

## مطالعه تاثیر جهت و سرعت وزش هوا بر دمای بیسکویت های سبوسدار روی خط خنک کاری واحد صنعتی نان قدس رضوی

علی صنایعی<sup>۱</sup>، امین بهزاد مهر<sup>۲</sup> و سید مسعود حسینی سروری<sup>۳</sup>  
Alisanayei2@yahoo.com

### چکیده

این مقاله حاصل یک کار تجربی است که با استفاده از داده های جمع آوری شده از کارخانه نان قدس رضوی زاهدان بدست آمده و از دو بخش کلی تشکیل شده است. در بخش اول این مقاله روند تغییر دمای بیسکویت های سبوسدار کارخانه صنایع غذایی قدس رضوی، در طول مرحله خنک کاری بصورت تئوری شبیه سازی شده است. مدل مبنای بکار رفته، معادله میدانی فوریه برای حالت گذرا می باشد، که روی یک بیسکویت نمونه روی نوار نقاله اعمال شده است. بدلیل ساختار خاص نوار نقاله های بکار رفته در خط خنک کاری بیسکویت ها از شرط مرزی عایق برای سطح زیرین بیسکویت ها استفاده شده است. برای سطح بالایی بیسکویت ها نیز مکانیزم های انتقال حرارت جابجایی آزاد، اجباری و تشعشعی را در نظر گرفته ایم. در ادامه برای درک میزان تاثیر هر کدام از مکانیزم های انتقال حرارت در روند تغییر دمای بیسکویت ها، مقدار هر کدام از ضرایب انتقال حرارت تشعشعی، جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری در طول نوار نقاله بصورت نمودار نشان داده شده است. در بخش دوم این مقاله به مطالعه میزان تاثیر پارامتر های جهت و سرعت وزش هوا بر کاهش دمای بیسکویت های سبوسدار روی خط خنک کاری واحد صنعتی نان قدس رضوی پرداخته و مقایسه اثر این پارامتر ها بر روند تغییر دما نشان داده شده است.

### کلیدواژه:

بیسکویت سبوسدار- خنک کاری بیسکویت- انتقال حرارت گذرا- توزیع دما- معادله فوریه

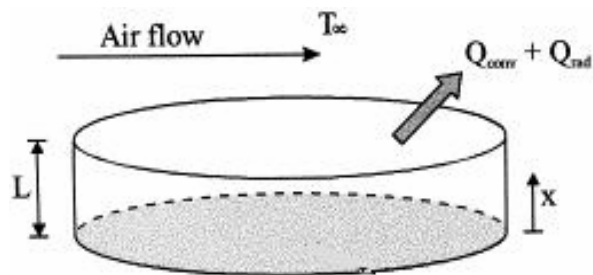
۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرضا، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، Amin.behzadmehr@eng.usb.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

## ۱- مقدمه

تقریب زده می شود. البته درستی این فرضیه را می توان از مقایسه داده های بدست آمده از این فرمول با داده های بدست آمده از حل مربوط به یک استوانه که ترکیبی از یک صفحه صاف نامحدود و یک استوانه نامحدود می باشد، اثبات کرد [۲].



شکل (۱): شکل شماتیک بیسکویت

خاطر نشان می سازد که از پدیده انتقال رطوبت از داخل بیسکویت به محیط اطراف صرف نظر شده است. زیرا طبق داده های برداشت شده از روی خط خنک کننده، رطوبت درون بیسکویت ها در مدت زمانی که از خروجی کوره تا محل بسته بندی جابجا می شوند، بطور متوسط به اندازه ۰/۵٪ وزن بیسکویت تغییر می کند، که بسیار کم می باشد. لذا از اضافه کردن ترم انتقال جرم به معادلاتی که در ادامه آورده شده است خوداری می شود.

معادله میدانی فوریه مربوط به یک سطح صاف نامحدود برابر است با:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

اگر شرایط مرزی و اولیه مشخص باشند، با حل این معادله می توان پروفیل دما را بصورت تابعی از مکان عمودی درون بیسکویت در زمانهای مختلف بدست آورد،  $T(x, t)$ . در سطح بالایی بیسکویت، انتقال حرارت هدایتی با حرارتی که توسط جابجایی و تشعشع دفع می شود برابر است. خاطر نشان می سازد پارامتر  $x$  از مرکز سطح پایینی بیسکویت اندازه گیری می شود.

بدلیل زیاد بودن عدد حاصل از تقسیم مقاومت حرارتی کل محیط زیرسطح پایینی بیسکویت به مقاومت حرارتی محیط روی سطح بالایی بیسکویت، از شرط مرزی عایق استفاده شده است. اثبات این ادعا در زیر آورده شده است:

## ۲-۱- مقاومت حرارتی محیط روی سطح بالایی بیسکویت

روی سطح بالایی بیسکویت انتقال حرارت بصورت جابجایی و تشعشعی وجود دارد. بنابراین برای محاسبه مقاومت محیط روی سطح بالایی بیسکویت از رابطه زیر استفاده می شود:

