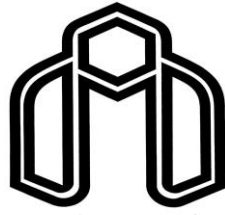


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

پایان نامه کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی و تحلیل فنی - اقتصادی خشک کن میوه مجهز به سیستم کنترل رطوبت

نگارنده : امیر قلی نژاد

اساتید راهنما:

دکتر احمد نظری

دکتر علی جباری مقدم

۱۴۰۰

تائیدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان

:

« طراحی و تحلیل فنی - اقتصادی خشک کن میوه مجهز به سیستم کنترل رطوبت »

توسط امیر قلی نژاد صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

سیستم های انرژی-تکنولوژی انرژی مورد تایید قرار می دهد.

استاد راهنما:	دکتر احمد نظری - دکتر علی جباری مقدم
ممتحن:	
ممتحن:	

تقدیم به:

مادرم

دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و

وجودش برایم همه مهر.

آنکه آفتاب مهرش در آستانه قلمم، همخوان پیر جاست و هرگز

غروب نخواهد کرد.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم کمال تشکر و قدردانی را از راهنمایی‌های دلسوزانه اساتید

فـرزانـه، دکتر احمد نظری - دکتر علی جباری مقدم داشته باشم. شاکردی ایشان را

افتخاری برای خود می‌دانم. بی‌شک رهنمودهای ایشان، چراغ راه زندگیم خواهد بود.

همچنین از اعضای خانواده و دوستانی که به هر نحو در انجام این پروژه ایجاب ریاوری

نمودند، سپاسگزارم و امیدوارم این پایان نامه جبران بخش کوچکی از زحمات این عزیزان

باشد.

تعهد نامه

اینجانب امیر قلی نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - سیستم های انرژی - تکنولوژی انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه طراحی و تحلیل فنی - اقتصادی خشک کن میوه مجهز به سیستم کنترل رطوبت تحت راهنمایی دکتر احمد نظری و دکتر علی جباری مقدم متعهد می شوم:

- * تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است.
- * در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- * مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچگونه مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- * کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- * حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- * در کلیه مراحل انجام این پایان نامه در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا از آن استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ : ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- * کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و ...)
- متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.
- * استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد.

چکیده:

در این پایان نامه به بررسی یک خشک کن کابین صنعتی با بکارگیری گاز شهری به عنوان منبع تولید حرارت پرداخته شده است. در ابتدا فرض بر آن می‌شود که هوا با رطوبت نسبی وارد خشک کن شود و در مرحله بعد رطوبت ورودی به خشک کن به وسیله چرخ دسیکنت کاهش می‌یابد. روابط مربوط به چرخ دسیکنت از کار سایر محققین استخراج شده و در اینجا مورد استفاده قرار می‌گیرد تا بتوان پس از شبیه سازی ساختمان خشک کن بدست آورد که کانتورهای سرعت، فشار و رطوبت به چه نحوی تغییر می‌کنند. با توجه به محدودیت های سیستمی، نتایج در دو زمان متفاوت بدست می‌آید و مقایسه ای بین مصرف سوخت در حالتی که از چرخ دسیکنت استفاده شده و در حالتی که از چرخ دسیکنت استفاده نمی‌شود انجام می‌پذیرد که نتایج گویای این مطلب است که استفاده از چرخ دسیکنت در کاهش رطوبت های ۵٪ و ۷٪ به ترتیب باعث می‌شود که ۳٪ و ۳/۲٪ در مصرف سوخت صرفه جویی شود. با تحلیل انرژی و اکسرژی مشخص گردید که در صورت تولید بیش از ۱۰۰ تن محصول به شکل سالیانه و قیمت گاز طبیعی بر مبنای قیمت آزاد دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۵ سال خواهد بود. در صورت تولید کمتر یا قیمت گاز یارانه‌ای استفاده از چرخ دسیکنت توجیه اقتصادی نخواهد داشت و دوره بازگشت سرمایه در حدود ۱۹ سال خواهد شد.

کلمات کلیدی: خشک کن، حل عددی، چرخ دسیکنت، بررسی اقتصادی

فهرست عناوین

۱ فصل اول کلیات تحقیق	۱
۱-۱- کلیاتی در ارتباط با اهمیت خشک کردن میوه.....	۲
۱-۲- میوه خشک کن و کاربردهای آن.....	۲
۱-۳- انواع میوه خشک کن ها.....	۳
۱-۴- نحوه استفاده از میوه خشک کن.....	۴
۱-۵- چرخ دسینکت.....	۴
۱-۶- جزییات فصول مطرح شده در این پایان نامه.....	۵
۲ فصل دوم مطالعات پیشین	۷
۳ فصل سوم معادلات حاکم	۱۹
۳-۱- معادلات بکار رفته برای حل جریان و انتقال حرارت در خشک کن.....	۲۰
۳-۲- کلیات جریان توربولانس.....	۲۰
۳-۲-۱- حل عددی مستقیم.....	۲۱
۳-۲-۲- شبیه سازی گرا دبه های بزرگ.....	۲۲
۳-۲-۳- مدل سازی های دیفرانسیلی.....	۲۳
۳-۳- روشهای بوجود آمدن جریان توربولانس.....	۲۳
۳-۴- مدل های توربولانس.....	۲۴
۳-۴-۱- مدل صفر معادله ای.....	۲۵
۳-۴-۲- مدل های یک معادله ای.....	۲۵
۳-۴-۳- مدل های دو معادله ای.....	۲۵
۳-۵- انتخاب روش حل توربولانس.....	۲۶
۳-۶- مدل تلاطم $\epsilon - k$ خطی.....	۲۶

۲۸	۷-۳- مدل تلاطم $\varepsilon - RNG k$
۲۹	۸-۳- مدل تلاطم $\varepsilon - k$ غیر خطی.....
۳۳	۹-۳- معادله نفوذ گونه.....
۳۴	۱۰-۳- شرایط مرزی دیواره.....
۳۵	۱۱-۳- الگوریتم سیمپل.....
۳۵	۱۱-۱- حل معادلات ممنتوم.....
۳۷	۱۱-۲- تصحیح فشار.....
۳۸	۱۱-۳- حل معادله انرژی.....
۳۹	۱۱-۴- حل معادلات توربولانس.....
۳۹	۱۲-۳- روش حل معادلات خطی.....
۳۹	۱۲-۱- روش $TDMA$
۴۱	۴ فصل چهارم روش حل.....
۴۲	۱-۴- بررسی هندسه.....
۴۴	۲-۴- شبکه بندی فضای حل.....
۴۷	۳-۴- معادلات مورد استفاده و شرایط حل.....
۴۹	۵ فصل پنجم نتایج.....
۵۰	۱-۵- مقدماتی جهت ورود به مبحث نتایج.....
۵۰	۲-۵- شرایط مرزی.....
۵۰	۳-۵- چرخ دسیکنت.....
۵۲	۴-۵- بررسی خطوط جریان در خشک کن.....
۵۳	۵-۵- بررسی کانتورهای سرعت.....
۵۸	۶-۵- بررسی کانتورهای فشاری.....
۶۲	۷-۵- بررسی کانتورهای رطوبت.....

۵-۸- بررسی اثرات استفاده از چرخ دسیکنت در ورودی..... ۶۷

۵-۹- تحلیل انرژی و اکسرژی..... ۶۷

۶ فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۹

۶-۱ نتیجه گیری..... ۸۰

۶-۲ پیشنهادات..... ۸۱

مراجع..... ۸۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ خشک کن مورد استفاده توسط اهیم و همکاران [۱]..... ۸
- شکل ۲-۲: خشک کن مورد استفاده توسط استیلینگ و همکارانش [۲]..... ۹
- شکل ۳-۲ نمای کلی از خشک کن ترکیبی مورد استفاده توسط ایوانوا و همکارانش [۳]..... ۱۰
- شکل ۴-۲ نمای کلی از خشک کن ترکیبی مورد استفاده توسط آمر و همکارانش [۴]..... ۱۰
- شکل ۵-۲ وسیله پیشنهاد شده توسط آمر و همکارانش [۴] برای جلوگیری از هدر رفتن هوای گرم خروجی از خشک کن..... ۱۱
- شکل ۶-۲ گرم کننده هوا با استفاده از انرژی خورشیدی..... ۱۲
- شکل ۷-۲ نمونه ای از یک خشک کن پس ماند میوه [۱۴]..... ۱۴
- شکل ۱-۴ نمای کلی از خشک کن مطالعه شده..... ۴۳
- شکل ۲-۴ نمایی از قفسه های چیده شده در خشک کن..... ۴۴
- شکل ۳-۴ شبکه بندی بر روی قفسه های داخل خشک کن..... ۴۵
- شکل ۴-۴: شبکه بندی در یک سطح مقطع از خشک کن..... ۴۶
- شکل ۵-۴ شبکه بندی در یک سطح مقطع از خشک کن در نمای نزدیک..... ۴۶
- شکل ۱-۵ خطوط جریان در حالتی که سبدها نمایش داده نشده است..... ۵۳
- شکل ۲-۵ خطوط جریان در حالتی که سبدها نمایش داده شده است..... ۵۳
- شکل ۳-۵ کانتورهای سرعت در قسمت میانی سبدها در خشک کن از نمای ایزومتریک..... ۵۴
- شکل ۴-۵ کانتور سرعت در مقطع شماره ۱..... ۵۵
- شکل ۵-۵: کانتور سرعت در مقطع شماره ۲..... ۵۶
- شکل ۶-۵ کانتور سرعت در مقطع شماره ۳..... ۵۶
- شکل ۷-۵ کانتور سرعت در مقطع شماره ۴..... ۵۷
- شکل ۸-۵ کانتور سرعت در مقطع شماره ۵..... ۵۷
- شکل ۹-۵ کانتورهای فشار در قسمت میانی سبدها در خشک کن از نمای ایزومتریک..... ۵۸

شکل ۵-۱۰: کانتور فشار در مقطع شماره ۱.....	۵۹
شکل ۵-۱۱: کانتور فشار در مقطع شماره ۲.....	۶۰
شکل ۵-۱۲: کانتور فشار در مقطع شماره ۳.....	۶۰
شکل ۵-۱۳: کانتور فشار در مقطع شماره ۴.....	۶۱
شکل ۵-۱۴: کانتور فشار در مقطع شماره ۵.....	۶۲
شکل ۵-۱۵: کانتورهای رطوبت در قسمت میانی سبدها در خشک کن از نمای ایزومتریک.....	۶۳
شکل ۵-۱۶: کانتور رطوبت در مقطع شماره ۱.....	۶۴
شکل ۵-۱۷: کانتور رطوبت در مقطع شماره ۲.....	۶۵
شکل ۵-۱۸: کانتور رطوبت در مقطع شماره ۳.....	۶۵
شکل ۵-۱۹: کانتور رطوبت در مقطع شماره ۴.....	۶۶
شکل ۵-۲۰: کانتور فشار در مقطع شماره ۵.....	۶۶
شکل ۵-۲۱: تغییرات فشار بخار آب اشباع بر حسب دما.....	۶۹

فهرست جداول

جدول ۵-۱: مشخصات گاز طبیعی به طور میانگین.....	۷۰
جدول ۵-۲: محاسبات قانون اول.....	۷۳
جدول ۵-۳: محاسبات مربوط به اغزرژی.....	۷۴
جدول ۵-۴: دوره برگشت سرمایه با عبور هوای ورودی از چرخ دسیکنت.....	۷۶
جدول ۵-۵: دوره برگشت سرمایه با عبور هوای خروجی از چرخ دسیکنت.....	۷۷

فهرست علائم و اختصارات

$\bar{U}$	متوسط زمانی سرعت
$\bar{\tau}$	تنش توربولنت متوسط زمانی
μ_t	ویسکوزیته توربولنت
μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال
G_k	نرخ تولید انرژی توربولانسی
G_b	نمایش دهنده تولید انرژی آشفتگی
σ_ε	پیرانتل توربولانس
e'_{ij}	نرخ کرنش نوسانی
k	انرژی جنبشی تلاطم
ε	نرخ استهلاك انرژی
ρ	چگالی سیال
C_μ	ضریب ثابت
Ω	تانسور نرخ چرخش
S	تانسور نرخ کرنش
Y_i	غلظت گونه i
R_i	نرخ تولید گونه i
$\vec{J}_i$	شار نفوذ جرمی گونه i
μ_t	ویسکوزیته توربولانس
D_t	نفوذ توربولانس
C_μ	ضریب ثابت
p^*	میدان فشار
α_p	ضریب زیرتخفیف

فصل اول کلیات تحقیق

۱-۱- کلیاتی در ارتباط با اهمیت خشک کردن میوه

در بسیاری از موارد نیاز می‌شود که محصولات کشاورزی بدست آمده مانند میوه و سبزیجات خشک شوند تا بتوان برای مدت زمان بیشتری آنها را نگه داشت. گروهی از محصولات کشاورزی مربوط به زمان خاصی از سال می‌شوند. بنابراین با خشک کردن محصولات می‌توان از آنها در بازه بزرگتری از سال استفاده کرد بدون آنکه محصول بدست آمده فاسد شود. همچنین گاهی محصول کشاورزی بدست آمده حاصل شرایط آب و هوایی خاصی است و در منطقه بخصوصی از دنیا می‌توان آن را کشت کرد. این محصول را می‌توان در اختیار گروه بزرگتری از انسانها که در آن ناحیه زندگی نمیکنند، قرار داد. برای انتقال محصول کشاورزی راه‌های بسیار زیادی پیشنهاد شده است که یکی از این راه‌ها خشک کردن محصولات کشاورزی در مبدا و انتقال آن بصورت محصول خشک به مقصد است بطوریکه اطمینان حاصل شود در طول مسیر فاسد نخواهد شد. تعداد زیادی از محققین مطالعات جامعی را در ارتباط با خشک کردن محصولات کشاورزی انجام داده اند که تعدادی از این تحقیقات در ادامه آورده شده است.

۱-۲ میوه خشک کن و کاربردهای آن

یک دستگاه میوه خشک کن دارای چندین سبد و و یک درپوش می‌باشد. منبع تغذیه به المنت حرارتی یا هر وسیله تولید گرمای دیگری و فن مجهز می‌باشند. با استفاده از انرژی برق یا سوختن سوخت فسیلی بطور مستقیم گرما تولید می‌شود و با استفاده از فن حرارت و گرما به صورت یکنواخت در تمامی طبقات دستگاه میوه خشک کن هدایت می‌شود. و میوه‌ها بدون اینکه پخته شوند آب میان بافتی خود را از دست میدهند و به آرامی خشک می‌شوند، با خشک شدن آب میان بافتی دیگر فضایی برای رشد میکروب، قارچ و کپک‌ها باقی نمی‌ماند.

میوه خشک کن از آن دست دستگاه‌هایی می‌باشد که مدتی است به منازل ما راه پیدا کرده و مورد استقبال نیز قرار گرفته است. با استفاده از میوه خشک کن به راحتی می‌توان انواع میوه‌ها را خشک کرد و به عنوان یک خوراکی سالم و مقوی در طول سال از آن استفاده نمود. میوه خشک را می‌توان به عنوان یک تغذیه عالی در کیف مدرسه کودکان خود قرار داد. در واقع با استفاده از میوه خشک کن می‌توان

به راحتی انواع چیپس میوه را تهیه کردو در فصول مختلف سال از آن استفاده کرد.

یکی از مزایای استفاده از دستگاه میوه خشک کن جلوگیری از هدر رفتن آنها می باشد. گاهی با پوسیدگی میوه ها مواجه شده و سعی به پیدا کردن راه حلی می شود تا از هدر رفتن آنها جلوگیری به عمل آید. با استفاده از این دستگاه می شود میوه ها را به چیپس های خشک تبدیل کرد. با این کار به راحتی می شود مدت زمانی طولانی از آنها استفاده کرد بدون اینکه پوسیده شوند و یا کپک بزنند. همچنین این راهکار کمک می کند تا مواد مغذی و ویتامین ها ی میوه ها نیز حفظ شود و ارزش غذایی خود را داشته باشند.

دستگاه میوه خشک کن دارای چندین سبد و و یک درپوش می باشد. منبع تغذیه به المنت حرارتی یا هر وسیله گرمایشی دیگری و فن مجهز می باشند. با استفاده از انرژی برق و سایر انرژی ها، حرارت تولید شده و با استفاده از فن حرارت به صورت یکنواخت در تمامی طبقات دستگاه هدایت می شود. و میوه ها بدون اینکه پخته شوند آب میان بافتی خود را از دست میدهند و به آرامی خشک می شوند، با خشک شدن آب میان بافتی دیگر فضایی برای رشد میکروب، قارچ و کپک ها باقی نمی ماند و از این رو میشود برای مدت زمان طولانی میوه های خشک را در منزل نگهداری کرد. البته دقت شود محل نگهداری میوه های خشک بهتر است خشک و تاریک باشد. میوه خشک کن در واقع ابزاری است که می توان انواع سبزیجات غلات و حتی گل را در آن خشک کرد. همچنین با استفاده از این دستگاه می توان لواشک های خانگی را به راحتی تهیه نمود.

۳-۱ انواع میوه خشک کن ها

میوه خشک کن ها با توجه به نوع جریان هوایی که ایجاد می کنند به دو نوع تقسیم می شوند: جریان عمودی و جریان افقی. برخی از دستگاههای میوه خشک کن به صورت طبقات دایره ایی شکل هستند و طبقات بر روی هم قرار می گیرند. در این نوع از دستگاه ها منبع تولید انرژی گرمایی معمولا در کف تعبیه می شود. از جمله معایب این نوع از دستگاه ها نیز همین است که برای برداشتن طبقات زیرین باید تمام طبقات بالایی را از جای خود حرکت دهید تا به آن دسترسی داشته باشید.

در دستگاه هایی که با جریان افقی حرارت کار می کنند منبع تولید حرارت در پشت دستگاه قرار دارد و در ضمن سبد ها به صورت کشویی بر روی هم قرار می گیرند و در دستگاه از پهلوی باز می شود. از این رو دسترسی به هر طبقه به صورت کاملاً مجزا از هم می باشد.

۴-۱ نحوه استفاده از میوه خشک کن

میوه های برش زده را در سینی ها قرار داده و سعی میشود از پوشاندن تمام شبکه ها پرهیز نمود، تا هوای گرم داخل دستگاه خوب گردش نماید. برای کارایی بهتر فقط از تعداد سینی های مورد نیاز استفاده می شود. پس از چیدن سینی های حاوی میوه بر روی هم، در پوش را روی آنها قرار داده و دستگاه روشن می شود تا خشک کردن میوه ها شروع شود. خشک کردن خوردنی ها راهی بسیار خوب برای نگهداری آنها است. با استفاده از دمای کنترل شده هوا از بالا به طرف پایین دمیده شده و سپس از میان شبکه سینی ها به طرف بالا گردش می کند. گردش هوا باعث خارج شدن رطوبت از مواد خوراکی و نهایتاً خشک شدن آن می شود. این روش طعم، مزه و خواص میوه ها را بخوبی حفظ میکند. با خشک کردن میوه ها و سبزی های تازه و رسیده می توان تمام سال و همه فصول از آنها استفاده کرد. نگهداری میوه و سبزی خشک شده بسیار آسان است و چون حجم آن کم شده است فضای بسیار کمی را برای نگهداری اشغال میکند. میوه و سبزیهای خشک شده را با استفاده از ظروف در بسته که از ورود هوا جلوگیری می کنند می توان برای زمان های طولانی نگهداری کرد. میوه ها و سبزی هایی که با دستگاه میوه خشک کن خشک می شود کیفیت، طعم و رنگ بهتری از مواد موجود در فروشگاه ها داراست و دلیل آن عدم استفاده از نگهدارنده های شیمیایی و رنگ مصنوعی است.

