

شبیه‌سازی CFD و بررسی اثر زاویه بافل در فرآیند خشک کردن پنل‌های گچی

عقیل قنبری، ابراهیم نجفی کانی^{*}، امیر حیدری

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه‌های کلیدی:

بافل، پنل گچی،
شبیه‌سازی CFD،
میزان خشک شدن،
خشک کن تونلی

Keywords:

Baffle,
Gypsum panel,
CFD simulation,
Drying rate,
Belt dryer

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

به دلایل گوناگون از جمله ساختار نامناسب خشک کن‌های تونلی، خشک شدن یکنواخت در پنل‌ها اتفاق نمی‌افتد و نیاز به اصلاح ساختار جریان در این خشک کن‌ها وجود دارد. بافل‌ها از جمله تجهیزاتی هستند که با اضافه شدن به ساختار خشک کن، به بهبود فرآیند خشک کردن کمک می‌کنند. هدف از این پژوهش، تلاشی برای شناسایی یک طرح مفهومی در جهت بهبود جریان هوا برای خشک شدن یکنواخت تر پنل‌های گچی است. تاثیر زاویه قرارگیری بافل و تغییر در هندسه خشک کن بر کاهش فشار، توزیع جریان و توزیع دما به همراه میزان رطوبت جسم در سطح پنل‌ها در محفظه هوای گرم خشک کن، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از بافل‌هایی به شکل مستطیل و با زاویه‌های گوناگون برای کمک به یکنواختی جریان استفاده شد. مدل $k-\epsilon$ realizible برای شبیه‌سازی جریان آشفته همراه با مدل‌سازی تعداد کم رینولدز (LRNM) و تابع دیواره برای منطقه لایه مرزی مورد استفاده قرار گرفت. زاویه بیشتر (۹۰ درجه) باعث افزایش سرعت، اختلاط و یکنواخت تر شدن جریان هوای روی صفحه‌های پنل نسبت به حالتی که دارای بافل با زاویه کمتر (۳۰ درجه) است، می‌شود. زاویه‌ی بیشتر بافل همچنین باعث افزایش مقدار فشار (۱۷۹ درصد)، میانگین سرعت (۱۵۰ درصد)، انرژی جنبشی تلاطم (۱۱٫۵ درصد) نسبت به حالت بافل با زاویه کمتر در جریان شد. بافل با زاویه کمتر نیز در این طراحی باعث شد مقادیر رطوبت و رطوبت نسبی در سطح (برای بافل با زاویه ۹۰ درجه در طول پنل ۳،۷۹۵۲ درصد و برای بافل با زاویه ۳۰ درجه مقدار ۳،۷۸۲۸ درصد) به میزان بیشتری کاهش یابد، ولی یکنواختی ایجاد شده در رطوبت این طراحی نسبت به زاویه ۹۰ درجه کمتر بود. این مطالعه منجر به ایجاد دانشی در مورد تاثیر بافل بر پارامترهای گوناگون جریان هوا در جهت بهبود محتوای یکنواخت رطوبت محصول می‌شود که می‌تواند در طراحی‌های آینده به بهینه‌تر شدن طراحی خشک‌ها بیانجامد.

*E-mail: e_najafi@semnan.ac.ir

*عهده‌دار مکاتبات

رجاع: عقیل قنبری، ابراهیم نجفی کانی، امیر حیدری، شبیه‌سازی CFD و بررسی اثر زاویه بافل در فرآیند خشک کردن پنل‌های گچی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۴۴: ۱۳۳ تا ۱۳۳ (۱۴۰۴).

مقدمه

روند تولید صفحه‌های گچ در کارخانه تولید گچ از چندین مرحله تشکیل شده است. دوغاب گچ هنگام انتقال از طریق غلطک، در دمای اتاق جامد می‌شود. از آنجا که گچ جامد حاوی آب اضافی است، باید پنل‌ها را از خشک‌کن که در آن صفحه‌های گچ گرم می‌شوند نیز عبور دهید تا آب اضافی آن تبخیر شود. فرآیند خشک‌کردن مرحله‌ای بسیار مهم در تولید پنل‌های گچی است. خواص و کیفیت پنل‌های تولیدی تا حد زیادی به این مرحله وابسته است و خشک‌کردن مناسب زمانی اتفاق می‌افتد که خشک‌شدن به طور یکنواخت روی صفحه‌ها روی دهد. در اینجا خشک‌شدن یکنواخت و صحیح بسیار ضروری است، این امر می‌تواند با داشتن انتقال حرارت یکنواخت و جریان مناسب در خشک‌کن تضمین شود. از خشک‌کن‌های تونلی برای خشک‌کردن محصولات پنل‌گچی استفاده می‌شود. یکی از اشکال‌های این خشک‌کن‌ها عدم یکنواختی در میزان رطوبت محصول نهایی می‌باشد. دلیل اصلی عدم یکنواختی نیز مناسب‌نبودن ساختار خشک‌کن است. انتقال حرارت ناهموار ممکن است منجر به خصوصیات ناهمواری و خشک‌شدن غیریکنواخت و محلی شود که با استانداردهای محصول مطابقت ندارند. از این جهت بررسی پارامترها برای بهبود جریان هوا و یکنواخت کردن آن حائز اهمیت است. تا کنون مطالعاتی در جهت بهبود جریان هوا در خشک‌کن‌های گوناگون صورت گرفته است. از آنجایی که در بسیاری از خشک‌کن‌های معمولی نصب هود در سقف و انحراف دهنده هوا معمول است، تأثیرات این دو پارامتر توسط پاییس و همکاران در پژوهش [۱] مورد مطالعه قرار گرفت. لا و همکاران [۲]، تأثیر بافل‌های عمودی بر ویژگی‌های اختلاط و خشک‌کردن پودر را در یک خشک‌کن بسترسیال مطالعه کردند. نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد که استفاده از خشک‌کن بستر سیال با بافل‌های عمودی باعث اختلاط بهتر ذرات می‌شود. این به این دلیل است که بافل‌های عمودی رشد حباب‌های کوچک که باعث اختلاط شدیدتر در بستر ذرات می‌شوند، را افزایش می‌دهد. در پژوهش دیگر، امانلو و زمردیان [۳] برای به دست آوردن توزیع یکنواخت جریان هوا و دما در حال خشک‌کردن با در نظر گرفتن شرایط کلی کار، هفت هندسه گوناگون خشک‌کن کابینتی را از نظر تئوری (دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)) و به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها روی مناسب‌ترین طرح با جریان هوا و توزیع دما یکنواخت قابل قبول انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که خشک‌کن کابینتی جدید توزیع یکنواخت سرعت هوا و دما را در سراسر خشک‌کن نشان می‌دهد. مقایسه داده‌های آزمایشی و پیش‌بینی شده (استخراج شده برای تجزیه و تحلیل CFD) ضریب همبستگی بسیار خوبی برای دمای خشک‌شدن و سرعت هوا در محفظه خشک‌شدن را نشان داد.