بیشتر بیسکویت های تازه پخته شده را قبل از مرحله بسته بندی و یا فرآیندهایی که در مراحل بعدی انجام می گیرد، بایستی به اندازه کافی خنک کرد. روش متداول خنک کاری صنعتی بدین صورت است که در خروجی فر، بیسکویت ها از روی نوار فر به یک نوار نقاله باز منتقل شده و در محیط داخلی کارخانه شروع به حرکت می کنند. در اثر تبادل حرارت با محیط اطراف بیسکویت ها بصورت طبیعی خنک می شوند. این کار تا هنگامی که بیسکویت ها گرم می باشند صورت می گیرد. در بعضی موارد خاص برای کنترل بیشتر روی دمای بیسکویت ها در انتهای فرآیند خنک کاری از جریان اجباری هوا در تونلهای خنک کننده استفاده می شود [۱]. البته روشهای زیادی برای خنک کاری بیسکویت ها وجود دارد. فرآیندهای ثانویه دیگری که روی بیسکویت ها انجام می گیرد شامل اضافه کردن کرم، مربا، ژله روی بیسکویت ها و یا پوشاندن بیسکویت ها با پوشش شکلات یا شکر و تخم مرغ می باشد. بنابراین آنچه از بالا می توان نتیجه گرفت این است که بیسکویت ها قبل از هرگونه فرآیند ثانویه ای باید تا حد امکان خنک شوند. موضوع اصلی این مقاله، بررسی میزان تغییر دمای بیسکویت ها با توجه به تغییر جهت و سرعت هوای عبوری از روی آنها می باشد. لذا شبیه سازی عددی روند تغییر دمای بیسکویت ها در طول نوار نقاله و همچنین محاسبه مقادیر مکانیزم های انتقال حرارت در امتداد نوار نقاله های خنک کاری کارخانه انجام گرفته است. صحت نتایج این شبیه سازی با مقایسه ای که با نتایج تجربی بدست آمده از روی خط انجام گرفته سنجیده شده است.

## ۲-۲- مدلسازی ریاضی

برای مدل سازی مسئله یک بیسکویت سبوسدار بعنوان نمونه انتخاب شده است. بیسکویت انتخاب شده یک جسم استوانه ایی شکل با قطر ۶۴ میلی متر و ضخامت ۷ میلی متر می باشد. سطوح بالایی و جانبی بیسکویت با محیط اطراف ارتباط دارند و جریان هوایی با سرعت ۰/۱۵ m/s و دمای ۳۰°C بر روی آن می وزد. هندسه مسئله مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. جریان هوا بصورت محوری بوده و به موازات سطح بالایی بیسکویت می باشد. بدلیل ابعاد بسیار کوچک بیسکویت در مقابل سطحی که هوا بر روی آن جریان دارد (نوار نقاله)، از تغییرات دما در راستای شعاعی بیسکویت نسبت به تغییرات آن در راستای عمودی (ضخامت بیسکویت) صرف نظر شده است. بنابراین مسئله بصورت یک بعدی، گذرا، و با تغییرات دمایی در راستای ضخامت بیسکویت در نظر گرفته شده است. با این فرض بیسکویت بصورت یک صفحه نامحدود

در اینگونه از محفظه ها جریان سیال بین دو سطح وجود نداشته و انتقال حرارت صرفا به صورت هدایتی صورت می پذیرد [۴]. محاسبات مربوط به مقاومت های حرارتی در ادامه آورده شده اند:

مقاومت تماسی<sup>۱</sup> [۴]:

$$R_c = \frac{1}{h_c \times A} \quad (5)$$

که:

$$h_c = \frac{1}{L_g} \times \left( \frac{A_c}{A} \frac{2 \times k_b \times k_p}{k_b + k_p} + \frac{A_v}{A} \times k_f \right) \quad (6)$$

در رابطه بالا  $k_p, k_b, k_f, A, L_g, A_v, A_c$  بترتیب برابر مساحت اتصال، مساحت فضاهای خالی، ضخامت فضای خالی، مساحت کل، قابلیت هدایت حرارتی سیالی که فضای خالی را پر کرده است، قابلیت هدایت حرارتی بیسکویت، قابلیت هدایت حرارتی نوار PVC می باشند.

$$h_c = \frac{1}{1 \times 10^{-3}} \times \left( \frac{1}{2} \frac{2 \times 0.21 \times 0.19}{0.21 + 0.19} + \frac{1}{2} \times 0.029 \right) = 114.25 \quad (7)$$

بنابراین:

$$R_c = \frac{1}{114.25 \times A} = 0.00875 / A \quad (8)$$

مقاومت حرارتی نوار نقاله PVC بالایی:

$$R_{p1} = \frac{\Delta x_p}{k_p \times A} = \frac{2 \times 10^{-3}}{0.19 \times A} = 0.0105 / A \quad (9)$$

مقاومت حرارتی فضای خالی بین نوار نقاله های بالایی و پایینی:

$$R_a = \frac{H_{en}}{k_a \times A} = \frac{20 \times 10^{-2}}{0.029 \times A} = 6.895 / A \quad (10)$$

مقاومت حرارتی نوار نقاله PVC پایینی:

$$R_{p2} = \frac{\Delta x_p}{k_p \times A} = \frac{2 \times 10^{-3}}{0.19 \times A} = 0.0105 / A \quad (11)$$

$$R_{s1} = \frac{1}{h_{s1} \times A} \quad (2)$$

در معادله بالا  $\overline{h_{s1}}$  متوسط ضریب انتقال حرارت کل محیط روی سطح بالایی بیسکویت در طول نوار نقاله می باشد. ضریب انتقال حرارت کل ترکیبی از ضرایب انتقال حرارت جابجایی طبیعی، اجباری و تشعشعی بوده و طبق رابطه زیر بدست می آید [۳]:

