصات لوله فیلم ریزان و فیلم صعودی مورد استفاده در آزمایشات

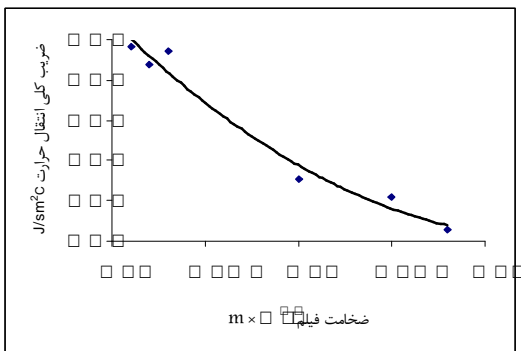
قطراسمی (cm)	نوع تبخیرکننده	تعداد لوله	قطرداخلی (cm)	قطرخارجی (cm)	ضخامت (cm)	طول لوله (m)	ضریب هدایت حرارتی لوله K W/m. °C
0/94	فیلم صعودی	یک عدد	1/23	1/69	0/23	1/51	18/7
0/75	فیلم ریزان	یک عدد	2/06	0/13	0/28	1/63	18/7

جدول 3 اطلاعات مربوط به تغلیظ آب پرتقال با فیلم ریزان

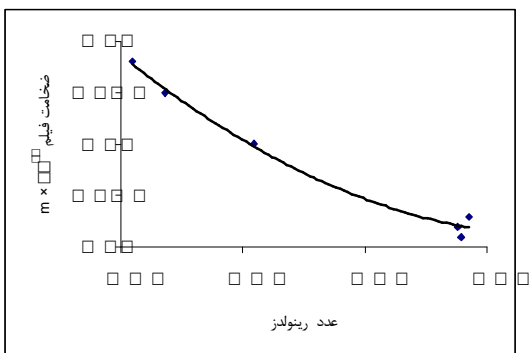
مرحله	شدت جریان خوراک، mlit/ min	غلظت اولیه، °BX	غلظت نهائی، °BX	فشار نسبی بخار جداره، kPa
1	470	10	17	27
2	470	17	24	27
3	470	24	30	27
4	470	30	35	27
5	470	35	38	27
6	470	38	40/7	27

### 1-3- روش‌های انجام آزمایش‌ها

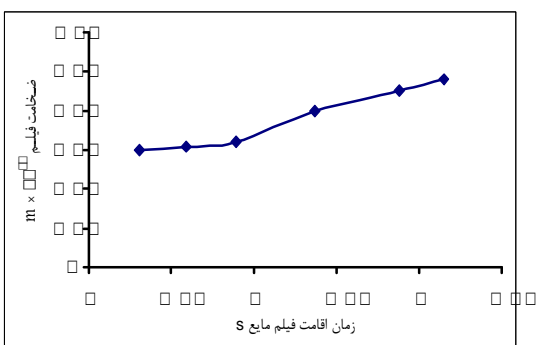
به منظور بررسی تغییرات نقطه جوش در اثر تغییر فشار، تغییرات نقطه جوش آب پرتقال در فشارهای پایینتر از اتمسفر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با توجه به اینکه از یک لوله بعنوان تبخیرکننده استفاده شده است، تغلیظ در چندین مرحله برای رسیدن به غلظت مورد نظر انجام گرفت که در هر مرحله از محصول مرحله قبل به عنوان خوراک استفاده شد و سعی گردید که برای حداکثر استفاده از طول لوله، خوراک در نقطه جوش خود وارد تبخیرکننده گردد. به منظور تعیین اسیدیته محصولات، از تیتراسیون یک سانتی‌متر مکعب از آب‌میوه‌های تغلیظ شده با سود 0/099 نرمال استفاده شده است.