یکی دیگر از روش‌های بهبود دهنده جریان خشک‌کن، استفاده از میکس کننده استاتیک در ورودی خشک‌کن می‌باشد. میکس کننده‌های استاتیک برای دستیابی به اختلاط برای ترکیبات خاصی از سیالات طراحی شده‌اند. ساموئلسون [۴] در پژوهش خود با تمرکز بر روی یک مخلوط کن استاتیک در خشک‌کن پنل گچ و در جایی که هدف آن دستیابی به دمای یکنواخت مخلوط هوا در کانال بخاری هوا است، تلاش خوبی برای بهبود جریان هوا در خشک‌کن تونلی انجام داده است. در پژوهش بوهنر و همکاران [۵]، شبیه‌سازی جریان هوا و تلاش برای بهبود فرآیند، منجر به اضافه شدن بافل شد. آنها مشکل خشک‌شدن غیریکنواخت در خشک‌کن را با اضافه کردن فلپ ۴۵ درجه تا حدودی برطرف کردند. در مطالعه توسط چوکوفومفون و همکاران [۶]، نیز مشخص شد که استفاده از بافل‌ها به عنوان مولد جریان گردابی می‌تواند باعث ایجاد ترکیب بهتر بین مناطق جریان اصلی و دیواره لوله شود و منجر به افزایش سرعت انتقال حرارت شود. پژوهش دیگر توسط ژانگ و همکاران [۷]، که به طور خاص در حوزه صنعت پنل گچی (شک کن تونلی) انجام شده است نیز به تاثیر بافل در ورودی خشک‌کن پرداخته است. در آن مقایسه‌ای بین میزان رطوبت مواد داخل خشک‌کن هنگام عدم استفاده از بافل، یک بافل مشترک و یک بافل خاص انجام شده است. وجود بافل باعث کاهش محتوای رطوبت مواد به طور کلی و یکنواختی رطوبت می‌شود. به تازگی نیز توسط رضایی و همکاران [۸]، مطالعه‌ای در جهت بهبود توزیع ناهمگن هوا در تولید پالت‌های چوبی در خشک‌کن‌های روتاری انجام شده است. نوآوری، شامل سهم فعل و انفعالات زیست توده با دیوار درام و بافل‌های داخلی است که بیشتر در مدل‌های منتشر شده وجود ندارد. در بررسی‌ها تأثیر وجود صفحه‌های انحراف دهنده در محفظه خشک‌کن در طول مسیر سیال هوای گرم تأیید شد. در مطالعه دیگر توسط افشاری و همکاران [۹]، طراحی یک خشک‌کن تونلی خورشیدی برای استفاده در فرآیند خشک‌شدن لجن فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی عددی ساختار حرارت و جریان سه مدل خشک‌کن تونلی، شامل: نوع تونلی مستطیلی، تونلی با مقطع نیم‌دایره و تونلی با مقطع نیم دایره‌ای به همراه پره مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه آنها نیز، ادغام باله‌ها در تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای به همراه پره نسبت به دو حالت دیگر تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد حرارتی و خشک‌کردن داشت.

مطالعات متعددی در مورد جریان هوا و توزیع دما در سیستم‌های خشک‌کن مانند خشک‌کن‌های کابینتی انجام شده است. تاثیر بافل‌ها و انحراف‌دهنده‌ها در جریان خشک‌کن‌های گوناگون مشاهده شد. با این حال، در ادبیات خشک‌کن تونلی مورد استفاده در صنایع پنل گچی به ندرت مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به ضرورتی که برای اصلاح ساختار خشک‌کن‌های تونلی در صنعت پنل‌های گچی و تغییر

(۱) Computational fluid dynamics

جایی که $P_{ambient}^{vapor}$ و $T, P_{surface}^{vapor}, R_u, M_v, h_m$ ضریب انتقال جرم، جرم مولار آب خالص، ثابت جهانی گاز، دما، فشار بخار در سطح محصول و فشار بخار در محیط می باشند.

معادله حرکت

معادله حرکت مبتنی بر روش میانگین رینولدز نیز به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{lam} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_j' u_i'}) + \rho g \quad (5)$$

در اینجا، شاخص‌های i یا j جهت‌های مختصات دکارتی را مشخص می‌کنند و $g, P, \rho, \mu_{lam}, u', u$ متوسط، نوسانات سرعت، چگالی، فشار، گرانش و تنش رینولدز هستند. استرس رینولدز بر اساس روش Boussinesq در معادله به شرح زیر بیان می‌شود [۱۱]:

$$-\rho \overline{u_j' u_i'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \quad (6)$$

که در آن μ_t و k ویسکوزیته و انرژی جنبشی جریان آشفته هستند و می‌توانند توسط معادلات جریان آشفته مانند $k-\epsilon$ قابل تحقق محاسبه شوند.

معادله انرژی

معادله انرژی را هم می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j) + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) + S_h \quad (7)$$

جایی که S_h, K_{eff} و \vec{J}_j به ترتیب رسانایی موثر، شار انتشار گونه‌های j و منبع انرژی هستند. تروپ [۱۲] دریافت که منبع (S_h) از معادله انرژی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$S_h = -h_s \rho s (1 - \epsilon) \left(\frac{\partial W}{\partial T} \right) \quad (8)$$

حل این معادلات در حالت فعلی آنها غالباً مشکل‌ساز است زیرا بسیاری از جریان‌های متداول حاوی ساختارهای آشفته با مقیاس‌های زمانی، طول و سرعت هستند که در یک طیف گسترده‌ای متفاوت است.

در جریان هوای خشک کن برای بهبود عملکرد آنها احساس می‌شود این پژوهش انجام شده است. هدف از این مطالعه شناسایی یک طرح مفهومی است که استفاده از آن می‌تواند مبنایی برای پیشرفت‌های بیشتر طراحی باشد. تجهیزاتی که به خشک‌کن اضافه می‌شوند باید بتوانند تغییرات دمای هوای خشک‌شدن را در مجاری خروجی کاهش دهند. با این حال، افزایش هزینه عملیات مطلوب نیست و بنابراین افت فشار در طراحی‌های جدید باید تا حد ممکن پایین نگه داشته شود. تاثیرگذاری بافل‌ها در بهبود جریان خشک‌کن‌ها به خوبی اثبات شده است. هدف این مقاله بررسی اثرات تغییر در هندسه خشک‌کن با تمرکز روی زاویه (α) بافل‌ها به عنوان محرک جریان گرداب بر رفتار خشک‌شدن پل‌های گچی برای تاثیرگذاری بیشتر بر سرعت و کیفیت خشک‌شدن محصولات می‌باشد. بافل‌ها از صفحه‌هایی سوار بر سطح مقطع کانال تشکیل می‌شوند که هدف آن‌ها توزیع مجدد سیال در جهت‌های عمود بر جریان اصلی و ایجاد تلاطم است. در این پژوهش از بافل‌هایی به شکل مستطیل با زوایای گوناگون در جریان استفاده گردید. با توجه به اینکه توزیع دمای متنوع در قسمت‌های خروجی می‌تواند منجر به خشک‌شدن نامناسب یا آسیب به محصول نهایی شود، تغییرات گوناگون طراحی برای بهبود این پارامترها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های سرعت هوا در خشک‌کن‌های تونلی توسط دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام شد. تاثیر زاویه قرارگیری بافل و تغییر در هندسه خشک‌کن بر کاهش فشار، توزیع جریان و توزیع دما به همراه میزان رطوبت جسم در سطح پل‌ها در محفظه هوای گرم خشک‌کن، با استفاده از CFD مورد بررسی قرار گرفت. تمرکز اصلی مطالعه مدل‌سازی جریان هوا و بهبود اختلاط جریان هوای محیط خشک‌کن بود.