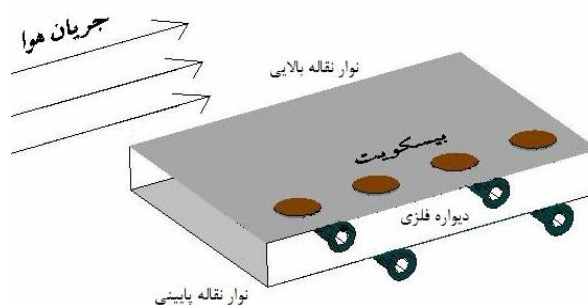
$$h = (h_n^3 + h_f^3)^{\frac{1}{3}} + h_r \quad (3)$$

در این معادله  $h_r, h_f, h_n$  بترتیب برابر ضریب جابجایی طبیعی، جابجایی اجباری و تشعشعی می باشند. با جایگذاری مقادیر مربوط به ضرایب انتقال حرارت در رابطه (۳)، مقاومت حرارتی بدین صورت بدست می آید:

$$R_{s1} = \frac{1}{h_{s1} \times A} = \frac{1}{15 \times A} = 0.07 / A \quad (4)$$

## ۲-۲- مقاومت حرارتی محیط زیر سطح پایینی بیسکویت

با توجه به شکل (۲) آشکار است که محیط زیر بیسکویت ها از چندین بخش بترتیب زیر تشکیل شده است:



شکل (۲): ساختار یک نوار نقاله

- ۱- سطح تماسی بین بیسکویت و لایه PVC اول با زبری در حدود ۱ میلی متر
- ۲- لایه PVC اول به ضخامت ۲ mm
- ۳- فضای خالی بین لایه های PVC بالایی و پایینی به ضخامت ۲۰ cm
- ۴- لایه PVC دوم به ضخامت ۲ mm
- ۵- هوای محیط در زیر لایه PVC دوم

طبق شکل (۲)، ساختار نوار نقاله، یک محفظه بسته را تداعی می کند که سطح بالایی آن گرم و سطح پایینی آن سرد می باشد،

مقاومت حرارتی محیط زیر نوار نقاله PVC پایینی:

$$R_{s2} = \frac{1}{h_{s2} \times A} = \frac{1}{10 \times A} = 0.1 / A \quad (12)$$

بنابراین مقاومت حرارتی کل برابر می شود با :

$$R_t = R_c + R_{p1} + R_u + R_{p2} + R_{s2} = 7.02475 / A \quad (13)$$

بنابراین با تقسیم مقاومت حرارتی محیط زیر بیسکویت به مقاومت حرارتی محیط روی سطح بالایی بیسکویت، بدست می آوریم:

$$\frac{R_t}{R_{s1}} = \frac{7.02475 / A}{0.07 / A} \approx 100 \quad (14)$$

همانگونه که می بینیم عدد بدست آمده نشان دهنده مقدار بسیار بزرگ مقاومت حرارتی کل محیط زیر بیسکویت به مقاومت حرارتی محیط روی سطح بالایی بیسکویت می باشد. بنابراین فرض وجود عایق در زیر بیسکویت ها منطقی بنظر می رسد. با توجه به موارد بالا شرایط مرزی بدین گونه بدست می آیند:

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

$$-k_b \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h[T(L, t) - T_\infty] \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)،  $h$  ضریب انتقال حرارت کل می باشد و از رابطه (۳) بدست می آید. حل مربوط به این سیستم توسط سری نا محدود زیر بدست می آید [۲]:

$$T(x) - T_\infty = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \left( \int_0^L (f(x) - T_\infty) \cos(\lambda_n x / L) dx \right) \cos(\lambda_n x / L)}{\lambda_n + \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n)} \exp(-\lambda_n^2 F) \quad (17)$$

که  $f(x)$  توزیع دمای درون بیسکویت را نشان می دهد. در سری بالا تنها ۲ جمله اول آن استفاده شده اند و از مابقی جمله ها بدلیل مقدار کم آنها صرف نظر شده است. از آنجایی که دمای سطح بالایی بیسکویت ها مورد نظر می باشد، حل مربوطه در  $x = L$  محاسبه شده است.

پارامترهای زیر در مدل بکار رفته استفاده شده است:

ضریب نفوذ حرارتی

$$\alpha = \frac{k_b}{\rho C_p} \quad (18)$$

عدد فوریه

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (19)$$

عدد بیوت

$$Bi = \frac{hL}{k_b} \quad (20)$$

در رابطه (۱۶)،  $\lambda_n$  مقدار ویژه بوده که بدین صورت بدست می آید:

$$\lambda_n \times \tan \lambda_n = Bi \quad (21)$$

معادله (۲۱) معادله ای غیر خطی است که جواب تحلیلی نداشته و برای حل آن بایستی از روشهای عددی استفاده کرد. در اینجا از روش نیوتن رافسون برای حل استفاده شده است.