۵-۱ چرخ دسیکنت

رطوبت زدایی در یک چرخه دسیکنت جامد به روش سیرکوله کردن دو جریان هوای متفاوت با رطوبت های نسبی بالا و پایین (جریان ورودی با رطوبت نسبی بالا و جریان بازیافت با رطوبت نسبی پایین) از روی ماده جاذب انجام می گیرد. تقریباً تمام مواد به نوعی دسیکنت هستند، به این معنا که بخار آب را

جذب کرده و نگه می‌دارند. عمل جذب همواره حرارت محسوسی برابر با حرارت نهان بخار آب جذب شده توسط دسیکنت، بعلاوه حرارت افزوده‌ای از جذب را تولید می‌کند، این حرارت به ماده دسیکنت و هوای محیط انتقال می‌یابد. دسیکنت‌ها در خشک کردن هوا برای کاهش دمای نقطه شبنم نیز استفاده می‌شوند. در این حالت می‌توان رطوبت را بدون گرمایش از دسیکنت گرفت. پروسه بازیافت با به کارگیری اختلاف فشار بخار بین فشار نهایی هوا و فشار جریان هوای محیط انجام می‌گیرد. همچنین دسیکنت‌ها برای خشک کردن هوای سیرکوله در سیستم‌های تهویه و سرمایش استفاده می‌شوند. اولین بار در اواسط دهه هفتاد دسیکنت‌های رطوبت زدا در صنایع خاصی چون داروسازی و تولید لوازم الکترونیکی که تولیدات آنها به رطوبت حساس بود، مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین برای جلوگیری از ایجاد خوردگی و سایر زیان‌های ناشی از رطوبت به هنگام انبار کردن تولیدات نیز از دسیکنت‌ها استفاده می‌کردند. بیشتر دسیکنت‌های رطوبت زدا در آن زمان از بسترهای فشرده‌ای از سلیکاژل و یا سایر ذرات دیگر تشکیل می‌شدند. نظری اجمالی بر نحوه عملکرد سیستم‌های سرمایش دسیکنت جامد بیانگر این مطلب است که طرز کار این سیستم‌ها در کل و به صورت عام بر یک پایه و اساس بنا شده است. رطوبت زدایی در این سیستم‌ها به روش سیرکوله کردن دو جریان هوای متفاوت با رطوبت‌های نسبی بالا و پایین (جریان ورودی با رطوبت نسبی بالا و جریان بازیافت یا رطوبت نسبی پایین) از روی ماده دسیکنت، انجام می‌گیرد. جریان هوای مرطوب ورودی، با جذب رطوبت توسط مواد دسیکنت خشک می‌شود، که باعث افزایش درصد رطوبت در روی سطح دسیکنت شده و سپس رطوبت انباشته در ماده دسیکنت توسط جریان هوای خشک بازیافتی جذب می‌شود که عموماً این جریان به فضای بیرون ارسال می‌گردد.

۱-۶ جزئیات فصول مطرح شده در این پایان نامه

در این پایان نامه یک خشک کن مورد مطالعه قرار می‌گیرد و هوای ورودی به خشک کن در دو حالت در نظر گرفته می‌شود که در حالت اول هوا به همراه رطوبت وارد خشک کن می‌شود که یک نمونه از حالاتی است که قرار است خشک کن در شهرهای با رطوبت بالا مورد استفاده قرار گیرد. در حالت دوم از روابط بدست آمده برای چرخ دسیکنت در مقالات پیشین استفاده شده و هوای ورودی به خشک کن به

وسیله آن رطوبتش را از دست می‌دهد و سپس وارد خشک کن می‌شود. روابط زیادی وجود دارند که خروجی چرخ دسیکنت را بصورت تابعی از سرعت حرکت چرخ دسیکنت و دیگر پارامترها ارائه می‌دهند و در اینجا از این روابط استفاده می‌شود.

در فصل اول از این پایان نامه مختصری در ارتباط با خشک کن مطالبی ارائه گردیده است که در بالا بیان شده است.

در فصل دوم از این پایان نامه کارهای صورت گرفته توسط سایر محققین در این ارتباط مورد تحلیل قرار گرفته و اطلاعاتی از کارهای پیشین بیان می‌شود.

در فصل سوم از این پایان نامه در ارتباط با معادلات حاکم مطالبی بیان می‌شود و تشریح خواهد شد که چه معادلاتی برای حل این پایان نامه مورد نیاز است.

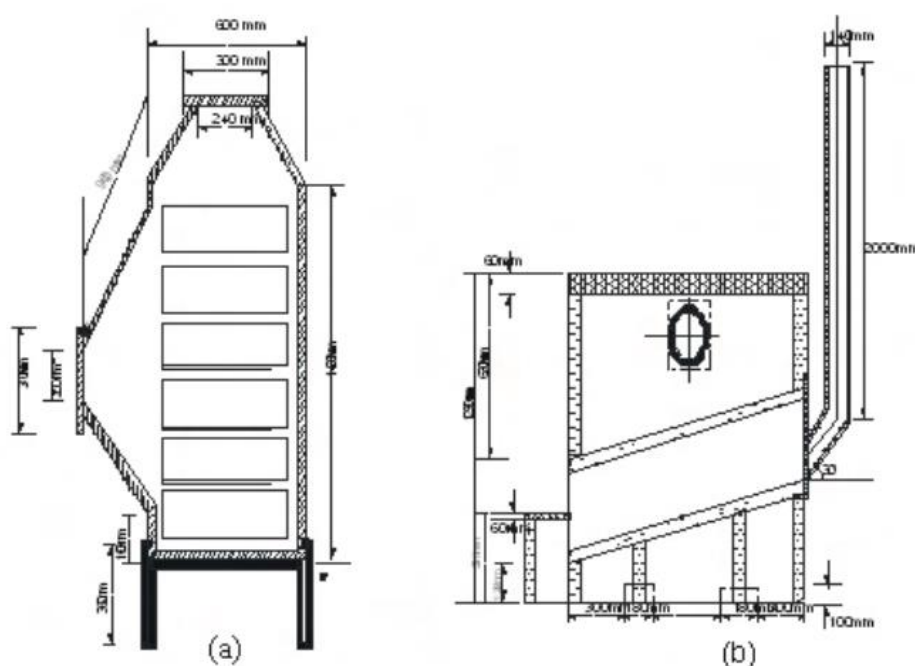
در فصل چهارم این پایان نامه هندسه مورد بررسی و نحوه مدلسازی شرح داده می‌شود و بیان می‌گردد که مسیر حل به چه صورتی است.

در فصل پنجم از این پایان نامه نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفته می‌شود و پارامترهای خروجی گوناگون مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

فصل دوم مطالعات پیشین

مطالعات بسیار جامعی در ارتباط با انواع خشک کن ها انجام شده است که در اینجا تعدادی از کارهای پیشین معرفی شده و نشان داده می شود که چه نتایجی بدست آمده است.

اهیم و همکارانش [۱] به بررسی یک خشک کن صنعتی میوه پرداختند. آنها سعی بر مطالعه خشک کردن گوجه فرنگی کردند تا بتوانند این محصول را برای مدت زمان بیشتری مورد استفاده قرار دهند. خشک کنی که توسط آنها مورد بررسی قرار گرفته شده بود از سه قسمت اصلی تشکیل شده است که عبارتند از کابین خشک کن، دمنده و وسیله تبادل حرارت.



شکل ۱-۲ خشک کن مورد استفاده توسط اهیم و همکاران [۱]

آنها گوجه را در ابعاد مختلف برش داده و درون دستگاه به نحوی قرار دادند که مدت زمان حضور گوجه و دبی سیال ورودی به محفظه خشک کن متغیر فرض شده بود. آن ها وزن نهایی محصولات را به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته و نشان دادند که با افزایش سرعت دمش باد، وزن محصول خشک بدست آمده کاهش می یابد.

استیلینگ و همکارانش [۲] به بررسی یک خشک کن خورشیدی پرداختند که هدف از آن خشک کردن گوجه فرنگی است. آنها مطالعات خود را در دو حالت کلی انجام دادند که در مورد اول یک خشک کن ثابت مورد بررسی قرار گرفته شده بود و این در حالی است که در حالت دوم صفحات تقویت کننده

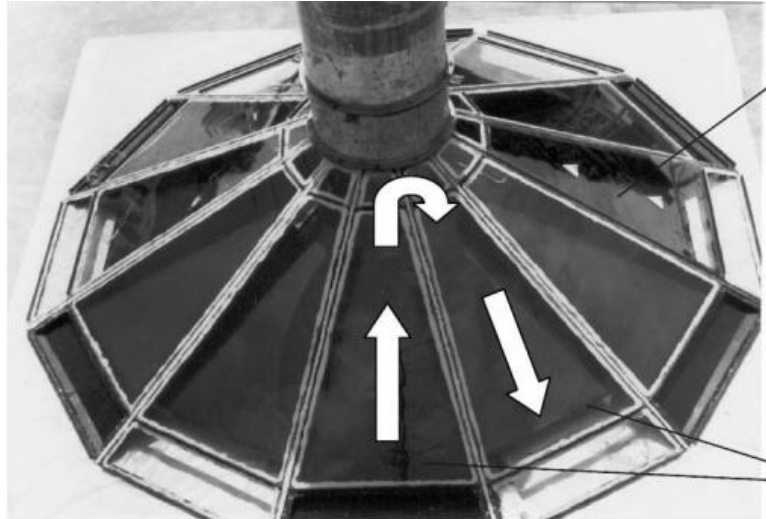
شار حرارتی بکار گرفته شده بود که باعث میشد تمرکز تابش بر نقطه خاصی صورت پذیرد. در شکل زیر نشان داده شده است که شکل هندسی خشک کن به چه صورتی است.



شکل ۱-۲: خشک کن مورد استفاده توسط استیلینگ و همکارانش [۲]

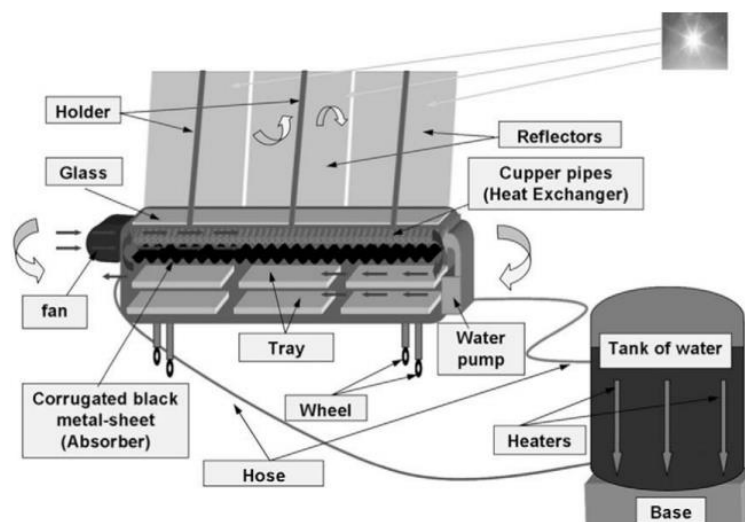
آنها نشان دادند که با بکارگیری وسایل جمع کننده شار مشاهده می شود که دمای درون خشک کن تا میزان ۱۰ درجه افزایش می یابد که این امر منجر به کاهش زمان خشک شدن محصولات تا ۲۷ درصد می شود.

ایوانوا و همکارانش [۳] در دانشگاه بلغراد یک مطالعه در ارتباط با انرژی و عملکرد اقتصادی خشک کن برای محصولات کشاورزی انجام دادند. آنها منابع مختلف انرژی را مانند انرژی خورشیدی، زمین گرمایی و .. مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که حرارت مورد نیاز برای خشک کردن محصولات کشاورزی می تواند از هریک از این منابع تامین شود. نمای کلی از خشک کنی که آنها بطور خاص در ماه های مختلف سال مورد بررسی قرار داده اند در شکل زیر آورده شده است.



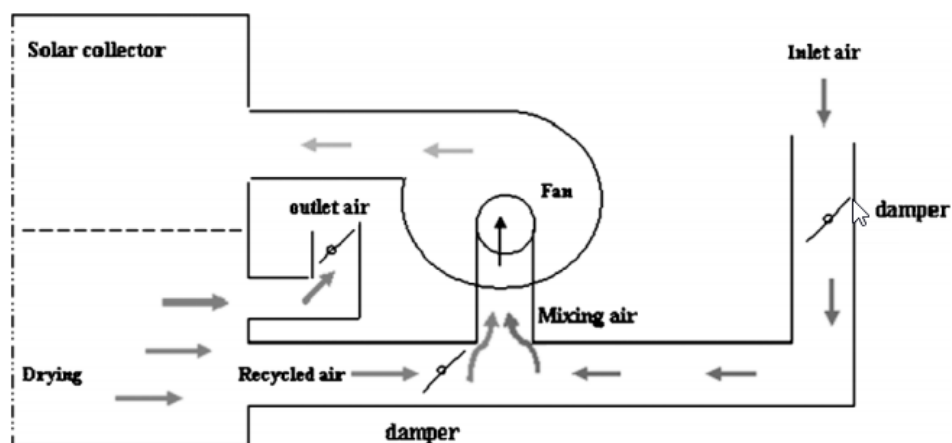
شکل ۲-۳ نمای کلی از خشک کن ترکیبی مورد استفاده توسط ایوانوا و همکارانش [۳]

آمر و همکارانش [۴] یک خشک کن میوه ترکیبی را مورد بررسی قرار دادند که از انرژی خورشیدی و سیله تبادل حرارت توان خود را بدست می‌آورد. آنها نشان دادند که در روزهای آفتابی می‌توان از کلکتورهای خشک کن استفاده کرده و انرژی خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی کافیست. همچنین نشان داده شده است که در هنگامی که آسمان ابری باشد انرژی مورد نیاز برای خشک کردن محصولات می‌تواند از طریق وسیله تبادل حرارت تعمین شود. همچنین در طول شب از انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز که یک تانک آب است برای خشک کردن محصولات استفاده می‌شود. شکل کلی خشک کن مورد بررسی در زیر آورده شده است.



شکل ۲-۴ نمای کلی از خشک کن ترکیبی مورد استفاده توسط آمر و همکارانش [۴]

آنها سیستمی را پیشنهاد کردند که هوای گرم درون خشک کن دیگر از محفظه به بیرون راه پیدا نکند. بلکه توسط سیستمی به مانند شکل زیر مجدداً به کلکتور راه پیدا کرده و گرم شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲-۵ وسیله پیشنهاد شده توسط آمر و همکارانش [۴] برای جلوگیری از هدر رفتن هوای گرم خروجی از خشک کن

آنها موز را به عنوان محصول کشاورزی انتخاب کرده و سعی بر آن شده بود تا به وسیله سیستم پیشنهادی توسط آنها، رطوبت موجود در موز به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش یابد.

سریکومار [۵] از یک گرم کننده هوا که با انرژی خورشیدی کار می‌کند برای خشک کردن میوه استفاده کرده است. شکل کلی گرم کننده هوای خورشیدی مورد مطالعه توسط او در شکل زیر آورده شده است.



شکل ۲-۶ گرم کننده هوا با استفاده از انرژی خورشیدی

او قطعات نازک آناناس را به عنوان محصول کشاورزی انتخاب کرد و سعی بر آن شد که رطوبت این محصول از مقداری بالاتر از ۸۰ درصد به مقدار پایین تر از ۱۰ کاهش یابد. نتایجی که بدست آمد با آنچه با سوخت فسیلی بدست می‌آید مقایسه گردید تا نشان داده شود که استفاده از انرژی خورشیدی با احتساب هزینه اولیه، باعث کاهش هزینه در خشک کردن محصولات می‌شود.

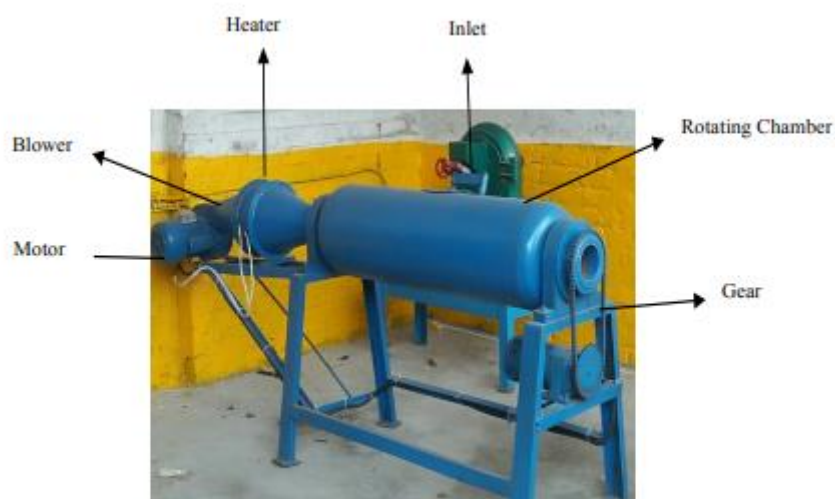
ژانگ و لیتچفیلد [۶] یک فرآیند خشک کردن ذرت در یک خشک کن لایه ای نازک در مقیاس آزمایشگاهی را بهینه کردند. سه نوع متفاوت استراتژی برای خشک کردن محصول توسط آنها مورد بررسی قرار گرفت. بالا و موندول [۷] از یک تونل خشک کن برای از بین بردن رطوبت ماهی استفاده کردند. تونل آنها یک بخش شفاف داشت که بر روی تونل قرار داشت و هوای گرم از طریق چهار فن به داخل این ناحیه دمیده میشد. آکپینار و همکاران [۸] به بررسی تجربی یک خشک کن سیب زمینی پرداختند که سیب زمینی به صورت حلقوی درون آن قرار می‌گرفت. پس از انجام مطالعه تجربی، مدلسازی خشک کن را با استفاده از روش‌های موجود در مقال پیشین انجام دادند. چگینی و قبادی [۹] به بررسی خشک کن اسپیری پرداختند که در آن هدف افزایش غلظت آب میوه است. آنها آب پرتغال را به عنوان مورد محاسباتی انتخاب کردند. خشک کردن میوه به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که تمامی این پارامترها باید هنگام طراحی دستگاه مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت آنها توانستند غلظت آب پرتغال را تا ۶۵٪ افزایش دهند. گویال و

همکاران [۱۰] به بررسی خشک کردن آلو پرداختند. آنها قطعه هایی از آلو را در یک خشک کن قرار داده که با باد گرم ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درجه سانتی گراد عمل خشک کردن در آن صورت می پذیرفت. زارعین و همکاران [۱۱] به بررسی یک خشک کن میکرو ویو پرداختند که در آن لایه های نازک سیب خشک می شود. توان مورد استفاده میکرو ویو ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ وات در نظر گرفته شده است. پاتانیاک و همکاران [۱۲] به بررسی خشک کن برنج پرداختند. آنها از بستر سیال برای خشک کردن استفاده کردند و از قانون اول و دوم ترمودینامیک برای محاسبات بهره جستند.