شکل 4 تغییرات ضریب کلی انتقال حرارت بر حسب ضخامت فیلم در تغلیظ آب پرتقال با فیلم ریزان



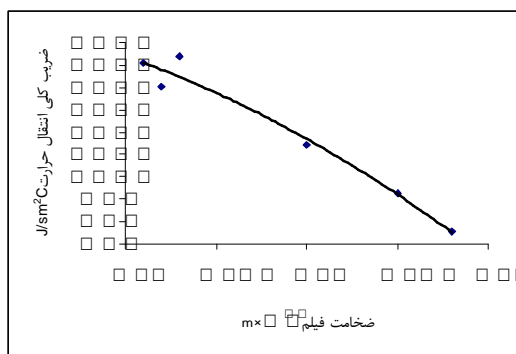
شکل 5 تغییرات ضخامت فیلم بر حسب عدد رینولدز در تغلیظ آب پرتقال با فیلم ریزان



شکل 6 تغییرات زمان اقامت فیلم مایع بر حسب ضخامت آن در تغلیظ آب پرتقال با فیلم ریزان

### 3- نتایج و بحث

شکل (2) تغییرات نقطه جوش آب پرتقال در فشارهای پایینتر از اتمسفر را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی تغلیظ آب پرتقال با فیلم ریزان در جدول (3) ارائه شده است. شکل (3) نتایج حاصل از تغلیظ آب پرتقال در تبخیرکننده فیلم ریزان را ارائه می‌دهد که در آن ضریب انتقال حرارت فیلم مایع بر حسب عدد رینولدز رسم شده است.



شکل 3 تغییرات ضریب انتقال حرارت فیلم مایع بر حسب ضخامت فیلم در تغلیظ آب پرتقال با فیلم ریزان

دمای  $45^{\circ}\text{C}$  در فشار خلاء به مقدار  $70\text{ kPa}$  بوده و بخار نیز دمای  $110^{\circ}\text{C}$  را داشت. شکل (7) تغییرات ضخامت فیلم برحسب عدد رینولدز در تغلیظ پرتقال با فیلم صعودی را نشان می‌دهد می‌توان دید که با وجود افزایش عدد رینولدز برای فیلم صعودی در مقایسه با فیلم ریزان، ضخامت فیلم مایع کمتر است و به همین دلیل انتظار می‌رود که ضریب انتقال حرارت فیلم صعودی در مقایسه با فیلم ریزان بیشتر باشد. شکل (8) تغییرات ضریب انتقال حرارت فیلم صعودی بر حسب عدد رینولدز را ارائه می‌کند. افزایش ضریب انتقال حرارت در فیلم صعودی، افزایش ضریب کلی انتقال حرارت کلی را در پی خواهد داشت (در مقایسه با فیلم ریزان). شکل (9) تغییرات ضریب کلی انتقال حرارت را بر حسب عدد رینولدز در تغلیظ آب پرتقال با فیلم صعودی نشان می‌دهد. اگر چه به نظر می‌رسد که فیلم صعودی در مقایسه با فیلم ریزان موثر عمل می‌کند ولی مشکلات عملیات در تغلیظ با فیلم صعودی سبب می‌شود که فیلم ریزان به دلیل سادگی عمل، بر فیلم صعودی رجحان داشته باشد. از طرف دیگر استفاده همزمان از فیلم صعودی و فیلم ریزان باعث می‌شود که ضمن استفاده از مزایای فیلم صعودی، کاستی‌های آن با استفاده از فیلم ریزان جبران شود.

جدول 4 تغییرات خواص فیلم مایع در طی تغلیظ آب پرتقال

دانسیته	عدد پرتال	ویسکوزیته، cp	ظرفیت حرارتی، $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$	هدایت حرارتی، $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$	خاصیت غلظت ( $^{\circ}\text{BX}$ )
1000	4/880	0/75	3/637	0/559	20
1115	6/902	1/10	3/20	0/510	40

جدول 5 مقدار عددی رینولدز حدی برای جریان آرام و

عدد Re	مقدار حدی	رژیم جریان
3		جریان آرام به آرام موج‌دار
339		جریان آرام موج‌دار به مغشوش