روش های عددی برای حل، احتیاج به یک حدس اولیه دارند تا بتوانند از آن به عنوان یک مبنا استفاده کرده و در نهایت به جوابی همگرا گردند، لذا رابطه ای برای حدس اولیه که همگرایی خوبی را نتیجه دهد با توجه به اطلاعات موجود در مرجع [۲] بصورت زیر بدست آمده است:

$$\lambda_{0,i} = \left( (2i-1) \times \frac{\pi}{2} \right) - 0.5 \quad (22)$$

از آنجایی که معادله (۲۱) جوابهای زیادی می تواند داشته باشد، برای هر جواب بایستی یک حدس اولیه داشته باشیم. بنابراین از اندیس  $i$  در رابطه (۲۲) استفاده شده است. اندیس  $i$  مربوط به تعداد مقدارهای ویژه بوده که از عدد ۱ شروع می شود.

تعداد مقدارهای ویژه که در این مسئله محاسبه شده اند، ۲ عدد بوده که با استفاده از یک الگوریتم تکرار بدست آمده اند.

طبق داده های گرفته شده از آزمایشگاه کنترل کیفیت کارخانه، رطوبت درون بیسکویت ها در مدت زمانی که از خروجی کوره تا محل بسته بندی جابجا می شوند، بطور متوسط به اندازه ۰/۵٪ وزنی تغییر می کند، که بسیار کم می باشد. بنابراین کاملاً مشخص است که در مدل بالا پدیده هایی مانند تبخیر و میعان رطوبت، تغییر در ترکیبات درون بیسکویت در طول فرآیند خنک کاری برای مدل بالا رخ نمی دهد. همچنین وزن بیسکویت و ابعاد آن را قبل و

$$\overline{Nu}_f = \frac{\bar{h} \times (\ell)}{k_a} \quad (27)$$

$\ell$ ، بعد مشخصه بوده و از رابطه زیر بدست می آید:

$$\ell = \frac{A}{P} \quad (28)$$

$P, A$  برترتیب مساحت و محیط سطح می باشند. پانویس  $f$  نشان دهنده اینست که خواص مربوط به گروههای بدون بعد در درجه حرارت لایه نازک ارزیابی شده اند:

$$T_f = \frac{T_\infty + T_w}{2} \quad (29)$$

## ۲-۵- مقایسه ضریب های انتقال حرارت جابجایی اجباری و طبیعی

برای تعیین اثرات جابجایی آزاد معیاری بر اساس عدد ریچاردسون بصورت زیر وجود دارد [۴]:

$$Ri = \frac{Gr}{(Re)^2} = \frac{g \times (\frac{1}{T_f}) \times (T_w - T_\infty) \times d}{(u_\infty \times d)^2} > 10 \quad (30)$$

در رابطه بالا  $d$  بعد مشخصه بوده که بر اساس رابطه (۲۸) بدست می آید. در صورت برقراری رابطه بالا می توان از اثر جابجایی اجباری صرفنظر نمود. با جایگذاری عددهای مربوط به نمادهای درون رابطه بالا بدست می آوریم:

$$\frac{Gr}{(Re)^2} \gg 10 \quad (31)$$

همانگونه که نشان داده شده است، عدد بدست آمده برای کسر بالا از ۱۰ بیشتر بوده و می توان از اثر جابجایی اجباری صرفنظر نمود. ولی از آنجایی که می خواهیم اثر سرعت هوا را نیز بررسی کنیم، که این امر مستلزم در نظر گرفتن جابجایی اجباری است، لذا معادلات برای حالتی که تمامی مکانیزمهای انتقال حرارت وجود داشته باشند نوشته و حل شده است.

## ۲-۶- ضریب انتقال حرارت تشعشی

ضریب انتقال حرارت تشعشی از این رابطه بدست می آید:

$$h_{rad} = 0.85 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 1 \times [(T+273)^2 + (T_\infty+273)^2] \times [(T+273) + (T_\infty+273)] \quad (32)$$

بعد از فرآیند خنک کاری اندازه گیری کردیم، که داده های بدست آمده نیز درستی ادعای بالا را نشان دادند.

ضریب انتقال حرارت،  $h$  که در معادلات بالا آورده شده، ضریب انتقال حرارت کل بوده که از رابطه (۳) بدست می آید.

## ۲-۳- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری

همانگونه که می دانیم، بیسکویت ها روی نوار نقاله قرار دارند و همراه آن حرکت می کنند، در این حالت از روابط مربوط به جریان با سرعت ثابت در طول یک صفحه نیمه بینهایت با درجه حرارت دلخواه استفاده می شود. در مورد این مسئله، نوار نقاله بصورت یک صفحه نیمه بینهایت که دمای آن بصورت سری نمایی می باشد در نظر گرفته شده و از رابطه زیر برای بیان درجه حرارت سطح آن استفاده می شود [۵]:

$$T_s = T_\infty + A + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \times y^n \quad (23)$$

در رابطه بالا  $y$  فاصله از انتهای نوار نقاله،  $T_\infty$  دمای محیط و  $T_s$ ، دمای صفحه در نقاط مورد نظر،  $A$  و  $B_n$  ضرایب مربوط به توزیع دما می باشند. با داشتن رابطه (۲۳) می توان  $h_f$  را توسط رابطه زیر بدست آورد [۵]:

$$h_f = \frac{(0.332 \times k_a \times Pr^{1/3} \times Re_y^{1/2} \times (\sum_{n=1}^{\infty} n \times B_n \times \frac{4}{3} \times y^n \times \beta_n + A))}{y \times (A + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \times y^n)} \quad (24)$$

که در رابطه بالا:

$$\beta_n = \frac{\Gamma(\frac{4}{3} \times n) \times \Gamma(\frac{2}{3})}{\Gamma(\frac{4}{3} \times n + \frac{2}{3})} \quad (25)$$

$\Gamma(n)$  تابع گاما می باشد و مقادیر مربوط به آن در جداول آورده شده است،  $n$  نیز تعداد جمله ها می باشد.