خشک کن های کابینتی محبوب ترین تجهیزات برای خشک کردن میوه ها هستند. یکی از اشکالات این خشک کن ها می تواند عدم یکنواختی در میزان رطوبت مطلوب محصول نهایی باشد. خشک کن کابینتی جدید با یک محفظه ساخته و ارزیابی شده است [۱۳]. برای به دست آوردن توزیع یکنواخت جریان هوا و دما در حال خشک کردن با در نظر گرفتن شرایط کلی کار، هفت هندسه مختلف خشک کن کابینتی از نظر تئوری و به صورت تجربی پیش بینی شده است. آزمایشات روی مناسب ترین طرح با جریان هوا و توزیع دما یکنواخت قابل قبول انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که خشک کن کابینت جدید توزیع یکنواخت سرعت هوا و دما را در سراسر خشک کن نشان می دهد. با مقایسه داده های آزمایشی و پیش بینی شده، ضریب همبستگی بسیار خوبی به ترتیب ۹۹/۹ و ۸۶/۵ درصد برای دمای خشک شدن هوا و سرعت هوا در محفظه خشک شدن به دست آمد.

ضایعات مرکبات پسماند جامدی است که پس از فشرده شدن میوه های تازه برای آب آنها باقی می ماند. پاکستان در میان ده کشور برتر تولید مرکبات در جهان قرار دارد. پاکستان سالانه ۲.۱۶ میلیون تن در تولید زباله های میوه کمک می کند. ضایعات تازه مواد غذایی اغلب به صورت محلی برای تغذیه حیوانات به عنوان تقویت کننده شیر استفاده می شود. وقتی میوه های تازه فشرده می شوند، پس مانده جامد تولید می شود که معمولاً به عنوان ضایعات مرکبات شناخته می شود. ضایعات مرکبات تازه دارای اسیدیته طبیعی هستند، اما به دلیل داشتن رطوبت زیاد و قند محلول هنوز محصولی فاسدشدنی است. معمولاً برای از بین بردن میزان رطوبت تا کمتر از ۱۰٪ از روش کم آبی استفاده می شود تا ماندگاری برای

حمل و نقل آسان افزایش یابد. مطالعه صورت گرفته [۱۴] امکان طراحی یک خشک کن هوای گرم و دوار را که دارای بدنه چرخشی داخلی است، مورد بررسی قرار می‌دهد. راندمان خشک شدن با افزایش دمای داخلی و سرعت جریان هوا در درام چرخشی افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش سرعت درام راندمان خشک شدن کاهش می‌یابد. خشک کن با هوای گرم طراحی شده اصول اساسی را برای صنعت تفاله میوه فراهم می‌کند که می‌تواند به راحتی از این فناوری استفاده کنند. این خشک کن را می‌توان در صنعت خمیر کاغذ نصب کرد و ضایعات را می‌توان از نقطه منبع پردازش کرد. روند کم آبی باعث افزایش ماندگاری مواد زائد مرکبات می‌شود و در طول سال در سراسر کشور در دسترس خواهد بود. مواد کم آب می‌توانند مقدار شیر حیوان را افزایش دهند. نمایی از خشک کن مورد بررسی توسط آنها در شکل زیر آورده شده است.



شکل ۲-۷ نمونه ای از یک خشک کن پس ماند میوه [۱۴]

افزایش جمعیت و هزینه بالای سوخت فرصت هایی را برای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر برای فرآوری مواد غذایی پس از برداشت فراهم کرده است. پردازش غذا با استفاده از انرژی خورشیدی یک فناوری نوظهور است که غذاهای با کیفیت خوب و بدون سوخت اضافی را ارائه می‌دهد. در حال حاضر تعداد زیادی خشک کن، جمع کننده و متمرکز کننده خورشیدی برای مراحل مختلف در پردازش مواد غذایی استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن این نیاز آینده، یک خشک کن خورشیدی در یک مرکز تحقیقاتی

طراحی و تولید شد [۱۵] تا محصولات کشاورزی فاسدشدنی را خشک کند. عملکرد خشک کن خورشیدی نوع جعبه ای با نوعی میوه محبوب در هند ارزیابی شد که بسیار فاسد شدنی است.

گروهی از محققین یک سیستم خشک کردن جدید را برای حفظ میوه های گرمسیری کشف کردند [۱۶] که انگیزه آن نیازهای یک شرکت تعاونی کشاورزی در هائیتی بود. اکثر فن آوری های خشک کردن خورشیدی به جمع کننده های لعاب متکی هستند، اما در جوامع روستایی به راحتی در دسترس نیستند. یک سیستم خشک کردن نمونه اولیه با هزینه کم و نگهداری کم طراحی، ساخته و آزمایش شده است. این سیستم شامل یک جاذب خورشیدی قابل تعویض است که از پارچه ارزان قیمت، محفظه خشک کن و دودکش ساخته شده است. محفظه خشک کردن میوه را در خود جای داده و دودکش باعث جریان هوا می شود. در یک آزمایش، ۴ کیلوگرم برش موز در هر متر مربع سطح جاذب از متوسط رطوبت ۷۳ درصد وزنی تا ۸ درصد وزنی طی دو روز خشک می شود.

اندونزی کشوری با آب و هوای گرمسیری است که دارای دو فصل است، یعنی فصل خشک و باران. در فصل خشک، خشک کردن در برابر آفتاب بیشترین کاربرد را برای محصولات کشاورزی دارد. در فصل بارندگی، افرادی که در بخش پردازش مواد غذایی فعالیت می کنند، در پیش بینی هوا مشکل دارند. جامعه نیاز به انرژی حرارتی خورشیدی دارد تا مواد غذایی را خشک کند. تحقیقی [۱۷] در چندین مرحله انجام شده است، یعنی مشاهده میدانی، طراحی، ساخت و آزمایش عملکرد. این مطالعه می گوید: (۱) مراحل ساخت دستگاه خشک کن برقی در سه مرحله انجام شد: مرحله اولیه، مرحله پیشرفته و مرحله نهایی. (۲) از آزمایش دستگاه خشک کن برقی برای خشک کردن موز استفاده شد. موز قبل از خشک شدن ۷.۳ اونس و پس از خشک شدن ۴.۵ اونس وزن دارد؛ (۳) دستگاه خشک کن برقی در روند خشک کردن محصولات فرآوری شده مواد غذایی بسیار مفید است.

گروهی از دانشمندان [۱۸] انتقال همزمان گرما و جرم بین باقی مانده های آکرولا و هوا را در یک خشک کن بستر ثابت با یک لایه ضخیم مورد تجزیه و تحلیل قرار داده اند. آنها از یک مدل دو فاز مناسب استفاده کردند که با استفاده از روش عددی حل شد. آنها نتایج شبیه سازی را با داده های آزمایشی به

دست آمده در یک واحد آزمایشی در موقعیت های مختلف مقایسه کردند. نتایج شبیه سازی شده توافق خوبی با داده های تجربی نشان می دهد. مدل پیشنهادی همچنین قادر بود ناهمگنی فرآیند را پیش بینی کند.

یکی از رنگهای طبیعی که می تواند در غذا استفاده شود، بتاسیانین از میوه اژدهای قرمز است. بتاسیانین استخراج شده از میوه اژدهای قرمز برای رنگهای غذایی مورد استفاده قرار می گیرد. فرآیند خشک کردن یکی از مراحل مهم تولید عصاره بتاسیانین از میوه اژدها است. هدف از تحقیق گروهی از دانشمندان [۱۹] بررسی روند خشک کردن عصاره بتاسیانین از میوه اژدهای قرمز با استفاده از خشک کن اسپری در شرایط مختلف عملکرد بود. مالتودکسترین (۳۰٪) به عنوان ماده پر کننده به عصاره ها اضافه شد. دمای ورودی که در شرایط خشک کن اسپری استفاده می شود: ۱۴۰ درجه سانتیگراد، ۱۶۰ درجه سانتیگراد و ۱۸۰ درجه سانتیگراد است. نتایج نشان داد که بالاترین میزان بتاسیانین در عصاره های میوه کامل اژدها با اسپری خشک کن با دمای ورودی ۱۴۰ درجه سانتیگراد مشاهده شد.

آق خانی و همکارانش [۲۰] عملکرد یک خشک کن خورشیدی با جریان هوای اجباری، مجهز به سامانه گردش هوای بسته، که مناسب خشک کردن محصولات با ارزش در حجم کم از قبیل گیاهان دارویی و زعفران است؛ بررسی کردند. خشک کن مورد ارزیابی شامل جمع کننده خورشیدی، محفظه محصول، محفظه مواد جاذب رطوبت سیلیکاژل، دمنده، کانال های عبور هوا و سامانه اندازه گیری و کنترل بود. به منظور بررسی عملکرد دستگاه از گیاه نعناع استفاده شد و نرخ خشک شدن و میزان انرژی مصرفی در سه سطح فاکتور دما (۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سیلسیوس) و در دو حالت سامانه گردش هوای باز و بسته اندازه گیری و مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه گردش هوای بسته تاثیر بسیار معنی داری بر انرژی مصرفی و بازده خشک کن دارد. افزایش دمای هوای خشک کننده در سامانه هوای باز، باعث کاهش زمان و بازده خشک شدن و افزایش انرژی مصرفی شد. در حالی که در سامانه گردش هوای بسته، با افزایش دما؛ انرژی مصرفی کاهش، بازده خشک کن و سرعت خشک شدن افزایش یافت.

الهام و همکارانش [۲۱] فرآیند خشک کردن و چروکیدگی میوه زالزالک در یک مقیاس آزمایشگاهی

را مورد مطالعه قرار دادند. میوه زالزالک در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد با سرعت های جابجایی هوای ورودی ۰/۹۲ و ۱/۰۶ متر بر ثانیه با فرکانس های ۶/۸، ۷/۵ و ۸/۲ در یک خشک کن بستر شناور ارتعاشی با استفاده از یک سامانه جذب سطحی با بسترهای پر شده از جاذب سیلیکاژل به منظور کنترل رطوبت هوای ورودی از حدود ۲۷ درصد نسبی به ۴ درصد نسبی خشک شد. نتایج نشان دادند که زمان خشک شدن میوه زالزالک در یک خشک کن بستر شناور ارتعاشی با استفاده از یک سامانه جذب سطحی نسبت به زمان خشک شدن آن در یک خشک کن بستر شناور ارتعاشی بدون استفاده از سامانه جذب سطحی به منظور کاهش رطوبت هوای ورودی به صورت قابل ملاحظه ای کاهش یافته است و مقدار این کاهش برای شرایط عملیاتی مختلف متفاوت است.

در خشک کن خورشیدی بررسی شده توسط مهدیه دوروزی [۲۲] که مجهز به سامانه فتوولتائیک گرمایی و مایع جاذب رطوبت است، از محلول کلرید کلسیم با غلظت ۳۰ درصد وزنی برای احیای مایع جاذب از گرمای پنل فتوولتائیک استفاده شد. نمونه های رسیده گوجه فرنگی به صورت ورقه هایی به ضخامت حدود ۲-۳ میلی متر به منظور خشک کردن، تهیه شد. آزمایش ها در سه سطح دمای ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس، سه سطح رطوبت فعال سازی پمپ مایع جاذب رطوبت ۱۸، ۲۳ و ۲۸ درصد و در قالب طرح فاکتوریل کامل تصادفی انجام گرفت. نتایج نشان داد افزایش دما از ۶۰ به ۷۰ درجه سلسیوس اثر معناداری بر کاهش زمان خشک شدن نداشت. با افزایش رطوبت از ۱۸ به ۲۸ درصد، زمان خشک شدن ۳۷ درصد افزایش و سهم انرژی خورشیدی ۱۱/۵ درصد بهبود یافت. با افزایش دمای خشک کنی از ۶۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، میانگین انرژی الکتریکی مصرفی ۷۰ درصد افزایش یافت.

در این تحقیق نیز رطوبت هوای ورودی به خشک کن به وسیله روابطی که برای چرخ دسیکنت وجود دارد کاهش داده می شود و اثر آن بر خشک کردن میوه مورد آنالیز قرار میگیرد.

فصل سوم معادلات حاکم

۳-۱- معادلات بکار رفته برای حل جریان و انتقال حرارت در خشک کن

در بررسی خشک کردن میوه در یک خشک کن نیاز است که معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را به عنوان معادلات اساسی حل کرد. از آنجا که این معادلات به دفعات در کتاب های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده اند، از ارائه توضیحات تکراری در این پایان نامه جلوگیری می شود. در کنار این معادلات، با توجه به هندسه خشک کن و نیز قرار گیری میوه ها در آن، نوسانات سرعت در جریان پدیدار می شود که این امر باعث می شود که جریان متلاطم شده برای حل میدان جریان و دما نیاز شود که نوسانات سرعت محاسبه شود. برای آنکه بتوان توربولانس را در مسئله مورد بررسی قرار داد، روشهای گوناگونی وجود دارد که عبارتند از حل مستقیم و نیز مدلسازی که در قسمت بعد به تفصیل توربولانس مورد بررسی قرار می گیرد و در انتها انتخاب خواهد شد که از چه روشی در این پایان نامه استفاده می شود.

در هنگام خشک کردن میوه، عملاً آب از سطح و حجم میوه جدا شده و بصورت بخار در خشک کن جریان می یابد که می بایست این حرکت بخار در خشک کن نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در دو حالت فرض می شود که هوای مرطوب با درصد رطوبت مختلف به دلیل وجود جاذب در مسیر وارد خشک کن می شود و بنابراین دارای درصدی بخار آب است. برای آنکه بتوان جریان دو فازی بخار و هوا را حل کرد، می بایست از روشی غیر از روش مرسوم تکفاز استفاده شود و همانا بکار گیری معادله نفوذ گونه است. این معادله پس از بیان اطلاعاتی در ارتباط با توربولانس، مورد بررسی قرار می گیرد.

۳-۲- کلیات جریان توربولانس

تلاطم از پدیده های کاملاً پیچیده بوده و بیش از صد سال است که به عنوان معمایی برای دانشمندان می باشد. در مقادیر عدد رینولدز بالا (بالتر از عدد بحرانی R_{crit}) یکسری حوادث اتفاق می افتد که سبب تغییرات جدی در رفتار جریان می شود و در نهایت رفتار جریان، تصادفی و نامنظم و حتی با شرایط مرزی ثابت، حرکت جریان کاملاً غیردایمی می شود به طوری که سرعت و سایر خواص جریان به صورت تصادفی و نامنظم تغییر می کند. به این نوع جریان، جریان متلاطم می گویند. طبیعت تصادفی، نامنظم، چرخش ناگهانی، نفوذپذیری و سه بعدی بودن جریان، از عوامل مهمی هستند که مانع از محاسبات و بررسی کامل

حرکت همه ذرات سیال می‌شوند. خوشبختانه جریان متلاطم را می‌توان با روش عددی به طریقی مدل‌سازی نمود و حرکت ذرات سیال را مدل‌سازی کرد.

وقتی عدد رینولدز جریان به حد معینی برسد، طول موج و فرکانس اغتشاش تقویت می‌گردد. هنگامی که این تقویت زیاد شود، جریان به یک جریان بی‌نظم تبدیل می‌گردد و نفوذ این اغتشاش، تا بی‌نظم شدن کل جریان را توربولانس می‌گوییم. عموم جریان‌های موجود در طبیعت که در شیمی، مکانیک، محیط زیست و غیره جاری هستند، دارای رژیم توربولنت می‌باشند.

در جریان توربولنت یک دسته از ذرات به صورت جانبی و عمود بر جهت حرکت سیال (کاملاً تصادفی) که مفهوم ادی را می‌سازند، حرکت می‌کنند. ادی در واقع یک گروه بزرگ از ذرات سیال است که به طور کاملاً تصادفی در میدان جریان حرکت می‌کنند. توجه شود که در طول حرکت این ادی‌ها می‌توانند تغییر شکل دهند، کشیده شوند و یا بچرخند و تقسیم شوند. از نمونه‌های آشای ادی‌های جریان، دود سیگار در هوا می‌باشد.

در هر لحظه، در جریان سیال ادی‌هایی با اندازه‌های متفاوت وجود دارد که ماکزیمم سائز آن‌ها به اندازه قطر لوله یا کانال مربوط و حداقل سائز ادی در حدود میلیمتر است. البته تاکید می‌شود که ابعاد ادی‌های کوچک، نسبت به ابعاد مولکولی بسیار بزرگ‌ترند. در ضمن این نکته ظریف قابل ذکر است که حتی در جریان دوبعدی توربولانس، طبیعت ادی‌ها سه‌بعدی می‌باشد. ادی‌های بزرگ در جریان دائماً تشکیل می‌شوند ولی به سرعت به ادی‌های کوچک می‌شکنند تا جایی که در اثر تنش‌های برشی لزجی از بین می‌روند. در برخورد با پدیده توربولانس سه راهکار اتخاذ شده است که در ادامه بیان می‌شود.

۳-۲-۱- حل عددی مستقیم

یک حل عددی مستقیم، حل کامل معادلات ناویراستوکس و پیوستگی می‌باشد. این روش به خصوص برای بدست آوردن اطلاعاتی درباره خواص غیر قابل اندازه‌گیری مثل نوسانات فشار مطلوب است. در نتیجه حل عددی مستقیم عاری از خطای عددی ناشی از مدل کردن است. دقت این حل با توجه به جزییات، شرایط مرزی و استفاده بهینه از ذخایر کامپیوتری ارتباط دارد.

پیچیدگی مسئله مربوط به تخمین تعداد نقاط شبکه و گامهای زمانی مورد نیاز برای اجرای یک حل عددی مستقیم دقیق می‌باشد. به عنوان مثال یک جریان مغشوش تراکم ناپذیر در یک کانال با ارتفاع H را در نظر بگیرید. حوزه محاسباتی باید از دامنه موثری برای وفق دادن بزرگترین مقیاس‌های جریان مغشوش برخوردار باشد. در جریان کانال گردابه‌ها در جهت موازی با دیوارهای آن کشیده شده‌اند و طول آنها A ، در حدود $2H$ می‌باشد، همچنین شبکه باید به اندازه کافی برای حل نمودن کوچکترین گردابه‌ها که اندازه آنها از مرتبه مقیاس طولی کلموگوروف^۱ است، ریزتر باشد.

در عمل استفاده از شبکه یکنواخت اتلاف وقت است. با استفاده از مش‌های کشیده شده به نقاط متمرکزی که در آن کوچکترین گردابه‌ها قرار دارند، می‌توان اتلاف را کم نمود. حل عددی مستقیم طی دهه ۱۹۸۰ کامل شد و هم اکنون با ظهور کامپیوترهای جدیدتر توسعه بیشتر یافته است.