عدد رینولدز با استفاده از رابطه (3) و اطلاعات ارائه شده در جدول (4) محاسبه گردیده است. ضریب انتقال حرارت فیلم مایع ریزان (h) بسته به رژیم جریان و به کمک معادلات (12-14) بدست آمده است و ضخامت فیلم مایع نیز با توجه به رژیم جریان از روابط (7-11) و با در نظر گرفتن ضخامت فیلم ثابت محاسبه شده است. اطلاعات ارائه شده در شکل (3) نشان می‌دهد که در هر مرحله با افزایش غلظت مواد جامد موجود در آبمیوه (همراه با افزایش  $^{\circ}\text{BX}$ ) ویسکوزیته فیلم مایع افزایش می‌یابد که این امر سبب ازدیاد ضخامت فیلم مایع و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارت آن می‌شود. افزایش ویسکوزیته محلول همچنین سبب کاهش اغتشاش و گردابه‌های فیلم شده که به کاهش ضریب انتقال حرارت فیلم مایع کمک می‌کند. کاهش ضریب انتقال حرارت فیلم مایع سبب کاهش ضریب کلی انتقال حرارت می‌شود که این کاهش در شکل (4) نشان داده شده است. ضریب کلی انتقال حرارت به روش کلاسیک و با فرض سری بودن مقاومتهای حرارتی و یکسان بودن شار حرارتی از محیط گرماده تا فیلم ریزان محاسبه شده است. شکل (5) بیانگر تغییرات ضخامت فیلم مایع و برحسب عدد رینولدز است. می‌توان دید که با افزایش ضخامت فیلم عدد رینولدز کاهش می‌یابد و این کاهش تقریباً بصورت نمایی صورت می‌پذیرد. با توجه به محدوده عدد رینولدز برای جریانات مختلف مندرج در جدول (5) که از معادلات (4) و (5) بدست آمده می‌توان گفت که رژیم جریان سیال در طی عملیات تغلیظ آب پرتقال مغشوش است. شکل (6) تغییرات زمان اقامت فیلم مایع بر حسب ضخامت آن را نشان می‌دهد زمان اقامت فیلم مایع در هر مرحله با توجه به شدت حجمی خوراک و ضخامت فیلم مایع ریزان و با در نظر گرفتن فرضیه ثابت بودن ضخامت فیلم تعیین شده است. شکل (6) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت فیلم، زمان اقامت آن نیز افزایش می‌یابد که این افزایش بویژه در ضخامت‌های بیشتر، قابل ملاحظه تر است. آزمایش‌ها برای تغلیظ آب پرتقال در واحد متشکل از فیلم صعودی و ریزان به صورت توأم نیز انجام پذیرفت که جدول (6) اطلاعات تغلیظ آب پرتقال با این واحد را نشان می‌دهد. خوراک ورودی به تبخیرکننده صعودی دارای

#### 4- نتیجه گیری

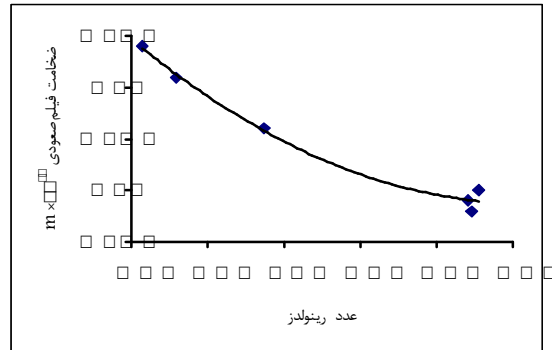
جدول (7) نشان می دهد که می توان توسط تبخیرکننده هایی فیلم ریزان و صعودی در شش مرحله می توان آب پرتقال را کنسنتره نمود و به غلظت 40 درجه بریکس و نسبت  $\frac{^{\circ}BX}{acid}$  برابر با 13 دست یافت و نشان می دهد که در صورت استفاده همزمان از تبخیرکننده های با فیلم ریزان و صعودی تعداد مراحل برای تغلیظ آب پرتقال در مقایسه با فرآیندهایی که تنها از فیلم ریزان استفاده می کنند به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. با توجه به قابلیت این تبخیرکننده ها، عمل تغلیظ در عین حال که راندمان مناسب را در بر دارد می تواند انعطاف پذیری لازم در گستره عملیاتی مورد نیاز را نیز دارا باشد.

جدول 7 اطلاعات مربوط به تغلیظ آب پرتقال توسط فیلم ریزان

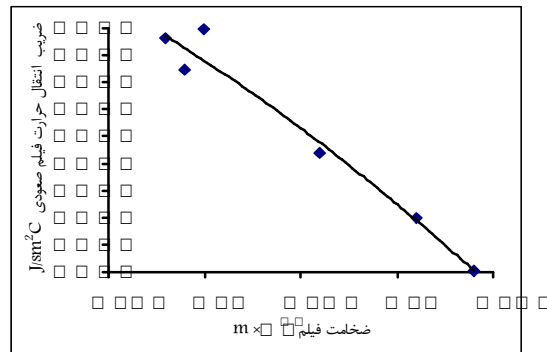
تعداد مراحل	غلظت اولیه، $^{\circ}BX$	غلظت نهایی، $^{\circ}BX$	اسیدیته، g/100cc	$^{\circ}BX$ acid
6	10	40/7	3/1	13/2