در رابطه (۲۴)،  $k_a$  هدایت حرارتی هوا بوده و برابر  $0.029 \text{ W/m.K}$  می باشد.

## ۲-۴- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی

در این مورد از روابط زیر استفاده شده است:

$$\overline{Nu}_f = C \times (Gr_f \times Pr_f)^m \quad (26)$$

که:

شده از آزمایشگاه کنترل کیفیت کارخانه نان قدس رضوی بصورت زیر می باشد:

جدول (۳): درصد جرمی ترکیبات بیسکویت سبوسدار

اجزا	درصد جرمی
کربو هیدرات	٪ ۶۹/۹۷
پروتئین	٪ ۰.۸
چربی	٪ ۱۹
فیبر	—
الکل	٪ ۰
رطوبت	٪ ۳
خاکستر	٪ ۰/۰۳

معادله فوق ضریب هدایت حرارتی مواد غذایی را در ٪۱۵ مقادیر تجربی پیش بینی می کند. با جایگذاری مقادیر کسر جرمی در رابطه بالا بدست می آوریم:

$$k_b = 0.21 w/(m.K)$$

### ۳-۳- گرمای ویژه

گرمای ویژه را نیز با استفاده از کسر جرمی اجزاء با استفاده از رابطه زیر بدست می آوریم [۶]:

$$C_p = 1.424 \times M_c + 1.549 \times M_p + 1.675 \times M_{fat} + 0.837 \times M_a + 4.187 \times M_m \quad (34)$$

با جایگذاری مقادیر بالا، ظرفیت حرارتی برابر می شود با:

$$C_p = 1586 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

### ۴- روش حل

روش حل معادله (۱) بدین صورت است که نوار نقاله در طول به چندین قسمت تقسیم بندی شده است و در هر قسمت ضریب انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی ثابت فرض می شود. کاملاً مشخص است که هرچه تعداد تقسیمات بیشتر باشد دقت حل بیشتر می شود. دما در انتهای هر قسمت بعنوان دمای اولیه برای قسمت بعدی منظور می شود. الگوریتم بکاررفته برای حل از نوع تکرار بوده که با یک حدس اولیه شروع شده و در نهایت به جوابی همگرا می شود. داده های حاصل از کار تجربی و حل معادله تئوری را در شکل (۳) رسم نموده ایم. توجه شود که مبدا فاصله ها مکان شروع مرحله خنک کاری می باشد.

### ۳- مطالعه آزمایشگاهی

از آنجایی که مطالعات بر روی یک بیسکویت سبوسدار با قطر ۶۵ mm و ضخامت ۷ mm و وزنی در حدود ۹ گرم انجام می گردد. لذا خواص فیزیکی مرتبط با آن می بایست تعیین گردد. در اولین مرحله برای تولید این بیسکویت خمیر نمونه ای حاوی ۳۲۰ gr آرد، ۹۶ gr روغن، ۷۸ gr شکر، ۸۵ gr آب، ۴/۸ gr شیر خشک، ۰/۵ gr لستین، ۴ gr نمک، ۵ gr بیکر بنات سدیم، ۱۰ gr عصاره مالت، ۲/۲ gr اسید سیتریک، ۳۲ gr سبوس، ۳۰ gr پودر بیسکویت، ۱۱/۵ gr اینورت را در نظر گرفته شد و خواصی مانند جرم، حجم، چگالی، کسر جرمی اجزاء در آزمایشگاه تعیین گردیدند. در مرحله بعد دمای بیسکویت ها در مکان های مختلف در امتداد طولی نوار نقاله اندازه گیری شد. اندازه گیری دما توسط یک دماسنج مادون قرمز با دقتی در حدود ٪۱/۵ ± عدد خوانده شده بعلاوه ۱ °C انجام گرفته شد.

### ۳-۱- چگالی

چگالی که در اینجا استفاده می شود، چگالی توده ای است که از تقسیم جرم بیسکویت نمونه بر حجم آن بدست آمده است. حجم را با اندازه گیری ابعاد خارجی (قطر و ضخامت)، البته با فرض ثابت ماندن شکل بیسکویت های نمونه مشخص نموده ایم. این اندازه گیری حداقل ۲۰ مرتبه تکرار شده و نتایج آن در جدول زیر آورده شده است:

جدول (۲): چگالی بیسکویت سبوسدار با ٪۱۹ چربی

نوع بیسکویت	تعداد تکرار	چگالی m <sup>3</sup> .kg
چربی ٪۱۹ سبوسدار	۲۰	۵۵۱/۵۲ ± ۲/۲