تئوری

معادلات حاکم

معادله جرم

قوانین اساسی جریان سیال توسط معادلات زیر تعریف شده است. معادله جرم را می‌توان به شرح زیر نوشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = S_m \quad (1)$$

که ρ و u عبارتند از سرعت، چگالی و ترم S_m که نشان دهنده مقدار جرمی است از که از فاز مایع (پنل گچ و هوای مرطوب) به فاز هوا انتقال می‌یابد و مطابق زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$S_m = \frac{h_m M_v}{R_u T} (P_{surface}^{vapor} - P_{ambient}^{vapor}) \quad (2)$$

$$P_{ambient}^{vapor} = X_{H_2O_{Vapor_airzone}} \times P_{sat} \quad (3)$$

$$P_{surface}^{vapor} = X_{H_2O_{Vapor_gypsumzone}} \times P_{sat} \quad (4)$$

زمان محاسباتی در مطالعات پارامتری انجام گرفت. این دامنه ساده یک ضرورت در شبیه سازی‌های مربوط به خشک کن می‌باشد، زیرا با توجه به ابعاد بزرگ خشک کن، بخش بزرگی از منابع محاسباتی مورد نیاز است. در ورودی بر اساس سرعت (۱۰ m/s) و ارتفاع کانال (۰٫۲۳ m) تعداد رینولدز برابر با 1.61×10^5 به دست آمده است. بدین ترتیب، جریان نیز آشفته است. رطوبت نسبی پنل گچ در حالت اولیه ۵۰٪ بود. ضخامت برای پنل گچ ۱۲٫۵ mm در نظر گرفته شده است. با توجه به هزینه‌های بالای محاسباتی یک پنل گچ و جریان روی آن را در نظر گرفته شد. به دلیل متقارن در نظر گرفتن دامنه برای نیمی از ضخامت پنل و عرض کانال جریان هوا شبیه سازی انجام شد. نتایج به طور کلی در طول خشک کن قابل بسط هستند. پایین، راست و چپ دیوارهای گچ نفوذ ناپذیر بوده و تنها سطح گچ قابل نفوذ است. در خروجی، فشار استاتیک صفر تحمیل شده است. دیواره کانال به عنوان یک مرز بدون لغزش با زبری صفر و آدیباتیک مدل سازی می‌شود. در مرز بالای کانال هوا، شرایط مرز متقارن اعمال شد. که فرض می‌کند مولفه سرعت نرمال و شیب های نرمال در مرز صفر هستند. بر اساس تجزیه و تحلیل حساسیت شبکه، شبکه‌های مناسب برای جریان هوا و گچ ساخته شده است. برای مدل تلاطم در شبیه سازی‌ها از روش حجم کنترل استفاده شد. مدل Realizable k-ε همراه با LRNM و WFs (CWF) برای منطقه لایه مرزی استفاده می‌شود. از آنجا که تنش در دیواره با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد، ارزیابی سرعت باد بالاتر با LRNM نیاز به وضوح شبکه بالاتر در منطقه لایه مرزی دارد. به دلیل تعداد بسیار کم ریچاردسون در کانال نیز، می‌توان از اثرات شناوری چشم پوشی کرد. بدین ترتیب، گرما به عنوان یک مقیاس فعال عمل خواهد کرد و میدان جریان به شرایط مرز حرارتی تحمیل شده وابسته خواهد بود. علاوه بر این، از طرح های تشخیصی درجه دو در سراسر دامنه استفاده می‌شود. از الگوریتم SIMPLE^۲ برای اتصال فشار و سرعت استفاده می‌شود. درون یابی فشار مرتبه دوم است. متغیرهای گسسته مانند تکانه، انرژی جنبشی آشفته و مدت سرعت تغییر آشفته که با دو طرح بالا جهت باد تصویب شده است. برای این کار، یک کد جدید توسط کاربر (UDF^۳) برای محاسبه پارامترهای موثر بر فرآیند و روابط گوناگون به منظور شبیه سازی دقیق تر، توسعه داده شد. تابش بین دیواره کانال در نظر گرفته نمی‌شود، زیرا عدم قطعیت در مورد مقاومت در برابر انتشار زیاد است.

در چنین شرایطی، یک وضوح عالی زمانی و مکانی دامنه مورد نیاز است و این به نوبه خود نیاز به قدرت محاسباتی بزرگ دارد. علاوه بر این، اغلب نتایج متوسط به دست می‌آیند که مورد توجه قرار می‌گیرند، زیرا اینها به راحتی قابل مقایسه هستند. به همین دلایل، اغلب از مدل‌های تلاطم رینولدز متوسط ناویر-استوکس (RANS^۱) استفاده می‌شود. با چنین مدل‌هایی، تلاطم با حل معادلات اضافی مدل می‌شود. این مقادیر به نوبه خود مورد استفاده قرار می‌گیرد تا تأثیر تلاطم در میانگین جریان را نشان دهند [۱۳].

مدل سازی تلاطم

در مطالعه حاضر از مدل Realizable k-ε برای ارزیابی رفتار آشفته رژیم جریان در حوزه محاسبات استفاده شد.

مدل سازی نزدیک دیوار

عملکرد دیوار درجه حرارت سفارشی (CWF^۲) از داده‌های عددی معتبر LRNM^۳ برای جریان هوا بر روی مکعب مشتق شده است، همان طور که در زیر توضیح داده شده است، و بر اساس یک قانون لگاریتمی است:

$$T_P^* = Pr_{t,CWF} \left(\frac{1}{K} \ln(E y_p^*) + P_j(Pr_{t,CWF}) \right) \quad (9)$$

$$y_p^* > y_T^* = 11.639$$

در جایی که P_j و $Pr_{t,CWF}, K, y_p^*, T_P^*$ به ترتیب درجه حرارت بدون بعد در نقطه مرکز سلول دیواره مجاور P ، فاصله دیوار بدون بعد در نقطه سلول سلول مجاور دیوار P ، ثابت فون کارمان (۰٫۴۱۸۷)، عدد پراندل آشفته استفاده شده توسط CWF و ضریب تعیین تجربی هستند. E برابر با ۹٫۷۹۳ است. بهترین تقریب با این داده‌های LRNM طبق پژوهش [۱۴] مقدار $Pr_{t,CWF} = 1.95$ است.