۳-۲-۲- شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

این متد که به LES^۲ شهرت دارد، یک روش محاسبه‌ای است که در آن گردابه‌های بزرگ محاسبه و گردابه‌های کوچکتر مدل می‌شوند. فرض اساسی این روش آن است که گردابه‌های بزرگ از شرایط مرزی متاثر شده‌اند و باید محاسبه شوند. چون شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مدل کردن گردابه‌های کوچکتر را در برمی‌گیرد، بنابراین کوچکترین سلول‌ها باید خیلی بزرگتر از طول کلموگوروف (مقیاس طول) باشند و گام‌های زمانی مورد استفاده در این متد خیلی بزرگتر از گام‌های زمانی روش حل عددی مستقیم در نظر گرفته شوند. بنابراین این امکان وجود دارد که با تکنولوژی امروز، جریان‌های با اعداد رینولدز بزرگتری نسبت به حل عددی مستقیم محاسبه شود. هر چند که شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، اقتصادی‌تر از حل عددی مستقیم می‌باشد (۵ تا ۱۰ درصد زمان مورد نیاز برای حل عددی مستقیم) هنوز به کامپیوترهای خیلی قوی نیاز دارد. اما بنا به کارهای انجام شده در سال‌های اخیر، حل عددی مستقیم آینده روشنی در

^۱ - Kolmogorov's length

^۲ - Large Eddy Simulation

پیش دارد.

۳-۲-۳- مدل سازی های دیفرانسیلی

مدل های توربولانس هر یک شامل محدودیت هایی می باشند و شرط کافی برای مفید و کاربردی بودن آن داشتن دقت لازم به همراه ارضای شرایط محدودیت است. لازم به ذکر است که دقت مدل های توربولانس را باید توسط مقایسه با داده های تجربی بررسی نمود.

مدل های توربولانس به دو دسته کلی تقسیم می شوند:

- **بوزینیسکی^۱:** به مدل های ویسکوزیته توربولنت مشهورند.

- **غیر بوزینیسکی^۲:** به مدل های تنش رینولدز معروفند.

تحلیل دقیق یک جریان توربولانس بسیار مشکل است. برای بررسی این رژیم، حرکت توربولنت نادیده گرفته می شود. ولی آثار آن با معرفی پارامترهایی مانند ادی ها و محاسبه دینامیک آنها (ویسکوزیته μ و انتقال حرارت ادی ها، ...) در نظر گرفته می شود. در این اثر برای تحلیل پدیده توربولانس از مدل کردن ترم های تنش رینولدز بر پایه تئوری بوزینیسک با استفاده از مشهورترین و پرکاربردترین مدلها (مدل $k - \epsilon$) که بسیار قوی و با قابلیت های فراوان است، استفاده می شود.

برای اعمال این مدل، دو معادله به دستگاه معادلات اضافه می گردد که به ترتیب معادله انتقال انرژی جنبشی توربولانس و معادله انتقال اتلاف انرژی توربولانس می باشند.

۳-۳- روشهای بوجود آمدن جریان توربولانس

جریان آشفته به دو دسته می تواند طبقه بندی شود. دسته اول که توسط کارمن^۳ ارائه شد، می گوید که توربولنت توسط عبور میدان جریان از یک جسم جامد و یا در اثر همسایگی دو خط جریان از یک نوع جریان سیال بر روی دیگری به وجود می آید. دسته دوم نیز به علت وجود گرادیان سرعت ایجاد می شود.

¹ - Boussinesq

² - non boussinesq

³ - Karman

در هر دو حالت اول تنش برشی موجود می‌باشد و جریان در حالت توربولنت قرار می‌گیرد. در این دو حالت چون تنش برشی موجود است این جریان‌ها، جریان توربولنت برشی نامیده می‌شوند و این دسته خود نیز به دو دسته جریان توربولنت برشی دیواره و جریان توربولنت برشی آزاد بر حسب نحوه تولید آشفتگی در دیواره یا سطح مشترک دو خط جریان تقسیم می‌شود.

جریان توربولنت آزاد هنگامی رخ می‌دهد که دیگر خبری از دیواره‌های جامد نباشد. ساده‌ترین مثال برای این نوع، دو خط جریان موازی است که در کنار هم با سرعت‌های مختلف حرکت می‌کنند. در جایی که تنش برشی ماکزیمم است جریان توربولنت آغاز می‌گردد.

در صورتی که میانگین پارامترهای آماری جریان‌های توربولنت به جهت وابسته نباشد، جریان ایزوتروپیک نامیده می‌شود، یعنی این که میانگین این پارامترها نسبت به انحراف و چرخش محورها ثابت است یا به بیان دیگر در هر نقطه‌ای رابطه $u'^2 = v'^2 = w'^2$ برقرار است. مثلاً جریان توربولنت در پشت شبکه تونل باد تقریباً ایزوتروپیک است.

در دیگر حالات، وقتی که گرادیان میانگین سرعت در میدان جریان موجود باشد، توربولانس غیر ایزوتروپیک نامیده می‌شود. به عنوان مثال جریان در لایه مرزی غیرایزوتروپیک است، یعنی در نقاط میدان حل شرط $u'^2 = v'^2 = w'^2$ صادق نمی‌باشد.

۳-۴- مدل های توربولانس

بوزینسک در سال ۱۸۷۷ ویسکوزیته دینامیکی ادی را به صورت $\bar{\tau} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ تعریف نمود که در آن $\bar{u}$ متوسط زمانی سرعت و $\bar{\tau}$ تنش توربولنت متوسط زمانی می‌باشد. کار عمده، تعبیر و تفسیر ویسکوزیته توربولنت μ_t است.

نکته اول این که ویسکوزیته توربولنت جریان μ_t معمولاً خیلی بزرگتر از ویسکوزیته دینامیکی سیال (μ) است، دوم این که μ در یک دمای مشخص برای یک جریان مشخص ثابت بوده و این در حالی است که μ_t به شرایط سیال و مشخصه‌های آن مانند ρ وابسته است. در بسیاری از موارد، ویسکوزیته توربولانس یک رابطه پیچیده بوده که از طریق آزمایش‌های تجربی بدست می‌آید.

۳-۴-۱- مدل صفر معادله ای

در مدل صفر معادله ای از فرضیه بوزینیسک استفاده می شود. یکی از موفق ترین مدل های صفر معادله ای ارائه شده، توسط پرائنتل^۱ در سال ۱۹۲۰ عنوان شد.

۳-۴-۲- مدل های یک معادله ای

در مدل های صفر معادله ای مقدار ν_T توسط یک رابطه جبری متناسب با $\frac{dU}{dy}$ بیان شده که در آن هر گاه $\frac{dU}{dy}$ صفر شود، مقدار ν_T هم صفر می شود (مثلا در مرکز لوله، بین دو صفحه سرد و گرم و...) که آزمایش های تجربی خلاف این را ثابت کرده اند. ولی در مدل های یک معادله ای، معادله انتقالی برای کمیت ν_T در نظر گرفته می شود. یکی از معروف ترین مدل ها، اسپلارت المارس^۲ است که یک معادله انتقال برای وسیکوزیته توربولانسی حل می نماید

مدل سازی بالا برای رژیم های کاملاً توربولنت و به دور از تاثیرات میراکنندگی دیواره صحیح است.

۳-۴-۳- مدل های دو معادله ای

معروف ترین مدل های دو معادله ای، مدل $k - \varepsilon$ هارلو^۳ و ناکایاما^۴ (۱۹۶۸)، لاندرا^۵ و اسپالدینگ^۶ (۱۹۷۴) و مدل $k - \omega$ اسپالدینگ (۱۹۷۰) می باشند که از دو معادله دیفرانسیل پاره ای برای توصیف پارامترهای توربولانس از جمله انرژی جنبشی توربولانس و نرخ اتلاف آن و یا انرژی جنبشی توربولانس و چرخش توربولانس استفاده می شود.

مدل دو معادله ای $k - \varepsilon$ به عنوان محبوب ترین مدل توربولانس شناخته شده است. مهمترین عامل این امر را می توان این گونه توجیه نمود که معادلات انرژی جنبشی توربولانس و نرخ اتلاف آن بدون استفاده از متغیر کمکی اضافه شونده مستقیماً از معادلات ناویر - استوکس به دست می آیند.

¹ - Prandtl

² - Spalart-Allmaras

³ - Harlow

⁴ - Nakayama

⁵ - Launder

⁶ - Spalding

۳-۵- انتخاب روش حل توربولانس

در یک نگاه کلی، شبیه‌سازی عددی جریان تلاطم به سه دسته تقسیم می‌شود که پیش‌تر نیز توضیح داده شد. اولین شبیه‌سازی عددی، استفاده از معادلات ناویر - استوکس است. در این حالت این معادلات را به صورت متوسط زمانی در آورده و به همراه یک مدل اغتشاشی مناسب، تنش‌های تلاطم محاسبه می‌شوند. دومین شبیه‌سازی عددی، استفاده از شبیه‌سازی معادله تابع زمانی با گردابه‌های بزرگ است. سومین نوع از شبیه‌سازی عددی، روش مستقیم می‌باشد. در این روش، گردابه‌های اغتشاش با اندازه‌های مختلف در سیستم وجود دارند. روش‌های دوم و سوم در مرحله اولیه و تولد خود هستند. یکی از محدودیت‌های این دو روش، مشکل مربوط به ظرفیت کامپیوتر امروزی است. در هر حال با پیشرفت صنعت کامپیوتر، شبیه‌سازی عددی گردابه‌های بزرگ و شبیه‌سازی عددی مستقیم در آینده حتی برای جریان‌های پیچیده‌تر و با رینولدز بالاتر ممکن به نظر می‌رسد. در این تحقیق به دلیل ساده بودن و در عین حال عملی بودن روش اول، از این مدل‌سازی استفاده شده است. اساس این روش به این صورت است که برخی از پارامترهای اساسی در سیالات را می‌توان به صورت مقدار متوسط دائمی و مولفه نوسانی تابع زمان نوشت. این تقسیم‌بندی باعث ایجاد مدل‌های مختلف تلاطم می‌گردد که پیش‌تر توضیح داده شد. به‌طوری‌که متوسط حاصل ضرب مولفه‌های نوسانی سرعت، باعث ایجاد تنش رینولدز می‌شود. برای محاسبه تنش‌های رینولدز باید یکی از مدل‌های تلاطم را اعمال نمود.

۳-۶- مدل تلاطم $k - \varepsilon$ خطی

مدل تلاطم $k - \varepsilon$ خطی به دلیل سادگی و کاربرد فراوان آن در اغلب مسایل مهندسی دارای اهمیت خاصی است. مدل تلاطم $k - \varepsilon$ خطی انواع مختلفی دارد. مدل تلاطم $k - \varepsilon$ لاندر و اسپالدینگ که پیش‌تر گفته شد بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلاتی که به وسیله آن توربولانس را مدل می‌نماییم در زیر برای این روش ارائه شده است.

- برای معادله k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad 3-1$$

- برای معادله ε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad 3-2$$

در معادله مربوط به k ، ترم Y_M مربوط به حالتی است که تراکم‌پذیری مواد، بالا و قابل اهمیت است. G_k نشان دهنده نرخ تولید انرژی توربولانسی به واسطه گرادیان سرعت می‌باشد. G_b نمایش دهنده تولید انرژی آشفستگی به واسطه نیروی شناوری است. σ_k و σ_ε به اعداد پرانتل توربولانس برای معادلات k و ε شهرت داشته و به صورت تجربی محاسبه می‌گردند. ضرایب $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ نیز مقادیری ثابت می‌باشند که برای هر نمونه از طریق آزمایش محاسبه می‌گردند.

در این مدل لزجت گردابه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3-3$$

در رابطه (3-3)، ضریب ثابت C_μ ، انرژی تلاطم k و نرخ استهلاک آن ε ، تجربی است و از نتایج آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. آنچه که در نرم‌افزار فلوئنت^۱ به صورت پیش‌فرض قرار داده شده است، مربوط به جریان آب و یا هوا درون لوله می‌باشد. ویلکاکس^۲ آزمایش‌های متعددی را در این زمینه انجام و نتایجی را برای حالات مختلف ارائه داده است. در بیشتر مراجع توربولانس معادلات زیر برای تعریف k و ε مربوط به معادله (3-3) ارائه شده است. شایان ذکر است که در مقالات از معادله تجربی در این زمینه استفاده شده است.

¹ - FLUENT

² - Wilcox

$$k = \frac{1}{2}(\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2), \quad \varepsilon = 2\nu(e'_{ij}.e'_{ij}) \quad 3-4$$

در این رابطه، e'_{ij} نرخ کرنش نوسانی است و توسط رابطه $e'_{ij} = \left(\frac{\delta \bar{u}_i}{\delta x_j} + \frac{\delta \bar{u}_j}{\delta x_i}\right)$ محاسبه می‌شود. برای محاسبه تنش‌های رینولدز در مدل $k - \varepsilon$ خطی از تقریب بوزینسک استفاده می‌شود.

۳-۷- مدل تلاطم $k - \varepsilon$ RNG

مدل $k - \varepsilon$ RNG توسط یاخوت^۱ ابداع شده است. این مدل برای جریان کاملاً توسعه‌یافته، جریان با لایه برشی نازک و جریان با جدایی و چرخش بکار می‌رود. در اینجا اثرات آشفتگی با استفاده از تابع جبری در معادلات ناویر - استوکس قابل اعمال است. این مدل همانند مدل $k - \varepsilon$ خطی انواع مختلفی دارد. در این تحقیق فقط مدل $k - \varepsilon$ RNG یاخوت آورده شده است که معادلات حاکم بر آن به صورت زیر می‌باشند:

- انرژی جنبشی تلاطم k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad 3-5$$

- نرخ استهلاک انرژی ε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad 3-6$$

در روابط (۳-۵) و (۳-۶) ترم‌هایی وجود دارد که پیش‌تر توضیح داده شده است و در این قسمت ذکر نمی‌گردد. مقادیر α_k و α_ε در اینجا معکوس پرانتل توربولانسی می‌باشند که از طریق یک رابطه تحلیلی به وسیله تئوری RNG محاسبه می‌شوند. مقادیر ثابت بکار رفته در روابط نیز شرایط قبل در حالت $k - \varepsilon$

¹ - Yakhot

خطی را دارا می‌باشند و می‌توان مقادیر پیش‌فرض فلوئنت را بکار برد. در این روابط متغیر μ_{eff} لزجت موثر می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mu_{eff} = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad 3-7$$

در رابطه (۷-۳)، ρ چگالی سیال و C_μ ضریب ثابت می‌باشد که از طریق آزمایش محاسبه شده و با آنچه در حالت $k - \varepsilon$ خطی بدست می‌آید متفاوت است.

البته باید به این نکته توجه نمود که در بیش‌تر کارها جهت همخوانی بیشتر نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی، از یک معادله دیفرانسیل جهت محاسبه لزجت تلاطم استفاده می‌شود که در زیر معادله مربوط به آن ارائه شده است.

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad , \quad \hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad , \quad C_v \sim 100 \quad 3-8$$

رابطه (۸-۳) به این دلیل استفاده می‌گردد که توانایی مدل نمودن رینولدزهای پایین را دارا می‌باشد. اختلاف اساسی در دو مدل $k - \varepsilon$ خطی و $RNG k - \varepsilon$ مربوط به معادله ε می‌باشد. یعنی در جایی که ترم R_ε برای مدل $RNG k - \varepsilon$ به معادله نرخ استهلاک توربولانس اضافه شده است.

۳-۸- مدل تلاطم $k - \varepsilon$ غیر خطی

این مدل علاوه بر دارا بودن تانسور نرخ چرخش و کرنش در تنش رینولدز، ضرایب آن نیز تابعی از نرخ چرخش و کرنش می‌باشد. این عمل باعث بالا رفتن قدرت مدل در جریان چرخشی می‌شود. مدل $k - \varepsilon$ غیر خطی در نحوه تعریف ویسکوزیته توربولانسی با مدل‌های دیگر فرق دارد و یک معادله جدید برای ترم اتلاف ارائه می‌دهد. $k - \varepsilon$ غیر خطی آخرین روش اصلاح شده در مدل‌های $k - \varepsilon$ می‌باشد و همان‌گونه که ذکر گردید با دو نوع قبلی از این مدل تفاوت‌هایی دارد.

مدل تلاطم $k - \varepsilon$ خطی مطرح شده توسط لاندرو اسپالدینگ که پیش‌تر ذکر گردید، به دلیل عدم اعمال نرخ چرخش در آن، در اینجا قابل اعمال نیست. یکی دیگر از ضعف‌های مدل مذکور عدم توانایی آن در مدل

نمودن جریان‌هایی است که کاملاً توربولانس نباشند. برای حل این مشکل باید روشی که لاندر برای بدست آوردن معادلات k و ε از معادلات ناویر - استوکس بکار گرفته‌است اصلاح شود.

مدل $k - \varepsilon$ غیرخطی به صورت زیر بیان می‌شود :

- انرژی جنبشی تلاطم k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad 3-9$$

- نرخ استهلاك انرژی جنبشی ε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (C_{3\varepsilon} G_b) + S_\varepsilon \end{aligned} \quad 3-10$$

در روابط بالا داریم :

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad , \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad , \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad 3-11$$

همان‌طور که از معادله (۳-۹) مشخص است. انرژی جنبشی تلاطم در حالت $k - \varepsilon$ غیرخطی همانند دو حالت پیشین تعریف می‌گردد ولی دارای ضرایب ثابت متفاوتی است. این در حالی است که نرخ استهلاك توربولانس تعریف متفاوتی دارد. با توجه به معادله (۳-۱۰) مشاهده می‌شود که ترم دوم سمت راست این معادله که نمایانگر نرخ تولید می‌باشد، مستقل از k بوده و ترم G_k در آن وجود ندارد. همچنین ترم سوم سمت راست معادله نیز به شکل متفاوتی با دو حالت $k - \varepsilon$ خطی و $k - \varepsilon$ RNG بیان شده است. در مخرج این ترم شرایطی اعمال شده است که نسبت به مقادیر متفاوت k قابل تعریف می‌باشد و این در حالی

است که در مدل‌های پیشین این ترم به ازای انرژی جنبشی تلاطم صفر، تعریف نمی‌گردد. یکی دیگر از تفاوت‌های این مدل را همان‌طور که پیش‌تر بیان شد می‌توان در نحوه به‌کارگیری نرخ چرخش و کرنش که با S در معادله (۳-۱۱) نمایش داده شده است در تعریف ضرایب ثابت بیان نمود.