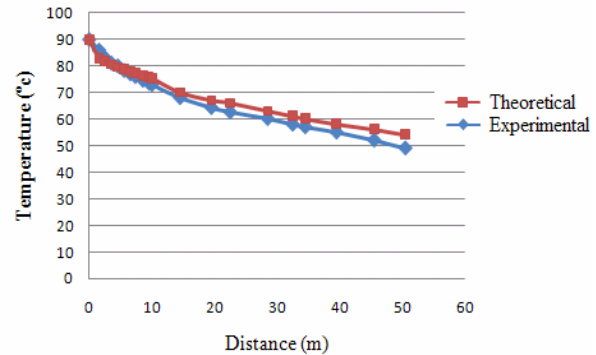
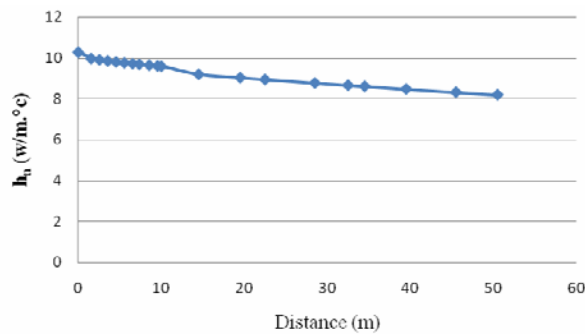
### ۳-۲- تقریب هدایت گرمایی

یک روش تقریب هدایت گرمایی می تواند با استفاده از کسر جرمی اجزاء آن ماده غذایی بدست آید. معادله تجربی که از داده های حاصل از ۴۳۰ ماده غذایی مایع و جامد بدست آمده است (سویت ۱۹۸۶) عبارتست از [۶]:

$$k_b = 0.25 \times M_c + 0.155 \times M_p + 0.16 \times M_f + 0.135 \times M_a + 0.58 \times M_m \quad (33)$$

در رابطه (۳۳)،  $M$  کسر جرمی اجزاء آن ماده غذایی را نشان می دهد و اندیس های  $c$  و  $p$  و  $f$  و  $a$  و  $m$  بترتیب نشان دهنده کربوهیدرات، پروتئین، چربی، خاکستر، رطوبت می باشند. مقدار کسر جرمی اجزاء بیسکویت سبوسدار بر اساس اطلاعات گرفته

می دانیم اختلاف دمای بین سطح جسم و محیط عامل اساسی در کم یا زیاد بودن مقدار ضرائب انتقال حرارت جابجایی طبیعی و تشعشعی می باشد. در شکل (۶) به بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری پرداخته شده است، همانگونه که در این شکل مشخص است، ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری مقادیر بسیار کمی دارد و همچنین مشخص است که هرچه به طرف انتهای نوار نقاله پیش برویم، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری افزایش می یابد. در ادامه به بررسی عامل این پدیده می پردازیم.



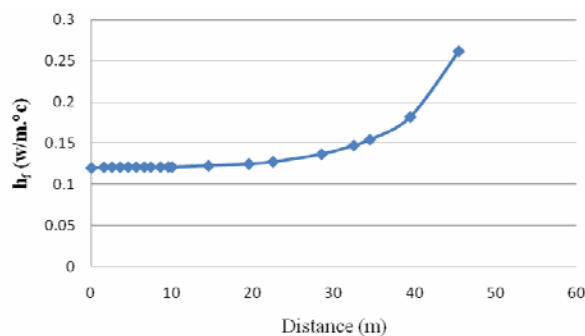
شکل (۳): مقایسه دماهای تئوری و تجربی در نقاط مختلف روی نوار نقاله

همانگونه که از شکل (۳) مشخص است، نمودار تئوری تطابق خوبی با نمودار تجربی دارد. این تطابق صحت فرضیات بکار رفته را اثبات می کند و نشان می دهد که مدل محاسباتی از دقت خوبی برای پیش بینی رفتار حرارتی بیسکویت تحت شرایط مختلف برخوردار می باشد.

#### ۵- بحث و نتیجه گیری

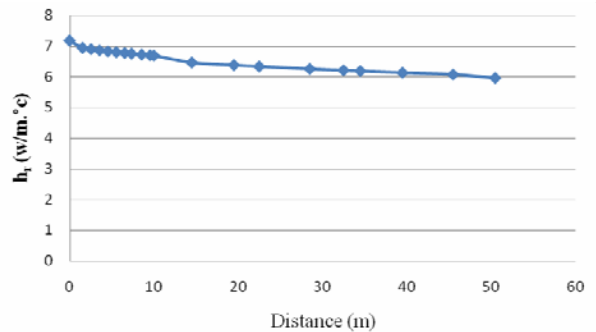
در این بخش به بررسی روند تغییر ضرایب انتقال حرارت جابجایی طبیعی، اجباری و تشعشعی در طول فرایند خنک کاری پرداخته می شود. شکل های (۴-۶) بترتیب نشان دهنده تغییرات ضریب انتقال حرارت تشعشعی، جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری در طول نوار خنک کننده می باشد.