مدل CFD

شرایط هندسی و مرزهای هندسی

پنل‌های گچ، متشکل از گچ مرطوب تازه (سولفات کلسیم)، حاوی مقدار زیادی آب هستند. برای تبخیر آب اضافی از صفحه گچ، از هوای گرم در خشک کن استفاده می‌شود. شکل ۱ دامنه محاسباتی دو بعدی شبیه سازی شده مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. به دلیل نسبت ابعادی خشک کن، یعنی عرض کانال به ارتفاع کانال و جریان‌های موازی، از یک پیکربندی دو بعدی در شبیه سازی CFD استفاده شد. استفاده از یک دامنه ساده به منظور کاهش نیازهای

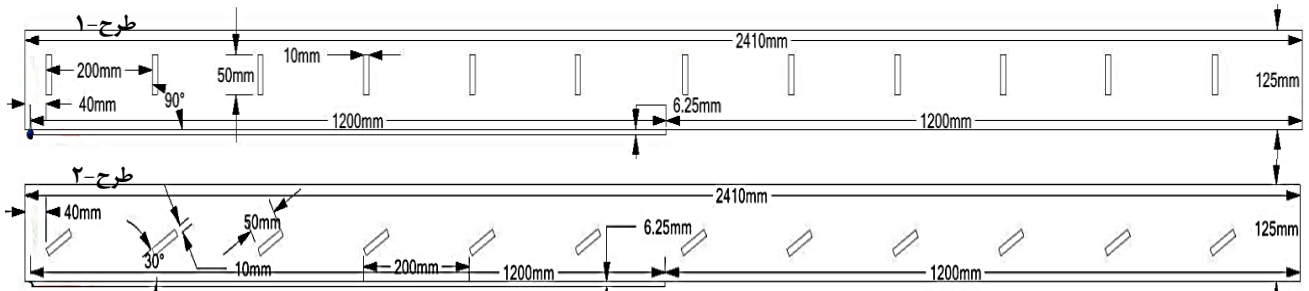
(۱) 1 Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (or RANS equations)

(۲) Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations

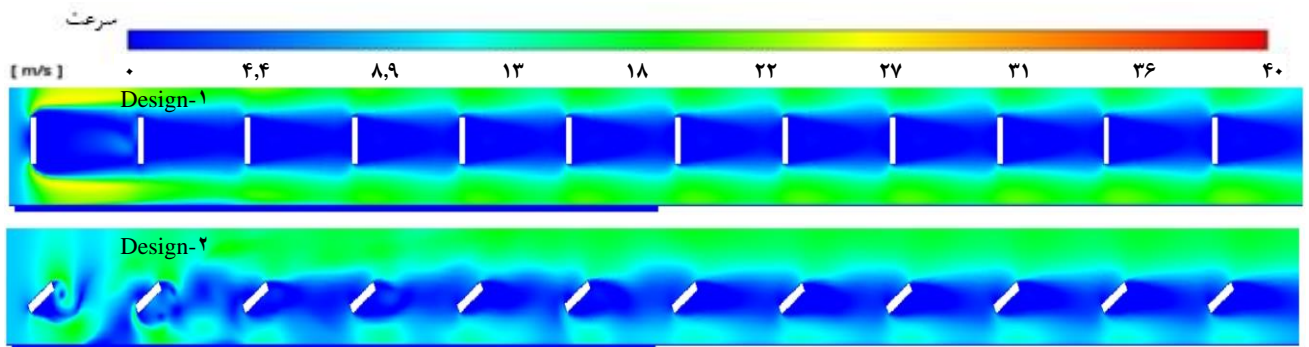
(۲) customised temperature wall function

(۳) low Reynolds number modeling

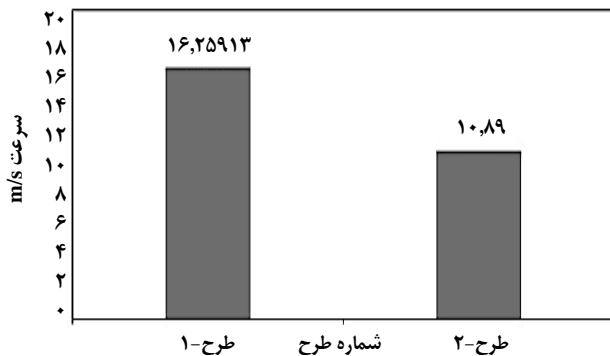
(۴) user-defined function



شکل ۳- مدل محاسباتی برای تجزیه و تحلیل عددی برای صفحه گچ و جریان هوا به همراه بافل (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه، مقیاس: ۱:۱۰)



شکل ۴ - کانتور سرعت برای صفحه گچ و جریان هوا (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه)

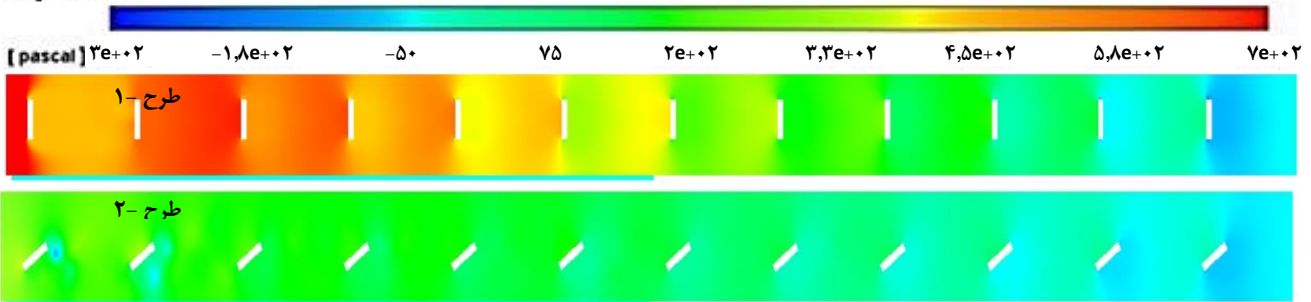


شکل ۵ - متوسط سرعت در مقطع ۱ میلی‌متر بالای مرز مشترک پنل گچ و جریان هوا (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه)

در شکل ۵ متوسط سرعت در مقطع ۱ mm بالای مرز مشترک پنل گچ و جریان هوا برای دو طراحی نشان داده شده است. متوسط سرعت در طرح-۱ برابر با ۱۶,۲۵ m/s و برای طرح-۲ برابر با ۱۰,۸۹ m/s می باشد. متوسط سرعت برای طرح-۱ بیش از ۱,۵ برابر طرح-۲ است. سطح مورد بررسی در این شکل، نزدیک ترین قسمت به سطح پنل در نظر گرفته شده است تا بتواند پیش‌بینی دقیق تری از اثر گذاری را به نمایش بگذارد. این مفهوم می‌بایست با شرایط مرزی گوناگون ورودی مورد ارزیابی قرار گیرد که به دلیل کمبود وقت این کار انجام نشده است. با توجه به این دو شکل در طرح-۱ عملکرد بالاتری در افزایش سرعت و یکنواختی با وجود زاویه بیشتر مشاهده می‌شود.