تانسور تنش در مدل تلاطم $k - \varepsilon$ غیرخطی به صورت زیر است :

$$\begin{aligned}\overline{u'_i u'_j} = & -2v_t S_{ij} + \frac{2}{3}k\delta_{ij} + c_1 v_t \frac{k}{\varepsilon} \left(S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} S_{kl} S_{kl} S_{ij} \right) \\ & + c_2 v_t \frac{k}{\varepsilon} (\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki}) \\ & + c_3 v_t \frac{k}{\varepsilon} \left(\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} S_{lk} \Omega_{lk} \Omega_{lk} \delta_{ij} \right) \\ & + c_4 v_t \frac{k^2}{\varepsilon^2} (S_{ki} \Omega_{ij} + S_{kj} \Omega_{li}) S_{kl} \\ & + c_5 v_t \frac{k^2}{\varepsilon^2} \left(\Omega_{il} \Omega_{lm} S_{mj} + S_{il} \Omega_{lm} \Omega_{nl} - \frac{2}{3} S_{lm} \Omega_{mn} \Omega_{nl} \delta_{ij} \right) \\ & + c_6 v_t \frac{k^2}{\varepsilon^2} S_{ij} S_{kl} S_{kl} + c_7 v_t \frac{k^2}{\varepsilon^2} S_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl}\end{aligned}\quad 3-12$$

با توجه به معادله (۳-۱۲)، تنش رینولدز در مدل $k - \varepsilon$ غیرخطی دارای دو بخش است. بخش اول تانسور تنش درجه دوم^۱ و بخش دوم تانسور تنش درجه سوم^۲ می‌باشد به طوری که اگر سه بار تانسورهای نرخ چرخش Ω یا نرخ کرنش S در هم ضرب گردند مدل $k - \varepsilon$ غیرخطی از درجه سوم به دست آمده و اگر دو بار تانسورهای نرخ چرخش یا نرخ کرنش در هم ضرب گردند مدل $k - \varepsilon$ غیرخطی از درجه دوم حاصل می‌گردد.

در رابطه (۳-۱۲) متغیرهای Ω_{ij} و S_{ij} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Omega_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad 3-13$$

¹- quadratic stress - strain

²- eubic stress - strain

$$S_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad ۳-۱۴$$

همچنین در رابطه (۳-۱۲) v_t (لزجت گردابه) به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad ۳-۱۵$$

در رابطه (۳-۱۵)، C_μ ضریب اپتیمم لزجت گردابه‌ها می‌باشد که با نرخ تانسورهای کرنش و چرخش به صورت زیر مرتبط است :

$$c_\mu = \frac{0.3}{1 + 0.35(\max(S, \Omega))^{1.5}} (1 - \exp \left[\frac{-0.36}{\exp(-0.75 \max(S, \Omega))} \right]) \quad ۳-۱۶$$

بقیه ثابت‌ها به طریق تجربی بدست می‌آیند. در رابطه (۳-۱۶) متغیرهای S و Ω به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{1/2 S_{ij} S_{ij}} \quad , \quad \Omega \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{1/2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad ۳-۱۷$$

در حالت کلی می‌توان گفت خطوط جریان با توجه به رابطه $U = \frac{dx_i}{dt}$ ، وابسته به سرعت است و سرعت نیز براساس رابطه $\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta U_i}{\delta x_j} - \frac{\delta U_j}{\delta x_i} \right)$ وابسته به تانسور چرخش می‌باشد. بنابراین تغییرات تانسور چرخش، سرعت را تغییر داده و تغییر سرعت، خطوط جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از آنجایی که تنش رینولدز در مدل $k - \varepsilon$ غیرخطی درجه سوم نسبت به درجه دوم از نرخ چرخش بیشتری برخوردار است بنابراین دقت بیشتری دارد.

۳-۹- معادله نفوذ گونه

برای محاسبه درصد جرمی یک گونه شیمیایی در مکان‌های متفاوت، غلظت گونه i که با Y_i نمایش داده می‌شود، از معادله جابجایی و نفوذ (۳-۱۸) استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad 3-18$$

در رابطه فوق R_i نرخ تولید گونه i بخاطر واکنش شیمیایی می‌باشد و S_i نرخ تولید گونه به علت وجود چشمه جریان است. معادله فوق $N - 1$ بار به ازای وجود N گونه حل می‌گردد. علت این امر را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

۱. جهت کاهش تعداد معادلاتی که می‌بایست حل گردد و بنابراین افزایش سرعت محاسبات.
۲. اگر N معادله، به ازای N فاز حل شود، ممکن است مجموع این درصد جرمی‌هایی که بدست می‌آید، برابر یک نگردد.

با توجه به مطالب ذکر شده، بهتر است $N - 1$ معادله حل گردد و درصد جرمی گونه آخری، از کم نمودن مجموع درصد جرمی‌ها از یک بدست آید.

در معادله (۳-۱۸)، $\vec{J}_i$ به شار نفوذ جرمی گونه i شهرت دارد که به علت وجود گرادیان غلظت به وجود می‌آید. در این تحقیق از فرض رقیق بودن جهت مدل نمودن رابطه شار نفوذ استفاده می‌شود. شار نفوذ جرمی در حالت توربولانس از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i \quad 3-19$$

در رابطه (۳-۱۹)، Sc_t عدد اشمیت توربولانس^۱ می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

¹ - Turbulent Schmit number

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t} \quad ۳-۲۰$$

در رابطه فوق μ_t و D_t به ترتیب نشان دهنده ویسکوزیته توربولانس و نفوذ توربولانس می‌باشند. در رابطه (۳-۱۹)، Di,m نشان دهنده ضریب نفوذ برای گونه i در مخلوط است. در این پایان‌نامه عدد اشمیت برابر با 0.6 می‌باشد. در اینجا تنها دو فاز موجود است که عبارتند از هوا و بخار آب. بنابراین معادله نفوذ گونه فقط یکبار برای بخار آب حل می‌شود و غلظت هوا از اختلاف غلظت بخار آب از عدد یک بدست می‌آید.

۳-۱۰- شرایط مرزی دیواره

جریان سیال نزدیک دیواره متأثر از آن است و سرعت سیال کاهش می‌یابد. این عمل باعث کاهش عدد رینولدز نیز می‌گردد. یک روش مفید برای در نظر گرفتن اثر دیواره این است که جریان نزدیک دیواره را لایه ای و یک بعدی فرض نموده و تنش برشی نزدیک دیواره را ثابت و برابر تنش برشی روی آن فرض می‌شود.

در شرایط مرزی داده شده، لایه‌ها به دو قسمت لایه چسبنده و لایه اینرسی تقسیم می‌شوند و قوانین فون کارمن^۱ برای متغیرهای فاصله و سرعت که بدون بعد شده‌اند قابل اعمال است. انرژی جنبشی در مرز به صورت زیر تعریف گردد:

$$k = \sqrt{C_\mu \tau_w / \rho} \quad ۳-۲۱$$

در این رابطه، C_μ ضریب ثابت برای مدل‌های $k - \varepsilon$ استاندارد و $k - \varepsilon$ RNG می‌باشد اما برای مدل $k - \varepsilon$ غیرخطی به عنوان یک متغیر تعریف می‌شود و با مدل $k - \varepsilon$ استاندارد و $k - \varepsilon$ RNG کاملاً متفاوت است. بنابراین شرایط مدلسازی جریان در مرز با مدل $k - \varepsilon$ غیرخطی بهتر انجام می‌شود.

پس از آنکه توضیحی در ارتباط با معادلات بکار رفته بیان شد، حال می‌بایست مختصری در ارتباط

^۱ - von karman

با حل معادلات اطلاعاتی بیان گردد. برای آنکه معادلات به روش عددی حل شود نیاز است که بتوان معادله ای برای هریک از پارامترها بدست آورد. برای فشار رابطه ای را از معادله پیوستگی بدست آورده که در بخش بعد اطلاعاتی در ارتباط با آن بیان می شود.

۳-۱۱- الگوریتم سیمپل

الگوریتم سیمپل یک روش نیمه ضمنی برای حل معادلاتی است که توسط فشار به هم مرتبط می باشند. در این روش ابتدا میدان سرعت با به کارگیری مقادیر فشار و سرعت حدسی محاسبه می گردد. سپس این میدان سرعت، همزمان با میدان فشار به گونه ای تصحیح می گردد که یک میدان سرعت صدق کننده در معادله پیوستگی بدست آید. به دنبال آن، مراحل تصحیح از طریق این میدان های سرعت صدق کننده در معادله پیوستگی در جهت همگرایی تکرار می شوند. به طور کلی مراحل کلی جهت حل مسائل با استفاده از این الگوریتم طی می شوند، به شرح زیر است:

۱. حل معادلات مومنتم
۲. تصحیح فشار و مولفه های سرعت
۳. حل معادله انرژی
۴. حل معادلات توربولانس
۵. بررسی معیار همگرایی، در این مرحله در صورتی که جواب های مورد نظر همگرا شده باشند، فرایند تکرار خاتمه می یابد در غیر این صورت معادلات مومنتم مجدداً با به کارگیری مقادیر موجود فشار و سرعت حل شده و رویه بیان شده، مجدداً تکرار می گردد.

۳-۱۱-۱- حل معادلات ممنتوم

برای شروع فرایند محاسبه، یک میدان فشار p^* و میدان سرعت حدس زده می شود. معادلات گسسته اندازه حرکت با استفاده از این میدان های حدسی حل می شوند تا مقادیر جدید سرعت نتیجه شود.

$$A_p^u u_p^* = \sum_c A_c u_c^* - (P_p^* - P_w^*) a_{n-s} + S_u^u \quad 3-22$$

$$A_p^v v_p^* = \sum_c A_c u_c^* - (P_p^* - P_s^*) a_{n-\omega} + S_u^v \quad 3-23$$

حال تصحیح p' به صورت اختلاف بین میدان فشار صحیح p و میدان فشار حدسی p^* تعریف می‌شود. بنابراین داریم:

$$p = p^* + p' \quad 3-24$$

به صورت مشابه، اصلاحات سرعت u' و v' به منظور مرتبط کردن سرعت‌های صحیح u و v به سرعت‌های حدسی u^* و v^* تعریف می‌شوند:

$$u = u^* + u' \quad 3-25$$

$$v = v^* + v' \quad 3-26$$

با جایگذاری میدان فشار صحیح p در معادلات اندازه حرکت، میدان سرعت صحیح حاصل می‌شود. با تفریق معادلات گسسته اندازه حرکت با میدان‌های حدسی فشار و سرعت از میدان‌های تصحیح شده‌ی فشار و سرعت، و حذف اصلاحات سرعت برای ساده شدن، معادلات زیر حاصل می‌شوند:

$$A_p^u u_p' = \sum_c A_c u_c' - (P_p' - P_w') a_{n-s} \quad 3-27$$

$$A_p^v v_p' = \sum_c A_c u_c' - (P_p' - P_s') a_{n-\omega} \quad 3-28$$

در نتیجه داریم:

$$u_p' = d_p^u (P_p' - P_w') \quad 3-29$$

$$v_p' = d_p^v(P_p' - P_s') \quad ۳-۳۰$$

که در آن:

$$d_p^u = \frac{a_{n-s}}{A_p^u} \quad ۳-۳۱$$

$$d_p^v = \frac{a_{n-\omega}}{A_p^v} \quad ۳-۳۲$$

معادلات فوق در سرعت‌های اصلاح شده به شکل زیر در می‌آیند:

$$u_p = u_p^* + d_p^u(P_p' - P_w') \quad ۳-۳۳$$

$$v_p = v_p^* + d_p^v(P_p' - P_s') \quad ۳-۳۴$$

۳-۱۱-۲- تصحیح فشار

میدان سرعت می‌بایست معادله پیوستگی را ارضاء نماید. معادله پیوستگی برای یک حجم کنترل

اسکالر به شکل زیر تشکیل می‌شود:

$$[(\rho ua)_e - (\rho ua)_w] + [(\rho va)_n - (\rho va)_s] = 0 \quad ۳-۳۵$$

با جایگذاری سرعت‌های تصحیح شده در معادله پیوستگی گسسته شده، داریم:

$$\begin{aligned} & [\rho_e a_e (u_e^* + d_e^u(P_E' - P_P')) - \rho_w a_w (u_w^* + d_w^u(P_P' - P_W'))] \\ & + [\rho_n a_n (v_n^* + d_n^v(P_N' - P_P')) - \rho_s a_s (v_s^* + d_s^v(P_P' - P_S'))] = 0 \end{aligned} \quad ۳-۳۶$$

با بازنویسی این رابطه و تعیین ضرایب معادله خطی شده، داریم:

$$A_p P_p' = \sum_c A_c P_c' + S_u^p \quad ۳-۳۷$$

با حل معادله فوق، میدان تصحیح فشار به دست می‌آید. با استفاده از این میدان تصحیح فشار، میدان‌های

سرعت و میدان فشار تصحیح می‌شود. میدان تصحیح فشار تمایل به واگرایی دارد، مگر اینکه در طول فرآیندهای تکرار از زیرتخفیف (a) استفاده شود.

فشارهای اصلاح شده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad 3-38$$

که α_p ضریب زیرتخفیف می‌باشد. مولفه‌های سرعت تصحیح شده نیز از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$u^{new} = \alpha_u u + (1 - \alpha_u) u^{n-1} \quad 3-39$$

$$v^{new} = \alpha_v v + (1 - \alpha_v) v^{n-1} \quad 3-40$$

پس از یک سری عملیات جبری می‌توان نشان داد که معادلات گسسته اندازه حرکت به شکل زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{A_p^u}{\alpha_u} u_p = \sum_c A_c u_c - (P_p^* - P_w^*) a_{n-s} + S_u^u + \left[(1 - \alpha_u) \frac{A_p^u}{\alpha_u} \right] u_p^{(n-1)} \quad 3-41$$

$$\frac{A_p^v}{\alpha_v} v_p = \sum_c A_c v_c - (P_p^* - P_s^*) a_{e-w} + S_u^v + \left[(1 - \alpha_v) \frac{A_p^v}{\alpha_v} \right] v_p^{(n-1)} \quad 3-42$$

با حل دستگاه معادلات حاصل از نوشتن معادلات فوق بر روی شبکه محاسباتی، مقادیر سرعت در هر تکرار به دست می‌آیند.

۳-۱۱-۳- حل معادله انرژی

معادله انرژی بدست آمده به صورت زیر است:

$$A_p^e (T_s^*)_p = \sum_c A_c (T_s^*)_c + S_u^T \quad 3-43$$

در هر تکرار پس از تصحیح میدان‌های فشار و سرعت، معادله انرژی نیز حل می‌شود تا توزیع دما در میدان حل به دست آید.

۳-۱۱-۴- حل معادلات توربولانس

معادلات توربولانس در این مرحله را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$A_p^k K_p^* = \sum_c A_c k_c^* + S_u^k \quad 3-44$$

$$A_p^\varepsilon \varepsilon_p^* = \sum_c A_c \varepsilon_c^* + S_u^\varepsilon \quad 3-45$$

با حل معادلات فوق نیز، پارامترهای توربولانسی در میدان محاسباتی به دست می‌آیند. پس از این مرحله، همگرایی حل کنترل می‌شود. در صورت عدم همگرایی یکی از پارامترها، تکرارها ادامه می‌یابند تا همگرایی حاصل شود.

۳-۱۲- روش حل معادلات خطی

در برنامه مورد نظر از روش *TDMA* برای حل معادلات خطی استفاده شده است. برای حل معادلات مومنتم، انرژی، انرژی جنبشی توربولانس و نرخ اضمحلال انرژی توربولانس روش فوق بکار برده شده است.

۳-۱۲-۱- روش *TDMA*

معادله کلی انتقال را پس از انفصال می‌توان برای تمامی نقاط واقع بر یکی از خطوط شبکه در امتداد x ، y و z به صورت زیر نوشت:

$$D\phi = C \quad 3-46$$

که در این رابطه D یک ماتریس سه قطری، ϕ بردار مجهولات و C نیز بردار مقادیر ثابت است. در این رابطه فرض شده است که مقادیر ϕ در امتداد خطوط همسایه از آخرین مقادیرشان معلوم باشند. اساس کار در روش *TDMA* تبدیل ماتریس ضرایب به یک ماتریس بالا مثلثی، با استفاده از رابطه زیر است:

$$d_i = d_i - \frac{b_i}{d_{i-1}} a_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad 3-47$$

که در اینجا d_i عناصر واقع بر قطر اصلی و b_i و a_i به ترتیب عناصر واقع بر سمت راست و چپ قطر اصلی در ماتریس ضرایب می‌باشند. M نیز تعداد عناصر واقع بر قطر اصلی است. همچنین برای بردار مقادیر ثابت C خواهیم داشت:

$$C_i = C_i - \frac{b_i}{d_{i-1}} C_{i-1} \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad 3-48$$

حال مقادیر ϕ را می‌توان با استفاده از رابطه پسروی زیر محاسبه نمود:

$$\phi_M = \frac{C_M}{d_M} \quad 3-49$$

$$\phi_i = \frac{C_i - a_i \phi_{i+1}}{d_i} \quad i = m-1, m-2, \dots, 1 \quad 3-50$$

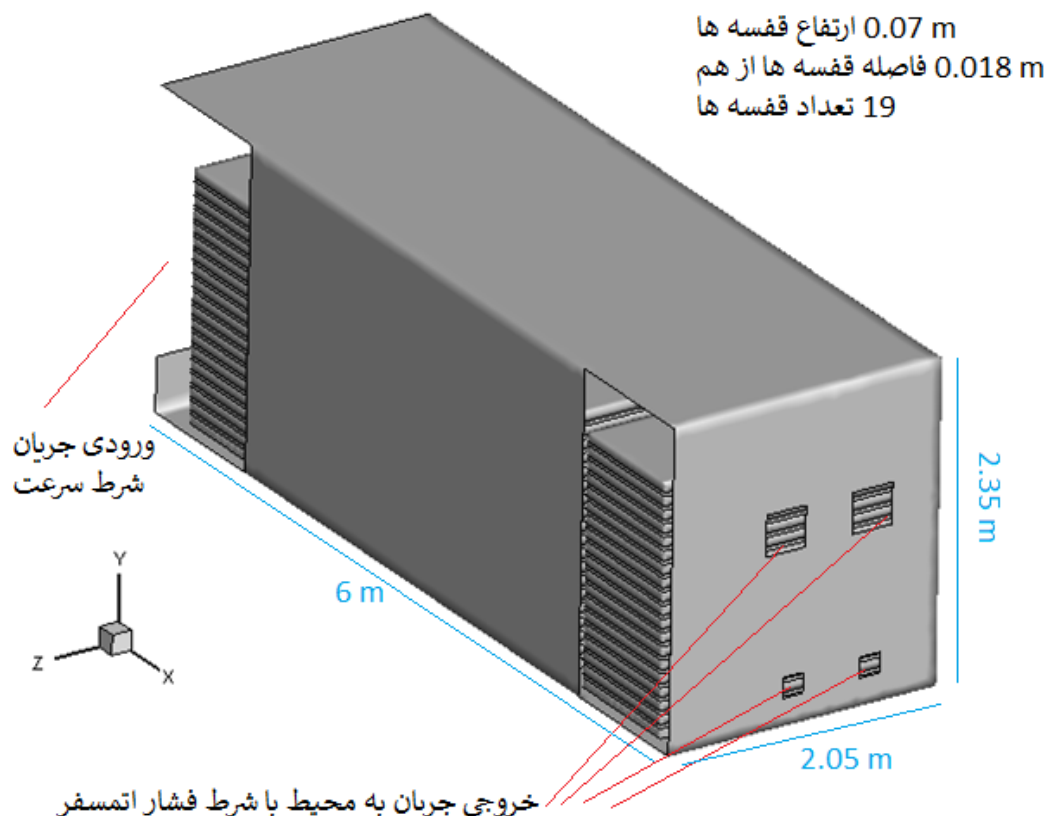
پس از محاسبه مقادیر ϕ بر روی تمامی خطوط واقع بر یک امتداد، مجدداً این روش برای تمامی خطوط واقع بر امتداد دیگر بکار گرفته می‌شود. تعداد مراحل روبیدن^۱ یعنی تعداد مراحل که معادلات در امتداد خطوط بر محورها در شبکه مورد نظر حل می‌شوند، بستگی به متغیر مورد نظر دارد.