شکل (۵): ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی در نقاط مختلف روی نوار نقاله



شکل (۶): ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری در نقاط مختلف روی نوار نقاله

همانطور که می دانیم یکی از پارامترهای اصلی در مکانیزم انتقال حرارت جابجایی اجباری سرعت هوا می باشد. در این مورد خاص که روی آن مطالعه می شود، سرعت هوا بسیار کم و در حدود  $0.15 \text{ m/s}$  می باشد. واضح است که هر چه سرعت کمتر شود مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری نیز کمتر می شود، پارامتر دیگر فاصله از مکانی است که لایه مرزی شروع می شود. در این مسئله مقدار استفاده شده برای پارامتر فاصله طول نوار نقاله می باشد. همان طور که مشخص است، طول نوار نقاله در مقایسه با موارد دیگری که در معادله (۲۴) استفاده شده اند بسیار زیاد می باشد، لذا هر چه فاصله زیادتر شود، ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری کاهش می یابد و هر چه فاصله نسبت به مبدا شروع لایه مرزی



شکل (۴): ضریب انتقال حرارت تشعشعی در نقاط مختلف روی نوار نقاله

همانگونه که در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است، هر چه فاصله ما نسبت به محل بسته بندی کمتر می شود مقدار ضرائب انتقال حرارت جابجایی طبیعی و تشعشعی در طول نوار نقاله کاهش پیدا می کند. علت این امر آنست که با کاهش دمای سطح بالایی بیسکویت ها در طول نوار نقاله، میزان اختلاف دمای سطح بیسکویت ها و دمای محیط نیز کاهش پیدا می کند. همانطور که

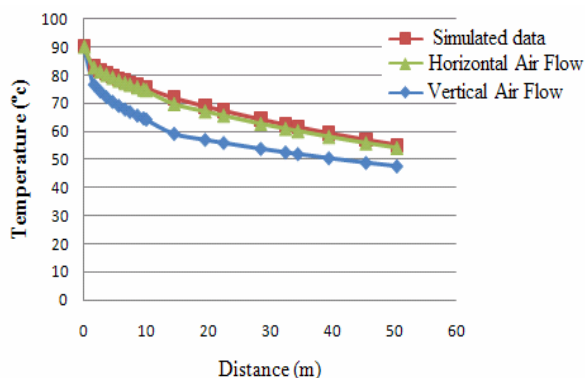
کمتر شود ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری افزایش می یابد. توجه شود که لایه مرزی از انتهای نوار نقاله شروع می شود.

## ۶- بررسی اثر تغییر سرعت وزش هوا

با مقایسه شکل‌های (۴) تا (۶) متوجه این نکته می شویم که اثر مکانیزم انتقال حرارت جابجایی اجباری در فرآیند خنک کاری بیسکویت در مقابل دیگر مکانیزم های انتقال حرارت بسیار کوچک می باشد. بنابر این اگر هدف افزایش سرعت خنک کاری باشد، یک روش می تواند افزایش مقدار مکانیزم انتقال حرارت جابجایی اجباری باشد. این افزایش از روش های مختلفی امکان پذیر می شود. یک روش، اضافه کردن سرعت جریان هوا می باشد. همانطور که قبلا گفته شد در حالت فعلی هوای عبوری از روی سطح بیسکویت ها سرعتی در حدود  $0.15 \text{ m/s}$  دارد که بسیار کم می باشد، بنابراین با اضافه کردن سرعت جریان هوا می توان مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری را افزایش داد. رابطه استفاده شده برای ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری در این حالت همان رابطه (۲۴) می باشد. نمودار دما- مکان به ازای سرعت افقی  $V=3 \text{ m/s}$  در شکل زیر نشان داده شده است.

$$Nu_d = 2 \times 0.332 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3} \quad (35)$$

بعد مشخصه در رابطه بالا قطر بیسکویت می باشد. جهت بررسی اثر تغییر جهت وزش هوا بر روی سطح نوار نقاله بر روند تغییر دمای بیسکویت ها، نمودار دما- مکان را به ازای سرعت  $V=3 \text{ m/s}$  برای دو روش ۱ و ۲ و حالت ابتدایی تغییر دمای بیسکویت ها رسم نموده ایم.

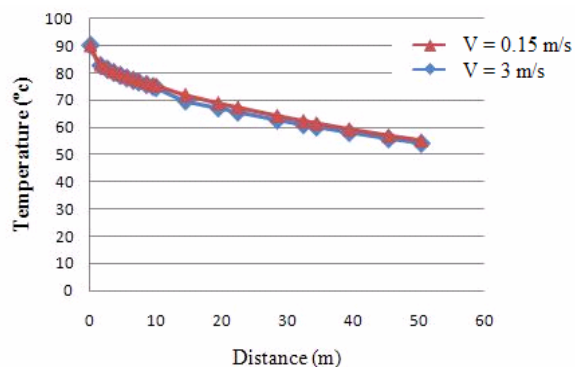


شکل (۸): مقایسه بین روشهای خنک کاری ۱ (شکل‌های مثلثی) و ۲ (شکل‌های لوزی) با حالت ابتدایی تغییر دمای بیسکویت ها (شکل‌های مربعی)

در شکل (۸) نمودار با شکل‌های لوزی، روند تغییر دمای ابتدایی بیسکویت ها (سرعت هوا  $0.15 \text{ m/s}$  و به موازات سطح بیسکویت ها می باشد)، نمودار با شکل‌های مثلثی دمای بیسکویت ها را در حالت جریان هوای موازی با سطح نوار نقاله و با سرعت  $3 \text{ m/s}$  و نمودار با شکل‌های مربعی دمای بیسکویت ها را برای جریان هوای با سرعت  $3 \text{ m/s}$  و در جهت عمود بر نوار نقاله نشان می دهد. همانگونه که از شکل (۸) کاملاً مشخص است با تغییر جهت وزش هوا و بدون تغییر سرعت می توان کاهش قابل توجهی در دمای بیسکویت را شاهد بود.