#### 5- منابع

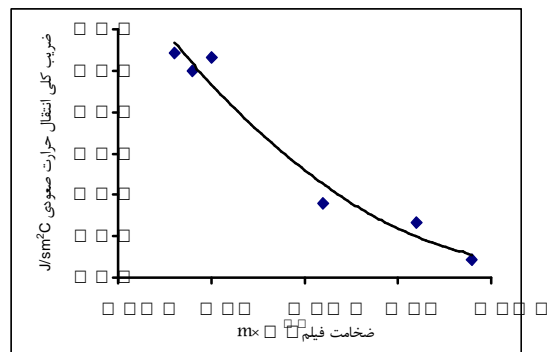
- [1] Sizer E.C., et al., "Maintaining flavor and nutrient quality of aseptic orange juice", Food Tech., p. 152, 1988.
- [2] Heldman K. D., "Food process engineering", 2<sup>nd</sup> Ed., Chap. 5, 1981.
- [3] Constenla T. D., et al., "Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature", J. Food. Sci., vol.54, no. 3, p. 663, 1989.
- [4] Rao A. M., et al., "flow properties of concentrated juices at low temperature", Food Tech., p. 113, 1984.
- [5] Kim H. B., Tadimi C. C., Singh R. K., "Heat transfer in a plate exchanger during



شکل 7 تغییرات ضخامت فیلم بر حسب عدد رینولدز در تغلیظ آب پرتقال با فیلم صعودی



شکل 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت فیلم صعودی بر حسب ضخامت فیلم در تغلیظ آب پرتقال با فیلم صعودی



شکل 9 تغییرات ضریب کلی انتقال حرارت بر حسب ضخامت فیلم در تغلیظ آب پرتقال با فیلم صعودی



- [13] Yu L.-Q., Wasden F. K., Dukler A. E., Balakotaiah V., "Nonlinear evolution of waves on falling films at high Reynolds numbers", *Phys. Fluids*, vol 7, pp. 1886-1902, 1995.
- [14] Nguyen L. T., Balakotaiah V., "Modeling and experimental studies of wave evolution on free falling films", *Phys. Fluids*, vol. 12, pp. 2236-2256, 2000.
- [15] Mouza A.A., Paras V.S., Karabelas J.A., "The influence of small tube diameter on falling film and flooding phenomena", *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 28, pp. 1311-1331, 2002.
- [16] Moran K., Inumaru J., Kawaji M., "Instantaneous hydrodynamics of a laminar wavy liquid film", *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 28, pp. 731-755, 2002.
- [17] Mouza A. A., Pantzali N. M., Pars V.S., "Falling film and flooding phenomena in small diameter vertical tubes: The influence of liquid properties", *Chem. Eng. Sci.*, vol. 60, pp. 4081-4991, 2005.
- [18] Fellows J. P., "Food processing technology, principles and practice", Chap. 10, Ellis Horwood limited, 1990.
- [19] Rao.A. M., et al., "Flow properties of concentrated juices at low temperature", *Food Tech*, p113, 1984.
- pasteurization of orange juice", *Journal of Food Engineering*, 42(2), p. 79-84, 1999.
- [6] Pierson F. W., Whitaker S., "Some theoretical and experimental observations of the wave structure of falling liquid films", *Ind. Eng. Chem. Fund.*, vol. 18, pp. 401-408, 1977.
- [7] Portalski S., Clegg A. J., "An experimental study of wave inception on falling liquid films", *Chem. Eng. Sci.*, vol. 27, pp. 1257-1265, 1972.
- [8] Chu K. J., Dukler A. E., "Statistical characteristics of thin, wavy films: part II. Studies of the substrate and its wave structure", *AIChE J.*, vol. 20, pp. 695-706, 1974.
- [9] Takahama H., Kato S., "Longitudinal flow characteristics of vertically falling liquid films without countercurrent gas flow", *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 6, pp. 203-215, 1980.
- [10] Alekseenko S. V., Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G., "Wave formation on vertical falling liquid films" *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 11, pp. 607-627, 1985.
- [11] Adomeit P., Renz U., "Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films", *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 26, pp. 1183-1208, 2000.
- [12] Chang H. C., "Wave evolution on a falling film" *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 26, pp. 103-136, 1994.