^۱- sweep

فصل چہارم روش حل

۴-۱- بررسی هندسه

در این قسمت هندسه مورد بررسی در این پایان نامه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همانطور که پیش تر بیان شده است، هدف از این پایان نامه مطالعه جریان وانتقال حرارت در یک خشک کن است و می‌بایست معادلات بیان شده در فصل پیش به نحوی مورد استفاده قرار گیرد تا در انتها بتوان کانتورهای سرعت و دمایی مربوط به خشک کن را بدست آورد. برای این منظور لازم است که در ابتدا مشخص شود هندسه خشک کن مورد بررسی به چه صورتی است. در شکل زیر نمایی از خشک کن آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، هوا از طریق دریچه ای وارد خشک کن شده و پس از آنکه رطوبت از میوه ها گرفته می‌شود، از طریق دریچه های دیگری خارج می‌شود. روش های متفاوتی برای خشک کردن میوه وجود دارد. در بعضی از موارد هوای خروجی از خشک کن به محیط اطراف تخلیه می‌شود و یا می‌تواند در سیکل دیگری استفاده شود. در موارد دیگری هوای خروجی از خشک کن می‌تواند در یک سیکل بسته مجدداً به خشک کن وارد شود و از دمای بالای آن برای خشک کردن استفاده نمود. گاهی نیز هوای خروجی از خشک کن که دارای دما و رطوبت نسبتاً بالایی است با استفاده از وسایلی رطوبتش کاهش یافته و مجدداً پس از گرمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

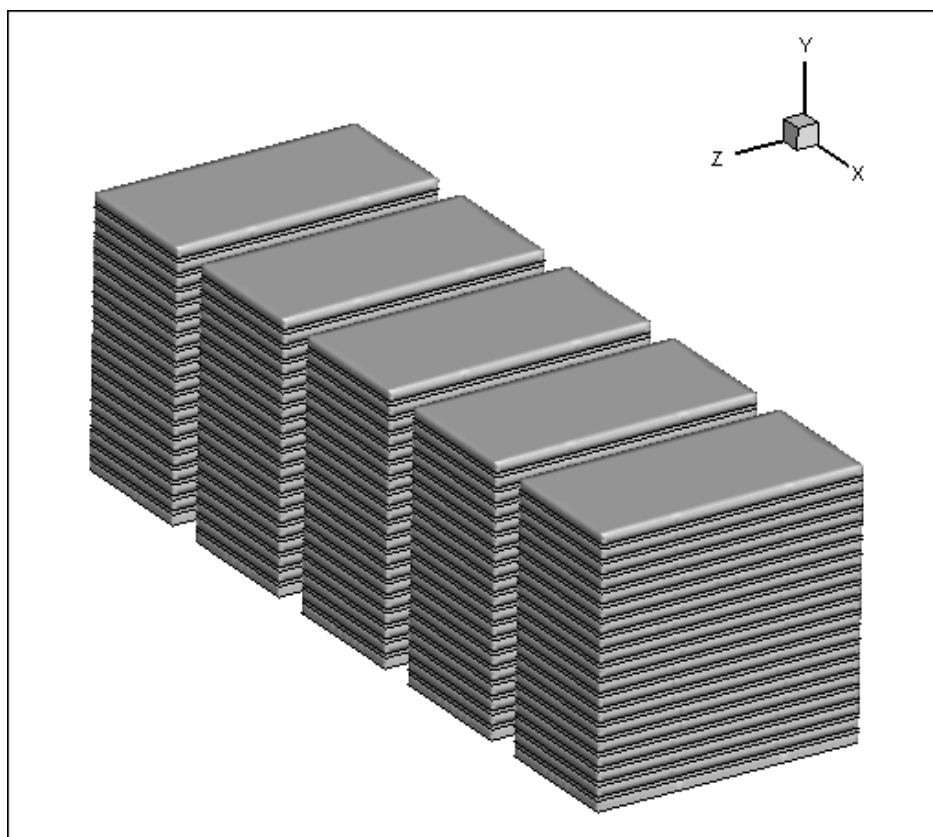


شکل ۴-۱ نمای کلی از خشک کن مطالعه شده

این خشک کن دارای یک ورودی هوا بوده که توسط کمپرسور و یا فن عمل تزریق هوا به درون سیستم انجام می‌پذیرد. هوای ورودی بین قفسه های موجود در خشک کن که می‌تواند حاوی میوه و سبزیجات باشد جریان یافته و رطوبت آنها کاهش می‌یابد تا خشک شوند. خشک کن می‌تواند در آب و هوا های مختلف مورد استفاده قرار گیرد و گاهی رطوبت هوا ر محلی که خشک کن مورد استفاده قرار می‌گیرد به حدی بالاست که سیستم کارایی خود را از دست می‌دهد و بنابراین می‌توان از چرخ دسیکنت در ورودی خشک کن استفاده کرد تا به کمک آن رطوبت هوای ورودی کم شده و بتوان از هوای خروجی از دسیکنت که دارای رطوبت کمتری است برای خشک کردن محصولات استفاده نمود. بنابراین مطالعات در دو شرایط متفاوت رطوبت ورودی به سیستم انجام می‌شود تا نشان داده شود که تغییر رطوبت جریان ورودی به چه میزانی بر عملکرد سیستم تاثیرگذار خواهد بود.

تعداد زیادی قفسه برای خشک کردن محصولات در خشک کن تعبیه شده است که با قرارگیری

میوه و سبزیجات بر روی آنها می‌توان محصولات کشاورزی را خشک کرد. در مجموع ۹۵ قفسه در خشک کن قرار داده شده است که آنها بر روی هم قرار گرفته اند. این قفسه ها هریک به ارتفاع ۷۰ میلیمتر بوده که در فاصله ۱۸ میلیمتری از هم قرار دارند. در شکل زیر چیدمان قفسه ها آورده شده است.

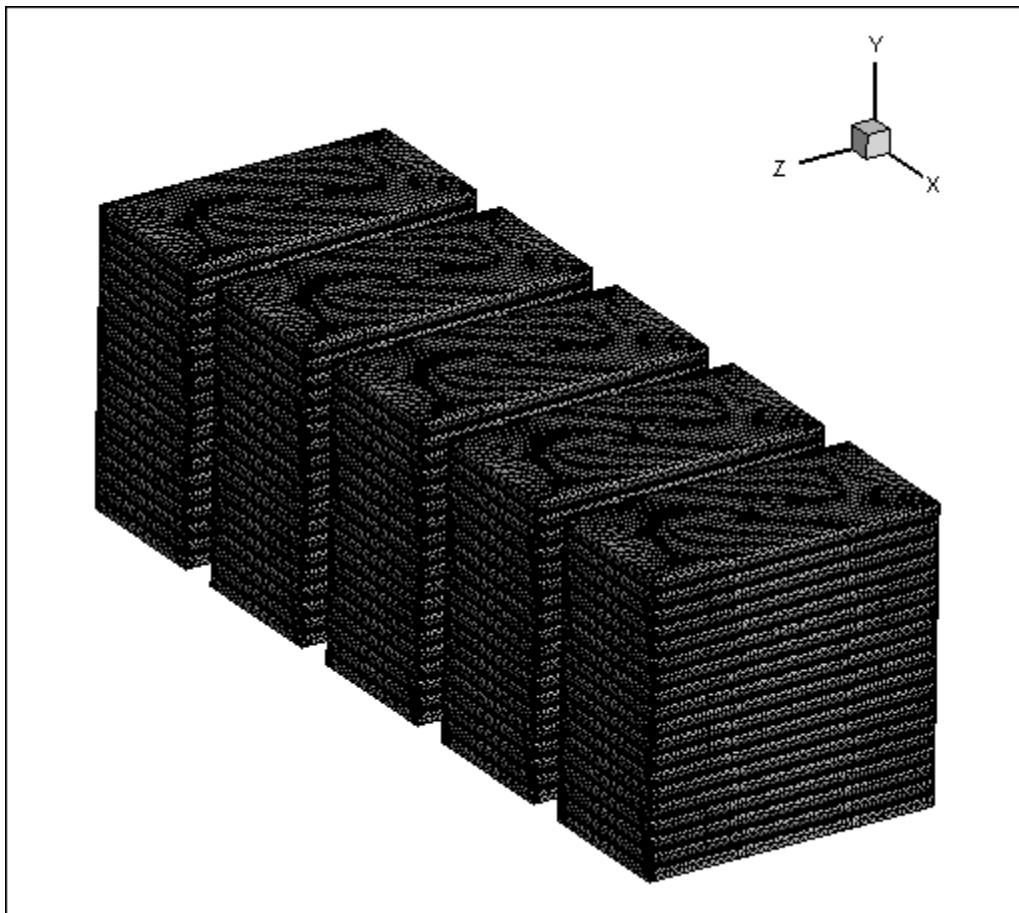


شکل ۴-۲ نمایی از قفسه های چیده شده در خشک کن

جریان هوا از بین این قفسه ها و نیز از روی آن ها عبور کرده و باعث می‌شود که محصول کشاورزی موجود خشک شود.

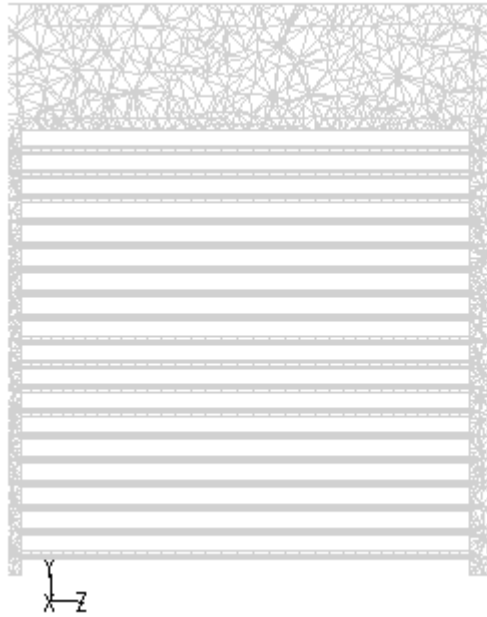
۴-۲- شبکه بندی فضای حل

در شکل زیر شبکه بندی بر روی قفسه ها نمایش داده شده است. از شبکه بندی سازمان یافته استفاده می‌شود تا بر روی قفسه ها گره های محاسباتی بوجود آید. حال می‌توان معادلات را بر روی گره های محاسباتی گسسته کرد و به روش تکراری حل نمود.



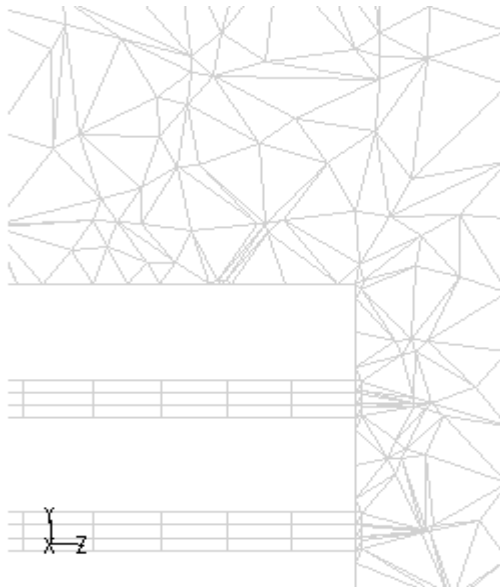
شکل ۳-۴ شبکه بندی بر روی قفسه های داخل خشک کن

در شکل زیر یک سطح مقطع از داخل خشک کن نمایش داده شده است تا بتوان مشاهده نمود که شبکه بندی درون حجم محاسباتی به چه صورت انجام پذیرفته شده است. همانطور که مشاهده می شود در فواصل بین قفسه ها، گره های محاسباتی به هم نزدیک بوده و با فاصله گیری از قفسه ها، فاصله نودهای محاسباتی افزایش یافته است. در فواصل بین قفسه ها از شبکه بندی سازمان یافته برای حجم کنترل استفاده شده است و در قسمت خارج فضا بین قفسه ها از شبکه بندی سازمان نیافته استفاده می شود که هرچه از قفسه ها فاصله گرفته شود، فاصله بین گره های محاسباتی افزایش می یابد.



شکل ۴-۱: شبکه بندی در یک سطح مقطع از خشک کن

برای آنکه بتوان موارد بیان شده در پاراگراف پیشین را بدرستی درک نمود، یک نمای نزدیک از سطح مقطع خشک کن آورده شده است که نشان می‌دهد در فاصله بین سبدها از شبکه بندی سازمان یافته استفاده شده است و در نواحی بیرون از سبدها شبکه بندی سازمان نیافته استفاده شده است.



شکل ۴-۵: شبکه بندی در یک سطح مقطع از خشک کن در نمای نزدیک

۴-۳- معادلات مورد استفاده و شرایط حل

در این پایان نامه از معادلات پیوستگی و مومنتوم برای شبیه سازی حرکت جریان استفاده شده است. از آنجایی که فضای حل سه بعدی می باشد، بنابراین از معادلات مومنتوم در سه بعد استفاده شده است و چون با قرار گیری سبدها در میدان جریان نوسانات سرعت بوجود می آید، می بایست از معادلات توربولانس نیز استفاده کرد که این امر باعث می شود در روش مورد استفاده در این پایان نامه دو معادله توربولانس نیز به سیستم اضافه گردد. همچنین سیال ورودی دارای دمای بالاست تا پدیده تبخیر مایع از درون میوه و سبزیجات بهتر انجام پذیرد و این امر نیازمند آن است که معادله انرژی نیز به مجموعه معادلات اضافه شود. سپس معادلات به روش بادسو مرتبه دوم گسسته شده و از الگوریتم سیمپل استفاده می شود تا در نهایت بتوان میدان سرعت و دما را استخراج نمود.

فصل پنجم نتایج

۵-۱- مقدماتی جهت ورود به مبحث نتایج

در این پایان نامه به بررسی جریان و انتقال حرارت در یک خشک کن پرداخته می شود. ساختمان کلی خشک کن در فصل پیش مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که سینی ها به چه صورتی درون خشک کن قرار گرفته می شوند. درون سینی ها فلفل قرار داده شده است تا بتوان شرایط مرزی آن را از مقالات استخراج نمود. خشک کن در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار میگیرد. در حالت اول هوای ورودی به خشک کن دارای رطوبت است و در حالت دوم رطوبت هوای ورودی با استفاده از چرخ دسیکنت کاهش می یابد. بنابراین می توان اثرات مربوط به کاهش رطوبت بر خشک شدن محصولات را مورد بررسی قرار داد. در بخش بعد اطلاعاتی در ارتباط با چرخ دسیکنت بیان می شود و نشان داده خواهد شد که بکارگیری چرخ دسیکنت به چه صورتی بر عملکرد سیستم تاثیر گذار است.

۵-۲- شرایط مرزی

در این پایان نامه سرعت هوای ورودی به خشک کن ۱ متر بر ثانیه قرار داده شده است که این میزان با توجه به قدرت فن می تواند تغییر کند. دمای ورودی ۳۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است که این میزان در روزهای متفاوت از سال متغیر خواهد بود. نسبت جرمی رطوبت ورودی به خشک کن برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است که با توجه به شهرهای متفاوت با شرایط آب و هوایی مختلف این میزان تغییر می کند. در اصل چرخ دسیکنت بکار گرفته می شود که این عدد کاهش یافته و رطوبت کمتری به سیستم وارد شود. ۴۰۰ گرم محصول در سیستم قرار داده شده است و خشک شدن آن مدنظر است. شرایط در خروجی به صورت فشار خروجی در نظر گرفته میشود که فشار اتمسفریک بر آن اعمال می گردد.

۵-۳- چرخ دسیکنت

رطوبت زدایی در یک چرخه دسیکنت جامد به روش سیرکوله کردن دو جریان هوای متفاوت با رطوبت های نسبی بالا و پایین (جریان ورودی با رطوبت نسبی بالا و جریان بازیافت با رطوبت نسبی پایین) از روی ماده جاذب انجام می گیرد. تقریباً تمام مواد به نوعی دسیکنت هستند، به این معنا که بخار آب را

جذب کرده و نگه می‌دارند. عمل جذب همواره حرارت محسوسی برابر با حرارت نهان بخار آب جذب شده توسط دسیکنت، بعلاوه حرارت افزوده‌ای از جذب را تولید می‌کند، این حرارت به ماده دسیکنت و هوای محیط انتقال می‌یابد. دسیکنت‌ها در خشک کردن هوا برای کاهش دمای نقطه شبنم نیز استفاده می‌شوند. در این حالت می‌توان رطوبت را بدون گرمایش از دسیکنت گرفت. پروسه بازیافت با به کارگیری اختلاف فشار بخار بین فشار نهایی هوا و فشار جریان هوای محیط انجام می‌گیرد. همچنین دسیکنت‌ها برای خشک کردن هوای سیرکوله در سیستم‌های تهویه و سرمایش استفاده می‌شوند. اولین بار در اواسط دهه هفتاد دسیکنت‌های رطوبت زدا در صنایع خاصی چون داروسازی و تولید لوازم الکترونیکی که تولیدات آنها به رطوبت حساس بود، مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین برای جلوگیری از ایجاد خوردگی و سایر زیان‌های ناشی از رطوبت به هنگام انبار کردن تولیدات نیز از دسیکنت‌ها استفاده می‌کردند. بیشتر دسیکنت‌های رطوبت زدا در آن زمان از بسترهای فشرده‌ای از سلیکاژل و یا سایر ذرات دیگر تشکیل می‌شدند. نظری اجمالی بر نحوه عملکرد سیستم‌های سرمایش دسیکنت جامد بیانگر این مطلب است که طرز کار این سیستم‌ها در کل و به صورت عام بر یک پایه و اساس بنا شده است. رطوبت زدایی در این سیستم‌ها به روش سیرکوله کردن دو جریان هوای متفاوت با رطوبت‌های نسبی بالا و پایین (جریان ورودی با رطوبت نسبی بالا و جریان بازیافت یا رطوبت نسبی پایین) از روی ماده دسیکنت، انجام می‌گیرد. جریان هوای مرطوب ورودی، با جذب رطوبت توسط مواد دسیکنت خشک می‌شود، که باعث افزایش درصد رطوبت در روی سطح دسیکنت شده و سپس رطوبت انباشته در ماده دسیکنت توسط جریان هوای خشک بازیافتی جذب می‌شود که عموماً این جریان به فضای بیرون ارسال می‌گردد.