## ۸- نتیجه گیری

همانگونه که نشان داده شده است، افزایش سرعت جریان هوای به موازات سطح نوار نقاله، اثر زیادی بر کاهش دمای بیسکویت ها نداشته و نمی تواند راهکار مناسبی برای کاهش دما باشد و اگر



شکل (۷): بررسی اثر سرعت وزش هوا بصورت افقی بر روی بیسکویت ها

همانگونه که از شکل (۷) مشخص است با اینکه سرعت جریان هوا تقریباً ۲۰ برابر شده است ولی تغییر دمای محسوسی حاصل نشده است. دلیل آن هم طول زیاد نوار موجود در رابطه (۲۴) است که تاثیر سرعت را بسیار کاهش می دهد.

## ۷- بررسی اثر تغییر جهت وزش هوا

روش دیگر می تواند تغییر جهت جریان هوای روی سطح نوار نقاله باشد. در حالت فعلی جهت جریان هوا به موازات نوار نقاله می باشد، اگر جهت وزش هوا را بصورت عمود به سطح نوار نقاله در آوریم،



## ۱۱- مراجع

- [1] Wade, P., "Biscuits cookies and crackers", Elsevier Applied science, Vol. 1, london, 1988, pp. 32-44.
- [2] Kakac, S. and Yener, Y., "Heat conduction, Hemisphere Pub", 2007, pp. 20-140.
- [3] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., "Introduction to heat transfer, 3th ed.", John wiley & sons LTD, New York, 1996, pp. 35-200.
- [4] Holman, J. P., "heat transfer, 6th ed.", Mc Graw Hill Book Co, New York, 1986, pp. 20-200.
- [5] Kays, W. M., and Crawford, M. E., "Convective heat and mass transfer, 4th ed.", Mc Graw Hill Book Co, New York, 2004, pp. 255-256.
- [6] Tavakolipour, H., "Principle Of Food Engineering, first ed.", Mersa Co, Tehran, 1997, pp. 200-203.
- [7] Necati ozisik, M., "heat conduction, 2nd ed.", John wiley & sons LTD., New York, 1993, pp. 220-340.
- [8] Saleem, Q., wildman, R. D., Hountley, J. M. and Whitworth, M. B., "Material properties of semi-sweet biscuits for finite element modeling of biscuit cracking, International Journal of food engineering", Vol. 68, 2005, pp. 19-32.
- [9] Taylor, T. A. and Kramer, H. L., "Encyclopedia of Agricultural, food, and Biological engineering", Marcel Dekker. Inc, part c, 2003, pp. 157-161.
- [10] Held Man, D. R., "Encyclopedia of agriculture, Food, Biological Engineering", CRC Press, 2003, pp. 176-340.
- [11] Caro-Corrales, J., Cronin, K., Abodayeh, K., Gutierrez-Lopez, G. and Ordorica-Falomir, C., "Analysis of random variability in biscuit cooling, International Journal of food engineering", Vol. 54, 2002, pp. 147-156.
- [12] Manley, D., "Biscuit, Cookie and Cracker manufacturing manuals.", Ind. Eng. Chm. Res, Wood Head Publishing Limited, 1998, pp. 72-79.
- [13] Kim, M. H. and Okos, M. R., "Some physical, mechanical, and transport properties of crackers related to the checking phenomenon", Journal of food engineering, Vol. 40, pp. 300-400.

بخواهیم از این روش استفاده کنیم بایستی سرعت وزش هوا را بسیار بیشتر افزایش دهیم که این افزایش سرعت مشکلاتی از قبیل جابجا شدن بیسکویت ها از روی نوار نقاله بدلیل سرعت بالای هوای عبوری از روی آنها و یا دیگر افزایش میزان برق مصرفی را دارد. علاوه از لحاظ اقتصادی نیز مقرون بصرفه نخواهد بود. حال آنکه با تغییر جهت وزش هوا از حالت افقی به عمودی و با یک سرعت نسبتا مناسب می توان نتیجه بسیار بهتری در مورد کاهش دما بدست آورد و علاوه بر آن مشکلاتی مانند جابجایی و پخش بیسکویت ها روی نوار نقاله را نیز نخواهیم داشت.

## ۹- قدردانی

از وزارت محترم صنایع و معادن - طرح مطالعات کاربردی صنعتی و معدنی که با حمایت های مادی و معنوی خود انجام هرچه بهتر این پروژه را امکان پذیر نمودند کمال تشکر و قدردانی را داریم.

## ۱۰- فهرست علائم

- Bi: عدد بایوت  
 d: قطر بیسکویت  
 H: ضخامت بیسکویت  
 Fo: عدد فوریه  
 Pr: عدد پراتل  
 Re: عدد رینولدز  
 $\alpha$ : ضریب پخش حرارتی  
 p: چگالی  
 $H_{en}$ : فاصله بین لایه PVC بالایی و PVC پایینی  
 $\Delta x_p$ : ضخامت لایه PVC  
 $k_a$ : هدایت حرارتی هوا  
 $k_p$ : هدایت حرارتی PVC