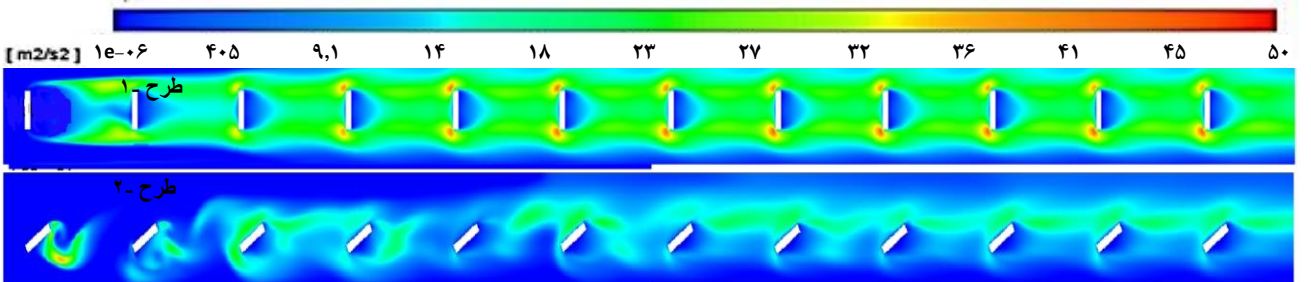
برای خشک شدن سریعتر و یکنواخت تر پنل‌ها بیشتر خواهد شد. در شکل ۴ (طرح-۲) گرداب‌های تشکیل شده حاصل از بافل به خصوص در ابتدای جریان قابل مشاهده است. گرداب‌های ایجاد شده در صورت ادغام بزرگتر می‌شوند و باعث افزایش سرعت و یکنواختی بیشتر می‌شوند. در این حالت که زاویه بافل‌ها با سطح ۳۰ درجه می‌باشد، یکنواختی سرعت جریان کمتر از حالت بافل با زاویه ۹۰ درجه است، ولی انتقال سرعت بیشتر جریان به کناره‌ها و نزدیک سطح مشترک پنل و جریان برای زاویه ۳۰ درجه بیشتر است. یکنواختی کمتر در کیفیت خشک کردن پنل‌ها موثر است و موجب خیس ماندن نواحی گوناگون پنل‌ها می‌شود. به طور کلی افزایش سرعت و یکنواختی سرعت پارامترهای مثبتی هستند و به کیفیت خشک شدن کمک می‌کنند که باعث افزایش سرعت جریان می‌شود. افزایش سرعتی که با وجود بافل‌ها در زاویه‌های گوناگون اتفاق می‌افتد، به خوبی می‌تواند سرعت خشک شدن را افزایش دهد. این اثر گذاری به خصوص در شروع فرآیند که میزان رطوبت در سطح پنل بیشتر است به تاثیر بیشتری در جریان دارد. نکته‌ای که در بررسی سرعت باید مورد توجه قرار بگیرد این است که هم مقدار سرعت و هم یکنواختی آن است که باعث بهبود کیفیت خشک شدن می‌شود. اگر افزایش سرعت، بدون ایجاد یکنواختی اتفاق بیفتد می‌تواند باعث کاهش کیفیت شود و به خشک شدن منطقه‌ای محصول بیانجامد. از این منظر تنوع‌های زیادی برای طراحی‌های آینده امکان پذیر است که می‌تواند به انتخاب بهینه ترین حالت منجر شود.

فشار استاتیک



شکل ۶ - کانتور فشار برای صفحه گچ و جریان هوا با وجود بافل با زاویه‌های گوناگون (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه)

شدت انرژی جنبشی تلاطم (k)

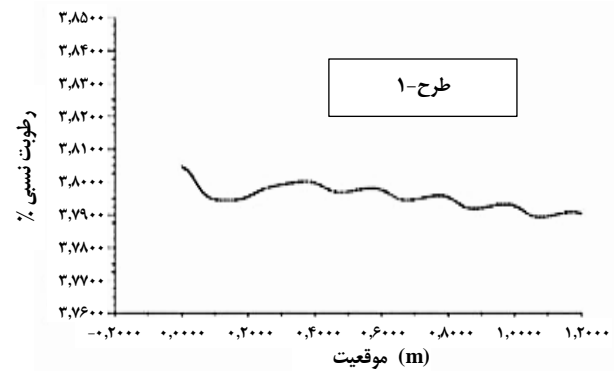
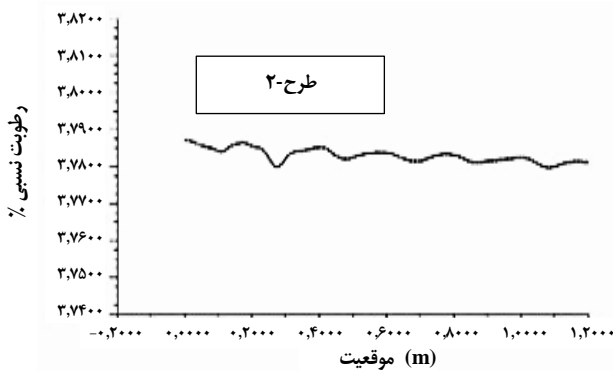


شکل ۷ - کانتور انرژی جنبشی تلاطم (K) برای صفحه گچ و جریان هوا با وجود بافل با زاویه‌های گوناگون (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه)

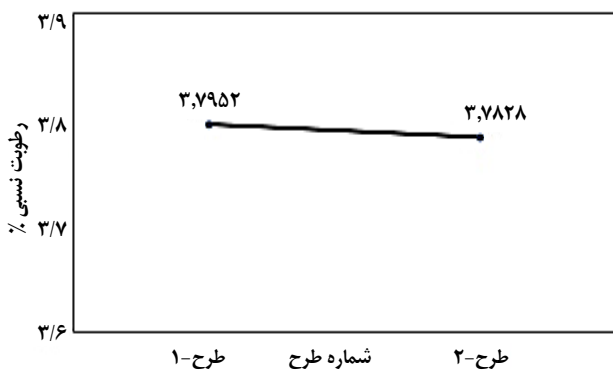
قرار گیرد. به طور کلی فشار در روی سطح پنل گچ در طرح-۱، مقدار $513,6165 \text{ Pa}$ و در طرح-۲ مقدار $183,95 \text{ Pa}$ است. تغییرات به نسبت زیاد است.