معادلات مربوط به تحلیل چرخ دسیکنت بسیار متفاوت می‌باشد. روابط زیادی برای چرخ دسیکنت

ارائه شده است که در این جا یک نمونه از این روابط در ارتباط با تغییرات رطوبت آورده شده است [۲۳].

$$f1 = -0.0001Tdb^2 - 0.0031Tdb + 0.8353 \quad 5-1$$

$$f2 = 592.77wi^2 - 41.23wi + 1.283 \quad 5-2$$

$$f3 = -0.0001N^2 + 0.0042N + 0.4474 \quad 5-3$$

$$f4 = -0.0001Treg^2 + 0.355Treg - 0.4924 \quad 5-4$$

$$f5 = -0.0572DH^3 + 0.0933DH^2 + 0.6139DH - 0.0922 \quad 5-5$$

$$f6 = -21.67dt^2 + 6.93dt + 1.34 \quad 5-6$$

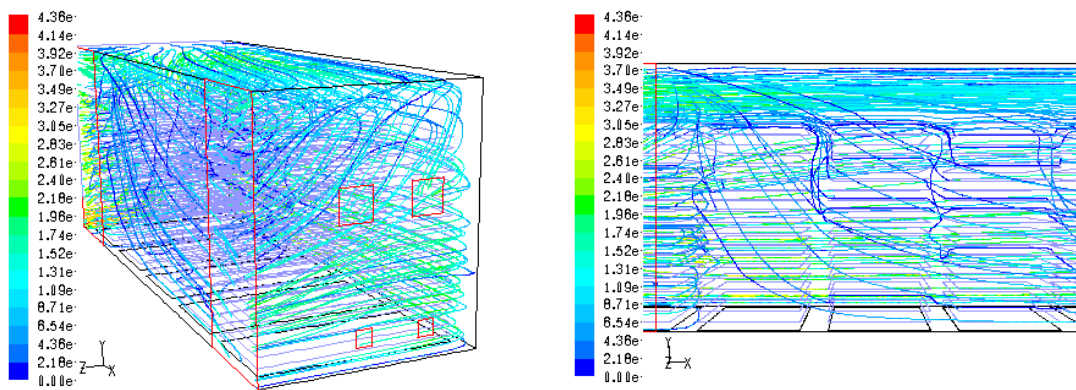
$$f7 = -0.0611u + 0.8376 \quad 5-7$$

$$w_2 = (1 - f1.f2.f3.f4.f5.f6.f7).wi \quad 5-8$$

همان‌طور که دیده می‌شود، رطوبت بعد از چرخ دسیکنت به صورت تابعی از رطوبت قبل آن بیان می‌گردد.

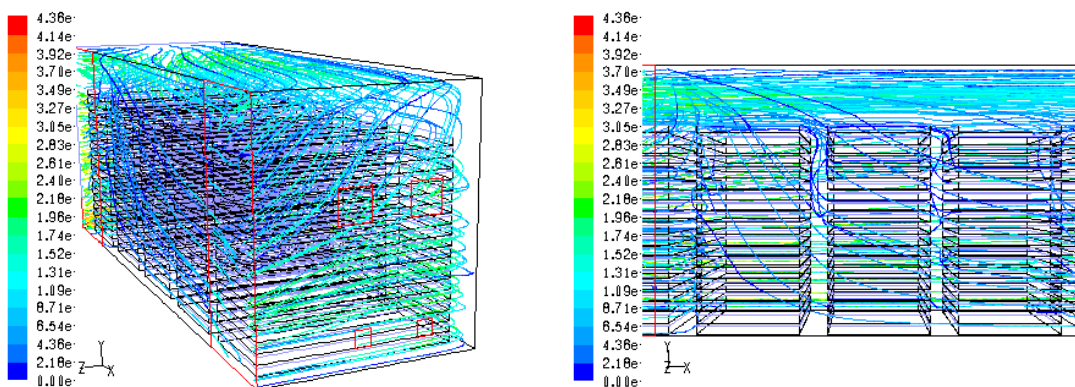
5-4- بررسی خطوط جریان در خشک کن

در این بخش به مطالعه خطوط جریان در خشک کن پرداخته می‌شود بدین صورت که مشاهده خواهد شد که سیال ورودی به خشک کن چه مسیری را طی کرده تا به قسمت خروجی خشک کن برسد. برای این منظور از دو نمای متفاوت خطوط جریان مشاهده می‌گردد و این خطوط در دو حالت نمایش داده می‌شود که در یکی از این حالات سبدها در میدان جریان نمایش داده می‌شود و در دیگری اثری از سبدها نیست تا بتوان هر آنچه بهتر مشاهده نمود که خطوط جریان در میدان حل به چه صورتی است. از آنجا که الگوی رفتاری خطوط جریان تا حدود زیادی مستقل از رطوبت جریان ورودی است، بنابراین در این پایان نامه صرفاً خطوط جریان مربوط به حالتی که از چرخ دسیکنت استفاده نشده است آورده می‌شود و بیان می‌گردد که خطوط جریان مربوط به خشک کن در حالتی که از چرخ دسیکنت استفاده می‌شود، شبیه به اشکال زیر است. در ابتدا در شکل زیر خطوط جریان در حالتی نمایش داده شده است که سینی‌های حاوی فلفل وجود ندارند. در این حالت مشاهده می‌شود که خطوط جریان دارای تمرکز بالایی در قسمت فوقانی خشک کن می‌باشد.



شکل ۵-۱ خطوط جریان در حالتی که سبدها نمایش داده نشده است

برای آنکه بتوان جزئیات بیشتری از حل را مشاهده نمود حال سبدها نیز در میدان حل ترسیم می‌شوند. با توجه به شکل (۵-۱) و (۵-۲) مشاهده می‌گردد که بیشتر خطوط جریان از قسمت فوقانی فضای حل عبور می‌کند که سینی‌ها در آنجا وجود ندارد. البته این یک موضوع بسیار طبیعی است زیرا سبدها ممانعتی را در مسیر جریان باد ایجاد می‌کنند و جریان هوا به سمتی می‌رود که سبدها در آنجا وجود ندارند.

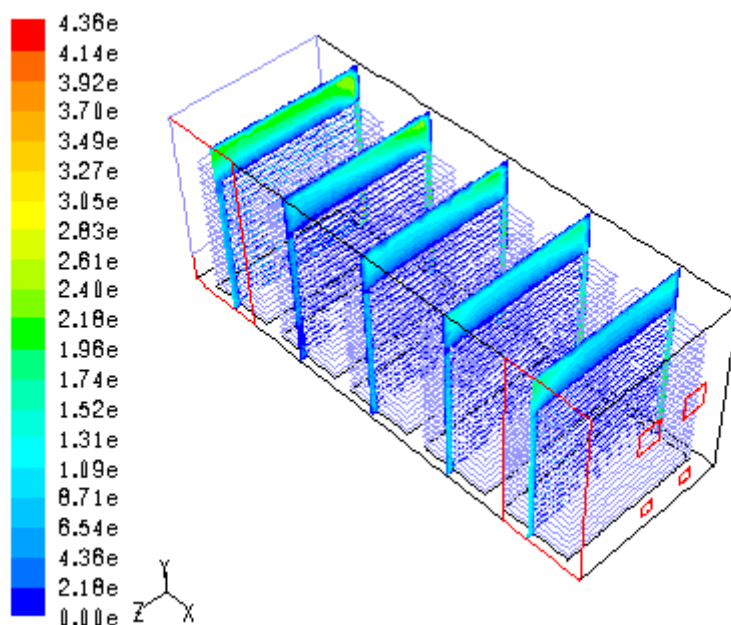


شکل ۵-۲ خطوط جریان در حالتی که سبدها نمایش داده شده است

۵-۵- بررسی کانتورهای سرعت

در این قسمت کانتورهای سرعت در قسمت‌های مختلف خشک کن نشان داده می‌شود. در ابتدا نمای ایزومتریک از فضای حل ارائه می‌گردد تا مشخص شود که کانتورهای سرعت در کدام قسمت مورد

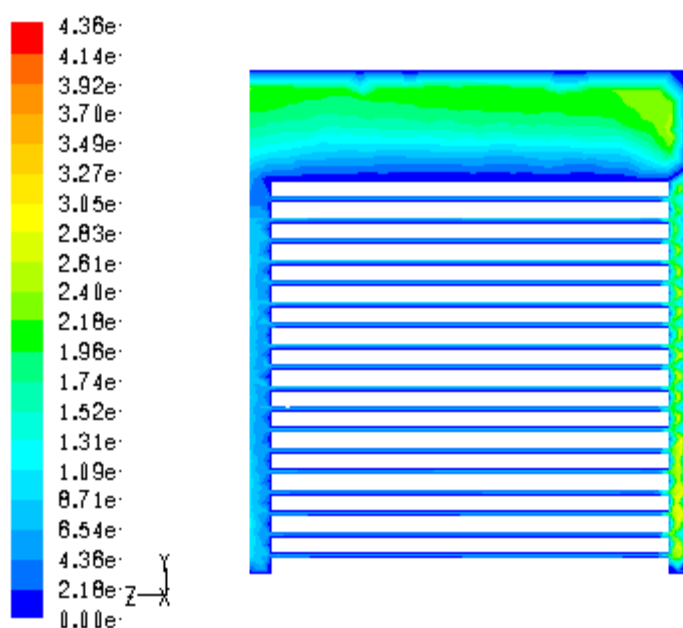
بررسی قرار گرفته شده اند. کانتورهای سرعت در قسمت میانی سبدهای موجود در خشک کن میوه از نمای ایزومتریک در شکل زیر نمایش داده شده است. در قسمت فوقانی خشک کن مشاهده می شود که با حرکت در امتداد خشک کن شاهد کاهش سرعت سیال می باشیم زیرا قسمتی از هوای درون خشک کن از محفظه های کناری خارج می شود و لذا شاهد جریان جرمی کمتری در خشک کن بوده که این امر باعث کاهش سرعت سیال در قسمت فوقانی میشود.



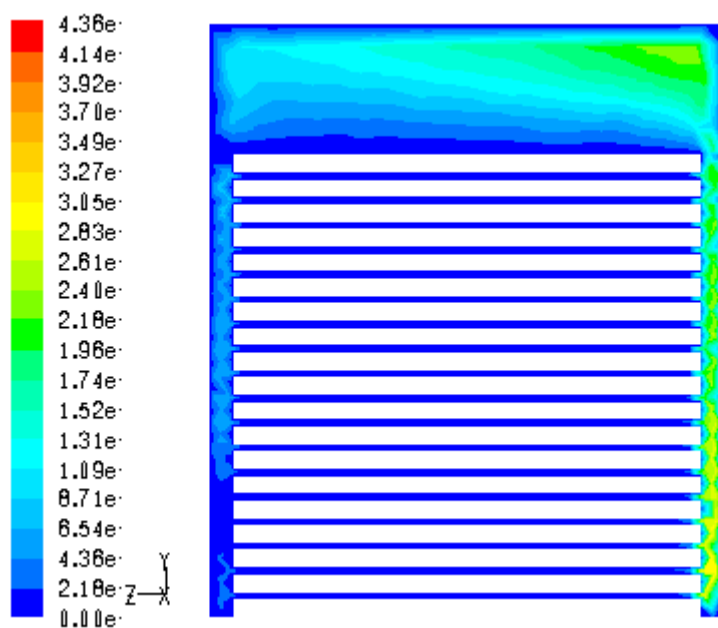
شکل ۵-۳ کانتورهای سرعت در قسمت میانی سبدها در خشک کن از نمای ایزومتریک

برای آنکه بتوان اطلاعات دقیق تری را بدست آورد لازم است که کانتور سرعت در هریک از مقاطع بصورت جداگانه نشان داده شود تا مشخص گردد که الگوی رفتاری جریان در قسمت های بین سبدها با حرکت در طول مسیر خشک کن به چه صورتی تغییر می کند. برای این منظور ۵ صفحه موجود را از قسمت ورودی به خروجی تحت عنوان صفحات شماره ۱، شماره ۲، شماره ۳، شماره ۴ و شماره ۵ نامگذاری میشوند و این نامگذاری در ادامه نیز پابرجاست. سعی بر آن می شود که اتفاقات موجود در اشکال زیر همگی با هم در این قسمت توضیح داده شود. هرچه از صفحه شماره ۱ به سمت صفحات شماره ۲، ۳ و ۴ حرکت صورت پذیرد میزان عددی سرعت سیال درون خشک کن کاهش می یابد و این کاهش سرعت علاوه بر قسمت

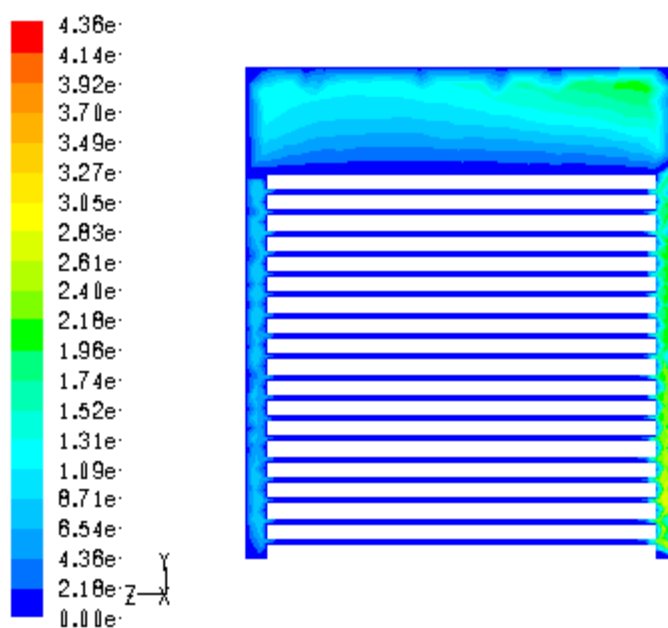
فوقانی خشک کن دیده می‌شود که در قسمت های مرکزی و دور تا دور خشک کن نیز برقرار است. البته مشاهده می‌شود که با حرکت از صفحه شماره ۴ به صفحه شماره ۵ شاهد افزایش مجدد سرعت سیال خواهیم بود زیرا در قسمت انتهایی خشک کن خروجی های با سطح مقطع کوچک وجود دارد که سیال در انتها می‌بایست متمرکز شود و از این نواحی خارج شود که این امر مستلزم به وجود آمدن جریان های عمود بر مسیر کلی حرکت سیال می‌باشد که تواما باعث می‌گردد مقدار عددی بزرگتری برای سرعت سیال در این نواحی بدست آید.



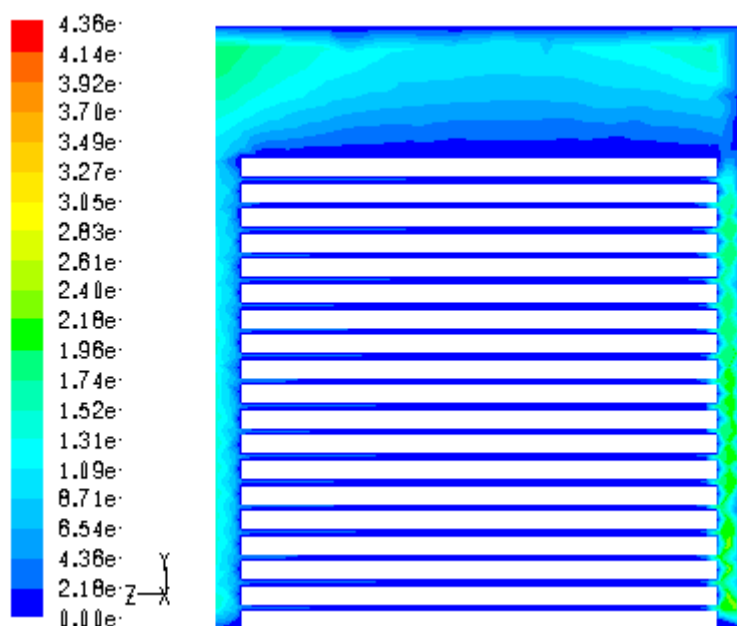
شکل ۴-۵ کانتور سرعت در مقطع شماره ۱



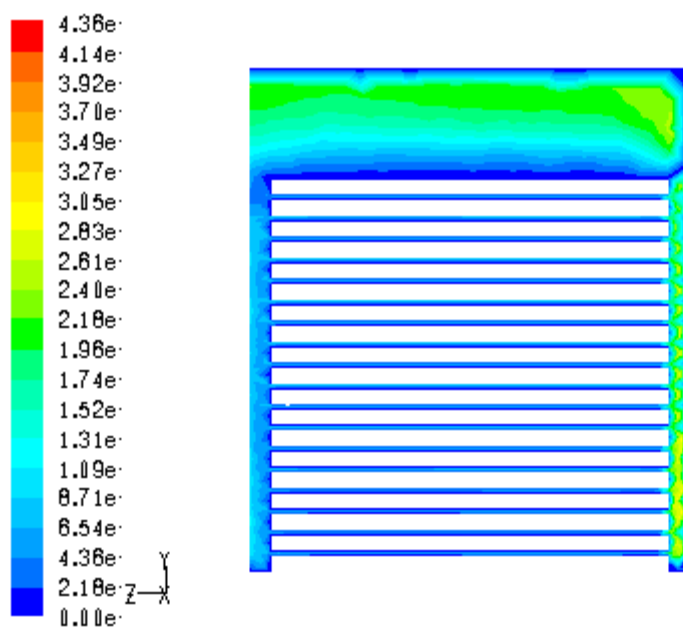
شکل ۵-۱: کانتور سرعت در مقطع شماره ۲



شکل ۵-۶: کانتور سرعت در مقطع شماره ۳



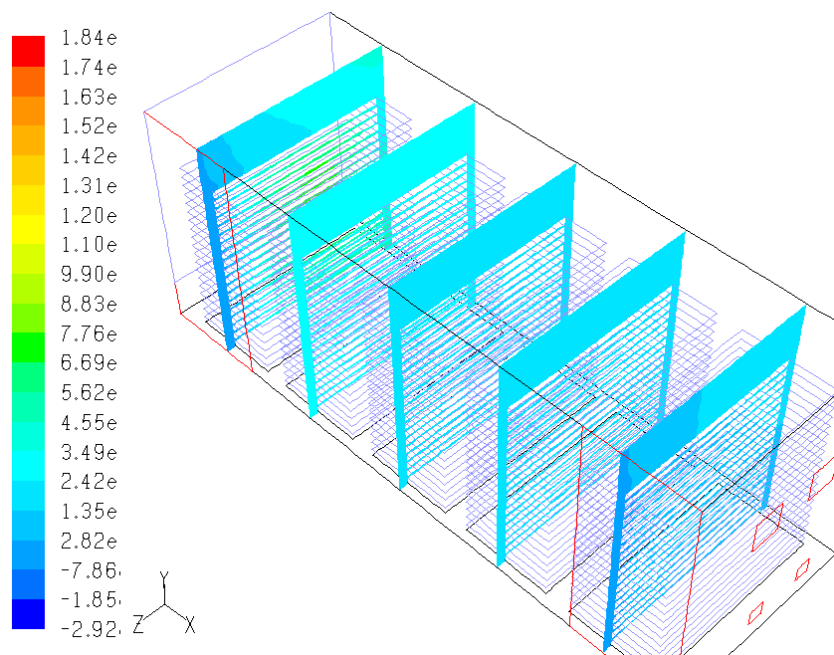
شکل ۷-۵ کانتور سرعت در مقطع شماره ۴



شکل ۸-۵ کانتور سرعت در مقطع شماره ۵

۶-۵- بررسی کانتورهای فشاری

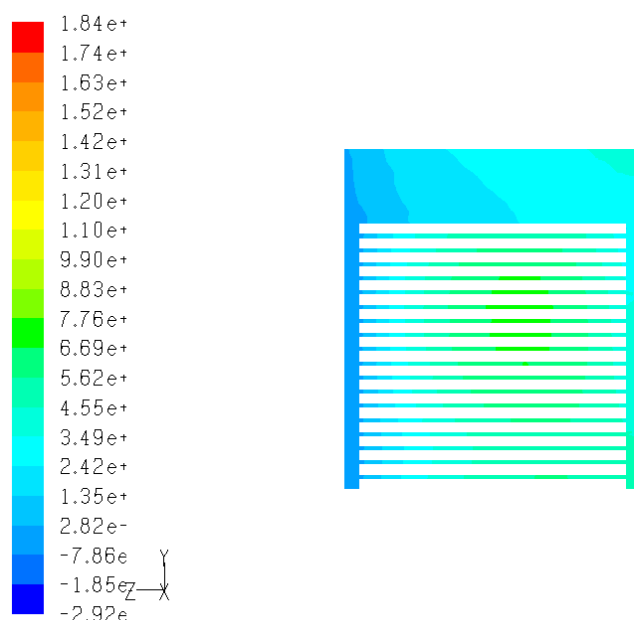
در شکل زیر مجدداً صفحات شماره ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ انتخاب می‌شوند و کانتور فشار بر روی این صفحات استخراج می‌گردد و در شکل زیر از نمای ایزومتریک نمایش داده می‌شود. دو صفحه وجود دارند که فشار بر روی آن رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد. این صفحات عبارتند از صفحه شماره ۱ و صفحه شماره ۵. در حقیقت مشاهده می‌گردد که بر روی این صفحات با حرکت از سمت راست به چپ فشار کاهش می‌یابد. علت را می‌توان در دو دریچه سمت چپ خشک کن یافت که در قسمت سمت چپ صفحات شماره ۱ و ۵ قرار می‌گیرد و جریان سیال از آن خارج می‌شود. گرادیان فشار ایجاد شده بر روی این صفحات در حقیقت به علت خروج جریان بوه و شیب تغییرات فشار نشان دهنده جهت خروج سیال می‌باشد.