شکل ۷ در مورد توزیع شدت انرژی جنبشی تلاطم در قسمت‌های گوناگون جریان برای پنل گچ و جریان هوا با وجود بافل با زاویه‌های گوناگون است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، خشک‌کن جریان ورودی بیشتری را در ورودی خود می‌بیند، اما با کند شدن و پخش شدن جت اولیه هوا، تلاطم بیشتری در نیمه انتهایی و در گوشه‌ها را تجربه می‌کند به مرور جریان آرام بیشتر به سمت خروجی خشک‌کن از سر گرفته می‌شود. تلاطم می‌تواند برای خشک‌شدن مفید باشد، زیرا به طور موثرتری هوای مرطوب را با هوای خشک مخلوط می‌کند و شدت آشفته‌گی بر میزان هدایت حرارتی تأثیر می‌گذارد. از شکل ۷، می‌توان مشاهده کرد که طرح-۱ با زاویه بیشتر نسبت به سطح دارای شدت آشفته‌گی بیشتری می‌باشد. تلاطم در طرح-۲ نیز مشاهده می‌شود که با توجه به زاویه کمتر آن نسبت به سطح از مقادیر کمتری برخوردار می‌باشد. البته برای انتخاب حالت بهینه برای این مقادیر باید اصلاحاتی در طراحی‌ها انجام شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده شد، وجود بافل به صورت کلی باعث شدت آشفته‌گی بیشتری می‌شود، پس انتظار می‌رود هدایت حرارتی بیشتری صورت گیرد و می‌تواند روند خشک‌کردن را بهبود بخشد. به طور کلی شدت آشفته‌گی در روی سطح پنل گچ در طرح-۱، مقدار $(3,603149 \text{ m}^2/\text{s}^2)$ و در طرح-۲ مقدار $(3,186765 \text{ m}^2/\text{s}^2)$ است. شدت آشفته‌گی تلاطم

کانتور فشار برای پنل گچ و جریان هوا با وجود بافل با زاویه‌های گوناگون در داخل خشک‌کن را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، به دلیل حرکت اجباری هوا و قرار گرفتن مانع در جهت جریان در ورودی خشک‌کن دارای مقدار بالاتر است و به مرور از آن کاسته می‌شود. در شکل ۶ (طرح-۱) زاویه ۹۰ باعث به وجود آمدن مانعی در برابر جریان می‌شود که باعث افزایش بسیار زیاد فشار در جلوی بافل‌ها و تعمیم آن به کناره‌ها می‌شود. مقدار فشار به مرور در طول جریان کاسته می‌شود. با این حال، فشار در سراسر خشک‌کن برای شکل‌های شکل ۶ (طرح-۲) تا حد زیادی یکنواخت باقی مانده است. با توجه به پایین بودن زاویه بافل‌ها افزایش فشار ناگهانی و با مقادیر زیاد در سرتاسر جریان مشاهده نمی‌شود و مانند زاویه ۹۰ درجه از مقدار فشار به مرور در طول جریان کاسته می‌شود. به طور کلی از شکل مشاهده می‌شود زاویه‌ها باعث ایجاد فشار بیشتر می‌شوند، که مقادیر فشار شکل ۶ (طرح-۲) یکنواخت‌تر از حالت دیگر است و افت فشار کمتری را بر سیستم تحمیل می‌کند. هنگامی که افت فشار زیاد بر سیستم تحمیل شود برای جبران آن به تجهیزات بیشتر برای جبران آن و به طبع آن مصرف انرژی و هزینه بالاتر نیاز است که برای فرآیند تولید مناسب نمی‌باشد. طرح با بافل در ورودی‌ها خصوصاً با زاویه کمتر باعث شد، افت فشار کاهش یابد تا جریان یکنواختی به مشعل خط در محفظه هوای گرم نیاز باشد و طراحی هزینه زیادی را به سیستم وارد نکند. این مورد می‌تواند در طراحی برای انتخاب بهینه مورد بررسی بیشتر



شکل ۸ - توزیع رطوبت با زمان خشک‌شدن غیربعدي با وجود بافل با زاویه‌های گوناگون هوا در مقطع ۱ میلی‌متر بالای مرز مشترک پنل گچ و جریان هوا (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه)



شکل ۹ - رطوبت نسبی میانگین در مقطع ۱ میلی‌متری در بالای سطح مشترک پنل گچ و جریان هوا با زاویه‌های گوناگون (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه)

از شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، طرح-۲ رطوبت نسبی میانگین را در طول پنل به مقدار بیشتری کاهش می‌دهد ولی طرح-۱ باعث یکنواختی بیشتری در رطوبت نسبی در طول سطح می‌شود گرچه مقدار رطوبت نسبی میانگین در آن کاهش کمتری نسبت به طرح-۱ دارد. شکل ۱۰، توزیع جرم برای آب اضافی با زمان خشک‌شدن غیربعدي برای پنل گچ و جریان هوا با بافل در زاویه‌های گوناگون (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه) را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، در طرح-۱ مقدار آب موجود در پنل‌های گچی به مقدار کمتر به نسبت طرح-۲ از سطح انتقال پیدا کرده است. مقدار اختلاف برای این دو حالت اندک است. این اختلاف نشان می‌دهد، بافل استفاده شده طرح-۱ باعث یکنواختی رطوبت بیشتر می‌شود ولی به دلیل طراحی در این ارتفاع نسبت به سطح مشترک موجب می‌شود، نتواند تأثیری بیشتر در خشک کردن داشته باشد و نیاز به باز طراحی و اصلاح فاصله دارد. همان‌طور که دیده شد، طرح-۲ در ابتدا به مقدار بیشتری در خشک کردن موثر است و در ادامه نمودارها شیب یکسانی دارند. بافل با افزایش راندمان از تماس بین فاز جامد و فاز گاز، میزان خشک‌شدن را به میزان قابل توجهی

در این دو شکل ۱۱٫۵ درصد تغییر می‌یابد که در میزان انتقال موثر است. زاویه‌ی بیشتر بافل در خشک‌کن باعث ایجاد شدت آشفستگی بیشتر در گوشه‌های بافل می‌شود که به دلیل فاصله‌ی بافل از سطح تأثیرگذاری چندانی بر جریان هوای خشک‌شدن ندارد و این افزایش آشفستگی به صورت نقطه‌ای ایجاد می‌شود.

در شکل ۸، توزیع رطوبت نسبی با زمان خشک‌شدن غیربعدي با وجود بافل با زاویه‌های گوناگون هوا در مقطع ۱ mm بالای مرز مشترک پنل گچ و جریان هوا برای طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و برای طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه نشان داده شده است. مقطع مورد بررسی در نزدیکترین فاصله از سطح انتخاب شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، در طرح-۱ رطوبت نسبی در نزدیک سطح به صورت یکنواخت‌تر کاهش پیدا کرده است و در طرح-۲ دامنه تغییرات رطوبت نسبی بیشتر است. زاویه‌ی ۳۰ درجه در طرح-۲ باعث خشک‌شدن نامتوازن نسبت به طرح-۱ می‌شود.

زاویه کمتر در این مدل گرچه باعث تلاطم بیشتر و ایجاد گردابه‌های بزرگتر می‌شود ولی همان‌طور که مشاهده شد، باعث ایجاد یکنواختی کمتر در سطح خشک‌شده می‌شود. از این منظر باید در طراحی‌های آینده اصلاح زاویه و انتخاب مناسب مقدار آن در جهت بهبود فرآیند شبیه‌سازی و مطالعات بیشتری صورت گیرد. در این مطالعه تمرکز بر روی تغییرات کلی اثر زاویه بر جریان بوده است. در شکل ۹، نیز رطوبت نسبی میانگین در مقطع ۱ mm در بالای سطح مشترک پنل گچ و جریان هوا با زاویه‌های گوناگون برای بافل‌ها (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه) به دست آمده است. مقدار رطوبت نسبی میانگین برای طرح-۱ در طول پنل ۳٫۷۹۵۲ درصد و برای طرح-۲ مقدار ۳٫۷۸۲۸ درصد به دست آمده است. زاویه کمتر بافل در جریان باعث می‌شود، بافل بتواند اثرگذاری بیشتری را در خشک‌کردن بیشتر پنل‌ها ایجاد کند، که قابل بسط در طراحی‌های آینده خواهد بود. میزان تغییرات رطوبت نسبی در اثر خشک‌کردن برای دو زاویه ۳۰ و ۹۰ درجه در این مطالعه ۳٫۵ درصد است.

• افزودن بافل محتوای رطوبت را به عنوان یک تمایل نزولی به عنوان یک اصل در تمام نمودارها ارائه می‌دهد و تأثیر مثبت قابل توجهی بر عملکرد حرارتی سیستم دارد. بافل‌ها علاوه بر اینکه رطوبت موجود در فرآیند را کاهش می‌دهد، یکنواختی رطوبت را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین می‌تواند زمان خشک‌شدن را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

• در حالتی که زاویه بافل‌ها با سطح ۳۰ درجه می‌باشد، یکنواختی سرعت جریان کمتر از حالت بافل با زاویه ۹۰ درجه است، ولی انتقال سرعت بیشتر جریان به کناره‌ها و نزدیک سطح مشترک پنل و جریان برای زاویه ۳۰ درجه بیشتر است. افزایش سرعتی که با وجود بافل‌ها در زاویه‌های گوناگون اتفاق می‌افتد به خوبی می‌تواند سرعت خشک‌شدن را افزایش دهد. این اثرگذاری به خصوص در شروع فرآیند که میزان رطوبت در سطح پنل بیشتر است به تأثیر بیشتری در جریان دارد.

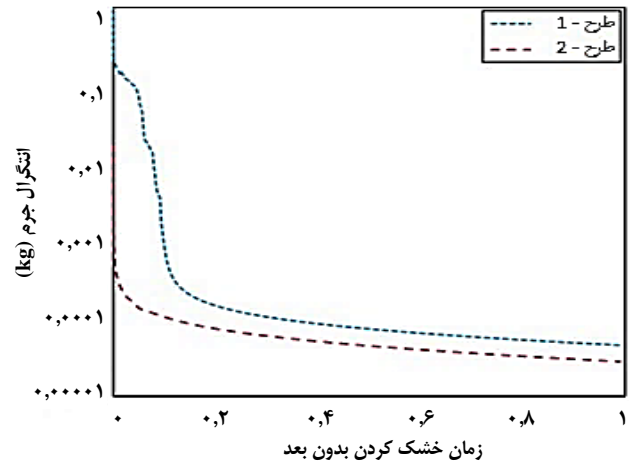
• مقدار افزایش میانگین سرعت برای بافل‌های با زاویه ی ۹۰ درجه نسبت به زاویه ۳۰ درجه در حدود ۱,۵ برابر در سطح ۱mm پنل بود.

• افت فشار باعث اعمال هزینه‌های بالایی به سیستم می‌شود. میزان فشار نیز برای جریان در حالتی که بافل‌های با زاویه ی ۹۰ درجه در جریان قرار داشت، حدود ۳۲۰Pa بیشتر از فشاری بود که بافل‌ها با زاویه ۳۰ درجه در مسیر قرار داشتند. طراحی بافل با زاویه کمتر منجر به کاهش ۱۸۰ درصدی افت فشار شد.

• شدت آشفته‌گی تلاطم در روی سطح پنل گچ با طراحی در زاویه ۹۰ درجه مقدار (m^2/s^2) ۳,۶۰۳۱۴۹ و برای طراحی در زاویه ۳۰ درجه مقدار (m^2/s^2) ۳,۱۸۶۷۶۵ است. شدت آشفته‌گی تلاطم در این دو شکل ۱۱,۵ درصد تغییر می‌یابد.

• مقدار رطوبت نسبی میانگین برای طراحی بافل در زاویه ۹۰ درجه در طول پنل ۳,۷۹۵۲ درصد و برای طراحی در زاویه ۳۰ درجه مقدار ۳,۷۸۲۸ درصد به دست آمده است. طراحی با زاویه کمتر، درجه رطوبت نسبی میانگین را در طول پنل به مقدار بیشتری کاهش می‌دهد ولی طراحی در زاویه ۹۰ درجه باعث یکنواختی بیشتری در رطوبت نسبی در طول سطح می‌شود گرچه مقدار رطوبت نسبی میانگین در آن کاهش کمتری نسبت به طراحی در زاویه ۹۰ درجه دارد.

زاویه بیشتر نسبت به سطح با افزایش سرعت، افزایش فشار (همین‌طور افت فشار) و افزایش تلاطم ویسکوزیته در جریان همراه است. زاویه کمتر باعث یکنواختی کمتر می‌شود. در طراحی‌ها این پژوهش کمتر بودن زاویه باعث شد مقادیر رطوبت نسبی در سطح به میزان بیشتری ولی به طور غیر یکنواخت‌تر کاهش یابد. در نتیجه بافلی که در جریان قرار می‌گیرد، می‌تواند با توجه به زاویه قرارگیری، در برنامه‌های گوناگون خشک کردن اثرگذار باشد و مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از بافل برای بهبود جریان هوا در این پژوهش نشان می‌دهد که امکان پیشرفت وجود دارد، اما نمی‌توان ادعا کرد بهترین تنظیم برای هر یک از مفاهیم موفق ایجاد شده است، زیرا پیکربندی‌های مورد بررسی محدود است و نیاز به اصلاح در طراحی‌ها وجود دارد.



شکل ۱۰ - توزیع رطوبت با زمان خشک‌شدن بدون بعد برای پنل گچ و جریان هوا با زاویه‌های گوناگون (طرح-۱ با زاویه ۹۰ درجه و طرح-۲ با زاویه ۳۰ درجه)

افزایش داد. میزان حذف رطوبت پس از کاهش در ابتدای فرآیند و پس از گذشت زمان، بستگی زیادی به انتشار رطوبت از داخل ماده به سطح خشک دارد. عامل محدود کننده در این قسمت انتشار رطوبت از طریق جامد به جای بازده تماس بین فاز جامد و گاز است. بنابراین بافل عمودی برای افزایش کارایی، نقش کمتری در افزایش سرعت خشک‌شدن در این دوره دارد. نباید فراموش کرد، در ساختار خشک‌کن بدون بافل نیز این نقش کمتر تماس وجود دارد و به همین دلیل باید تکنیک‌هایی را در جهت بهبود پارامترهای طراحی و تأثیرگذاری بافل‌ها ایجاد کرد.

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق به دو بخش تقسیم شد:

- بررسی میدان جریان، عملکرد اختلاط در خشک‌کن باوجود بافل و شناسایی یک طرح مفهومی در خشک‌کن پنل گچ (استفاده از دانش ایجاد شده) به عنوان مبنایی برای پیشرفت‌های بیشتر در طراحی مجدد.
 - تعیین عملکرد زاویه در خشک کردن و بررسی اثرات تغییر در هندسه خشک‌کن با تمرکز روی زاویه (α) بافل‌ها به عنوان محرک جریان گرداب بر رفتار خشک‌شدن پنل‌های گچی برای تأثیرگذاری بیشتر بر سرعت و کیفیت خشک‌شدن محصولات.
- شبیه‌سازی‌های سرعت هوا در خشک‌کن‌های تونلی توسط دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام شد. تأثیر زاویه قرارگیری بافل و تغییر در هندسه خشک‌کن بر کاهش فشار، توزیع جریان و توزیع دما به همراه میزان رطوبت جسم در سطح پنل‌ها در محفظه هوای گرم خشک‌کن، با استفاده از CFD مورد بررسی قرار گرفت. اثر زاویه بافل نسبت به سطح در خشک کردن با شرایط ورودی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر از شبیه‌سازی به دست آمده است:

فهرست نمادها

Δ_{IJ}	Kronecker delta	دلتا کرونگر	u	Mean velocity	سرعت متوسط
P	Pressure	فشار	α	angle	زاویه
μ_{lam}	-	ویسکوزیته لایه	P	Mass density	دانسیته
$u'_i u'_j$	-	تنش رینولدز	S_M	-	مقدار جرم منتقل شده از فاز مایع به هوا
μ_t	Viscosity of turbulent flow	ویسکوزیته جریان آشفته	H_M	Convective heat transfer coefficient	ضریب انتقال جرم جابه‌جایی
k	Kinetic energy of turbulent flow	انرژی جنبشی جریان آشفته	M_V	Water vapor molecular mass	جرم مولکولی بخار آب
K_{eff}	-	رسانایی موثر	R_U	Universal gas constant	ثابت جهانی گاز
\vec{J}_j	-	شار انتشار گونه ی ج	$P_{SURFACE}^{VAPOR}$	Vapour pressure in surface	فشار بخار در سطح
S_h	Source term	ترم منبع انرژی	$P_{AMBIANT}^{VAPOR}$	Vapour pressure in ambient	فشار بخار در محیط
E	Constant in wall-function expression	پارامتر ثابت در تابع دیواره	T	Temperature of mixture	دمای مخلوط
P_j	Empirically determined coefficient	ضریب تجربی	u	Mean velocity	سرعت متوسط
T_p^*	Dimensionless temperature	دمای بدون بعد	u'	Speed fluctuations	نوسانات سرعت
y_p^*	Dimensionless wall distance	فاصله دیوار بدون بعد	x_a	Mass fraction of dry air	کسر جرمی هوای خشک
κ	Von karman vortex stress	ثابت فون کارمن	g	Gravitational acceleration	شتاب گرانش
$Pr_{t,CWF}$	$Pr_{t,CWF}$	پراندتل آشفته			

مراجع

- [1] Pabis S., Jayas D., Cenkowski S., [Grain Drying: Theory and Practice](#). (1998).
- [2] Law C.L., Tasirin S.M., Daud W.R.W., Geldart D., [Effect of Vertical Baffles on Particle Mixing and Drying in Fluidized Beds of Group D Particles](#). *China Particuology*, **1(3)**: 115-118 (2003).
- [3] Amanlou Y., Zomorodian A., [Applying CFD for Designing a New Fruit Cabinet Dryer](#). *Journal of Food Engineering*, **101(1)**: 8-15 (2010).
- [4] Samuelsson H., [CFD Modeling and Design of an Air Heater Mixing System in a Gypsum Board Dryer](#), in *Management and Engineering*, Linköping University: Linköping, Sweden (2015).
- [5] Böhner M., Barfuss I., Heindl A., Müller J., [Improving the Airflow Distribution in a Multi-Belt Conveyor Dryer for Spice Plants by Modifications Based on Computational Fluid Dynamics](#). *Biosystems Engineering*, **115(3)**: 339-345 (2013).
- [6] Chokphoemphun S., Pimsarn M., Thianpong C., Promvong P., [Heat Transfer Augmentation in a Circular Tube with Winglet Vortex Generators](#). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **23(4)**: 605-614 (2015).
- [7] Zhang H., Deng S., [Numerical Simulation of Moisture-Heat Coupling in Belt Dryer and Structure Optimization](#). *Applied Thermal Engineering*, **127**: 292-301 (2017).

- [8] Rezaei H., Lim C.J., Sokhansanj S., [A Computational Approach to Determine the Residence Time Distribution of Biomass Particles in Rotary Drum Dryers](#). *Chemical Engineering Science*, **247**: 116932 (2022).
- [9] Afshari F., Khanlari A., Doğuş Tuncer A., Sözen A., Şahinkesen İ., Di Nicola G., [Dehumidification of Sewage Sludge Using Quonset Solar Tunnel Dryer: An Experimental and Numerical Approach](#). *Renewable Energy*, **171**: 784-798 (2021).
- [10] Zannouni K., El Abrach H., Dhahri H., Mhimid A., [Study of Heat and Mass Transfer of Water Evaporation in a Gypsum Board Subjected to Natural Convection](#). *Heat and Mass Transfer*, **53(6)**: 1911-1921 (2016).
- [11] Hinze J.O., Uberoi M.S., [Turbulence](#). *Journal of Applied Mechanics*, **27(3)**: 601-601 (1960).
- [12] Thorpe G.R., [The Application of Computational Fluid Dynamics Codes to Simulate Heat and Moisture Transfer in Stored Grains](#). *Journal of Stored Products Research*, **44(1)**: 21-31 (2008).
- [13] Versteeg H.K. Malalasekera W., [An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method](#). 2nd ed. ed. 2007: Harlow.
- [14] Defraeye T., Blocken B., Carmeliet J., [An Adjusted Temperature Wall Function for Turbulent Forced Convective Heat Transfer for Bluff Bodies in the Atmospheric Boundary Layer](#). *Building and Environment*, **46(11)**: 2130-2141 (2011).
- [15] Defraeye T., Houvenaghel G., Carmeliet J., Derome D., [Numerical Analysis of Convective Drying of Gypsum Boards](#). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55(9-10)**: 2590-2600 (2012).