شکل ۵-۹ کانتورهای فشار در قسمت میانی سبدها در خشک کن از نمای ایزومتریک

در شکل زیر تغییرات فشاری بر روی صفحه شماره ۱ نشان داده شده است. نکته قابل توجهی که از نتایج در نمای ایزومتریک نمیتوانست یافت، تغییرات فشاری در بین سبدها است که در شکل زیر به وضوح قابل نمایش است. همان طور که دیده می‌شود فشار در قسمتهایی از فضای حل افزایش می‌یابد که سبدهای

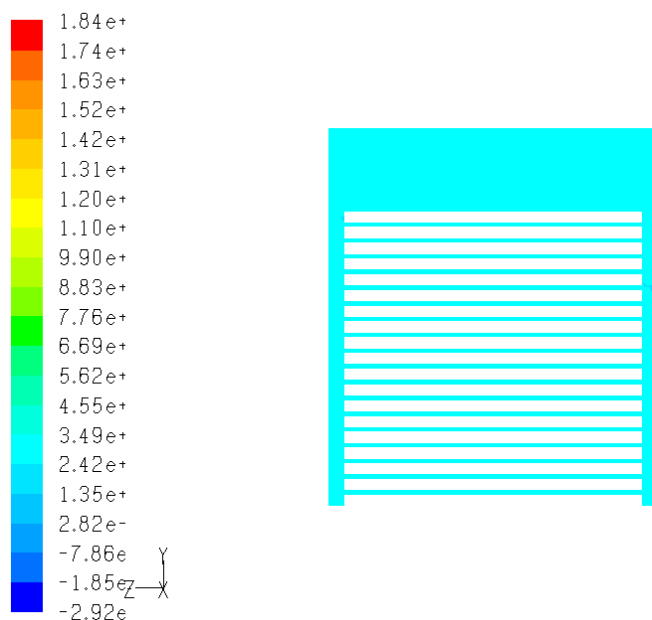
میوه قرار داده شده است. این افزایش فشار به دلیل ممانعتی است که سبدها در مقابل جریان باد ایجاد می‌کنند و باعث تغییراتی در سرعت سیال می‌شوند که این امر موجب می‌گردد که فشار در قسمتهای بین سبدها افزایش یافته و جریان سیال از این نواحی کمتر شده و سیال به قسمت های فوقانی و کناری سبدها در خشک کن حرکت نمایند. همچنین دیده می‌شود که با حرکت از سمت راست فضای حل به سمت چپ فشار کاهش می‌یابد که این کاهش فشار به دلیل وجود دریچه در قسمت چپ خشک کن بوده که جریان سیال از آن خارج می‌گردد و بنابراین یک گرادیان فشار در این نواحی تشکیل می‌شود.



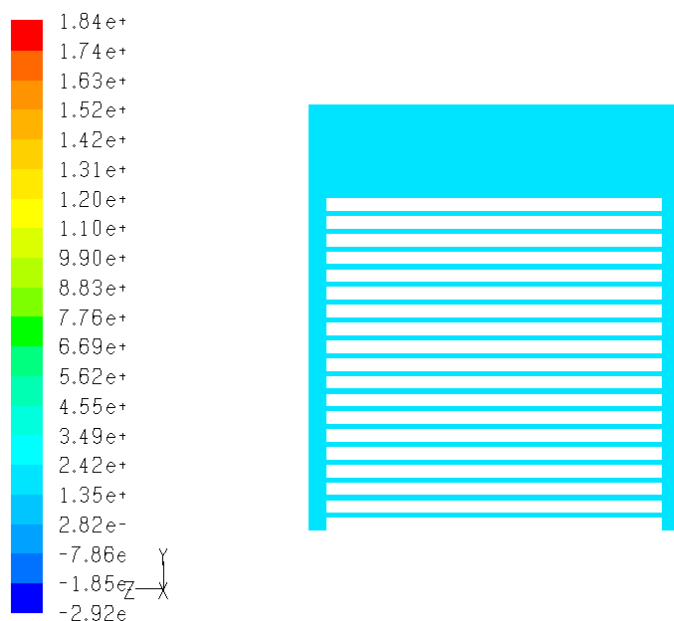
شکل ۵-۱۰ کانتور فشار در مقطع شماره ۱

در ادامه کانتورهای فشاری بر روی صفحات شماره ۲، ۳ و ۴ نمایش داده می‌شود. می‌توان اینگونه در نظر گرفت که فشار بر روی این صفحات تقریباً ثابت است و دچار تغییراتی نمی‌شود. در این صفحات بر خلاف صفحه شماره ۱، دیگر دریچه ای وجود ندارد که سیال از آن خارج شود و بنابراین گرادیان فشار بر روی این صفحات تشکیل نمی‌شود. همچنین بیان شد که اولین ردیف از سبدها در صفحه شماره ۱ باعث می‌شوند که جریان به سمت فوقانی و اطراف سبدها متمایل شود و بنابراین دبی کمتری از سیال از قسمت

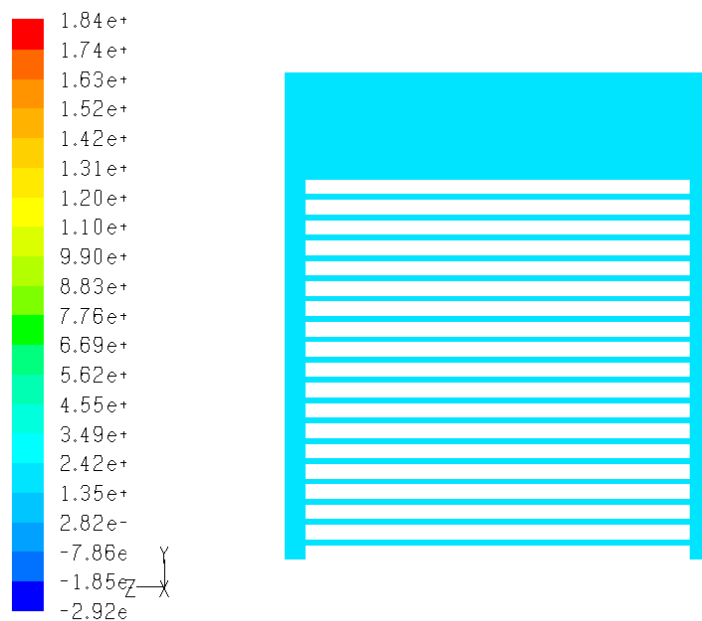
میانی میگذرد که این امر باعث می‌شود تا ممانعت ردیف‌های بعدی سبد بر جریان سیال در قسمت میانی کمتر شده و اجازه می‌دهند که جریان رسیده به سبدها از آنها عبور کنند و بنابراین ممانعت کمتر شده و یک الگوی یکنواخت برای کانتورهای فشار در صفحات گذرنده از میانه سبدهای ردیف ۲، ۳ و ۴ رخ میدهد.



شکل ۵-۱۱ کانتور فشار در مقطع شماره ۲

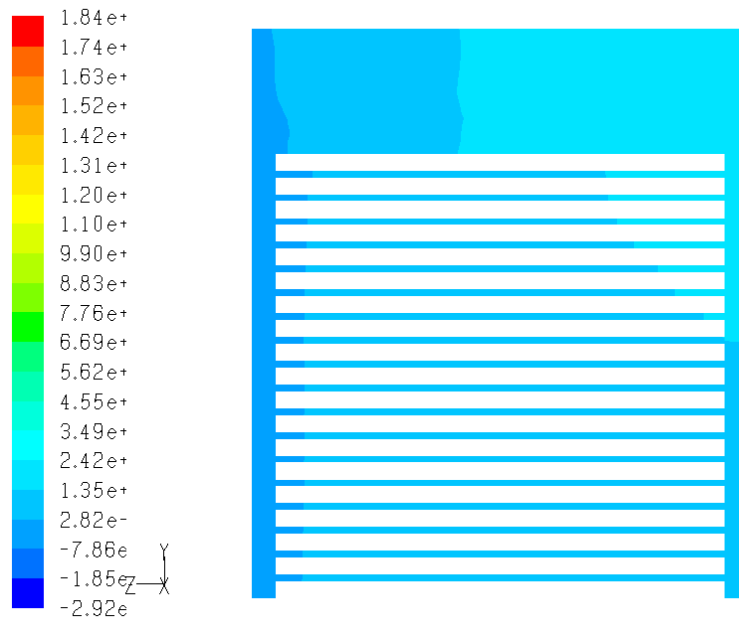


شکل ۵-۱۲ کانتور فشار در مقطع شماره ۳



شکل ۵-۱۳ کانتور فشار در مقطع شماره ۴

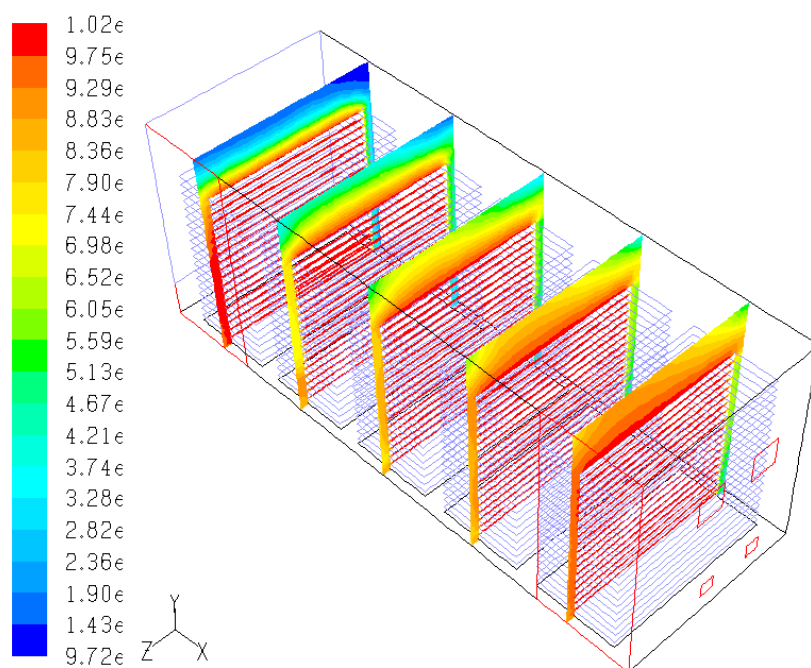
در شکل زیر کانتور فشار در صفحه شماره ۵ نمایش داده شده است که نشان می‌دهد تاثیر سبدها بر توزیع فشار تقریباً ناچیز بوده و باعث نمی‌شوند که افزایش فشار چشمگیر در این ناحیه رخ دهد ولی همانطور که پیشتر نیز بیان شد، با حرکت از سمت راست صفحه به سمت چپ آن فشار کاهش می‌یابد که این امر به خاطر خروج سیال از دریچه تعبیه شده در قسمت چپ خشک کن می‌باشد.



شکل ۵-۱۴ کانتور فشار در مقطع شماره ۵

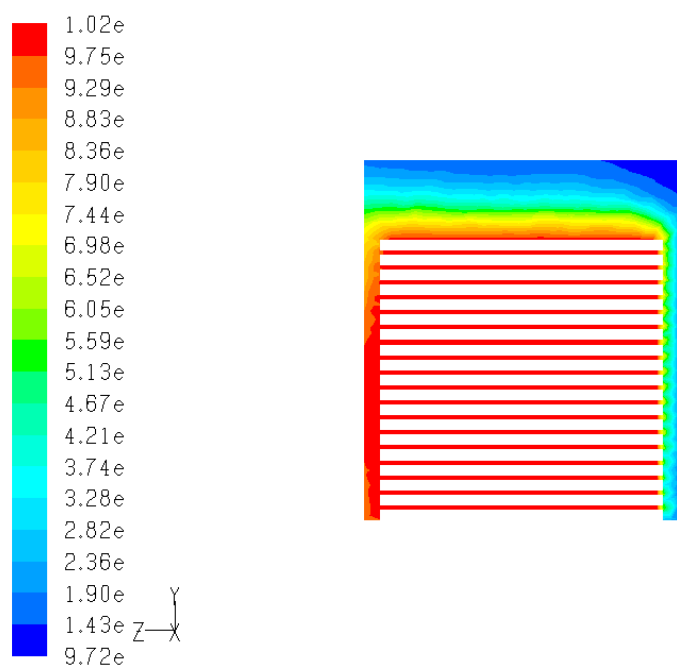
۵-۷- بررسی کانتورهای رطوبت

در شکل زیر کانتورهای مربوط به رطوبت بر روی صفحات شماره ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همانطور که از نمای ایزومتریک می‌توان یافت، با حرکت در طول خشک کن رطوبت هوا افزایش می‌یابد که این امر بدیهی به نظر می‌رسد زیرا وقتی هوا در خشک کن به حرکت در می‌آید ابتدا رطوبت را از سبدهای ردیف اول گرفته و هوای مرطوبتر به ردیف سبدهای دوم می‌رسد که مجدداً رطوبت را از این سبدها نیز دریافت کرده و رطوبتش افزایش می‌یابد و تا سبدهای ردیف پنجم این اتفاق می‌افتد و بنابراین بدیهی است که در صفحات انتهایی رطوبت سیال بیش از رطوبت هوا در صفحات ابتدایی باشد.



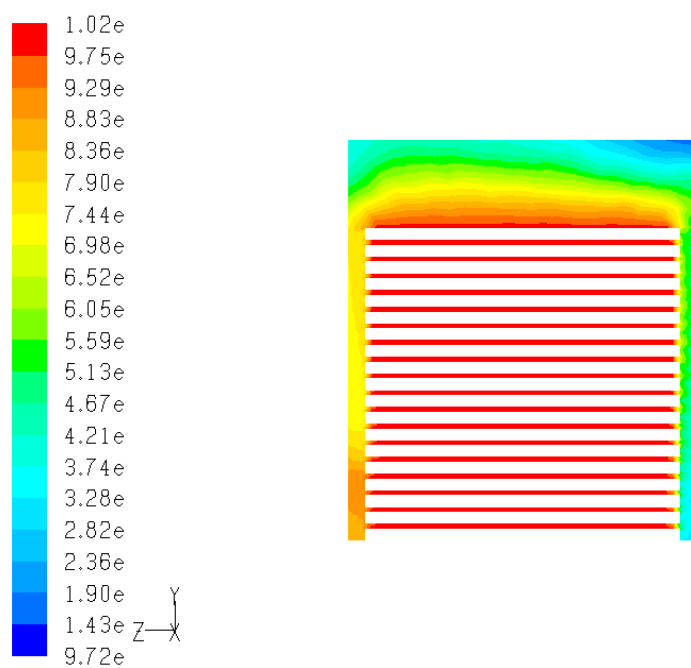
شکل ۵-۱۵ کانتورهای رطوبت در قسمت میانی سبدها در خشک کن از نمای ایزومتریک

در شکل زیر تغییرات مربوط به رطوبت سیال در صفحه شماره ۱ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در فاصله بین سبدها رطوبت هوا بالاتر از سایر قسمت هاست که امری بدیهی است زیر میوه ها در این قسمت قرار گرفته اند که به عنوان منبع تولید رطوبت شناخته می‌شوند. همچنین دیده می‌شود که با حرکت از سمت راست صفحه به سمت چپ آن رطوبت افزایش می‌یابد که این امر بدلیل وجود دریچه خروجی در قسمت سمت چپ می‌باشد که هوای مرطوب از آنجا خارج می‌شود.

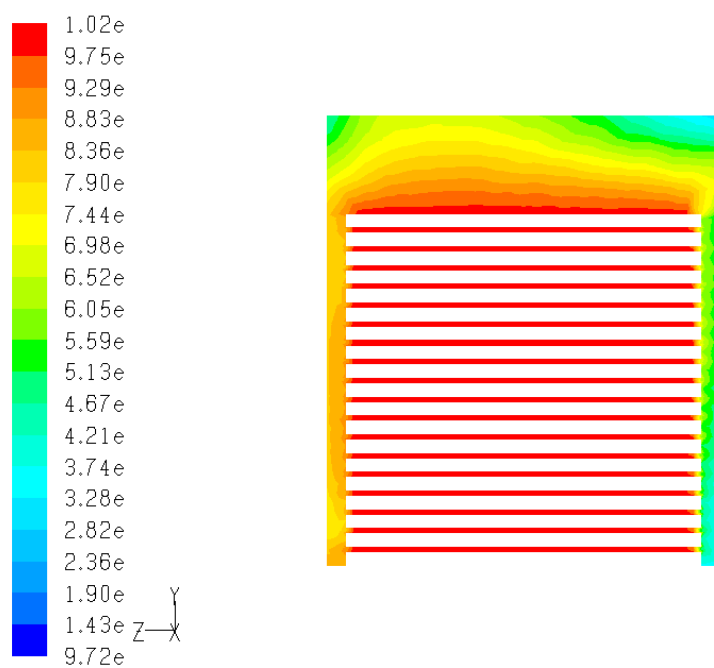


شکل ۵-۱۶ کانتور رطوبت در مقطع شماره ۱

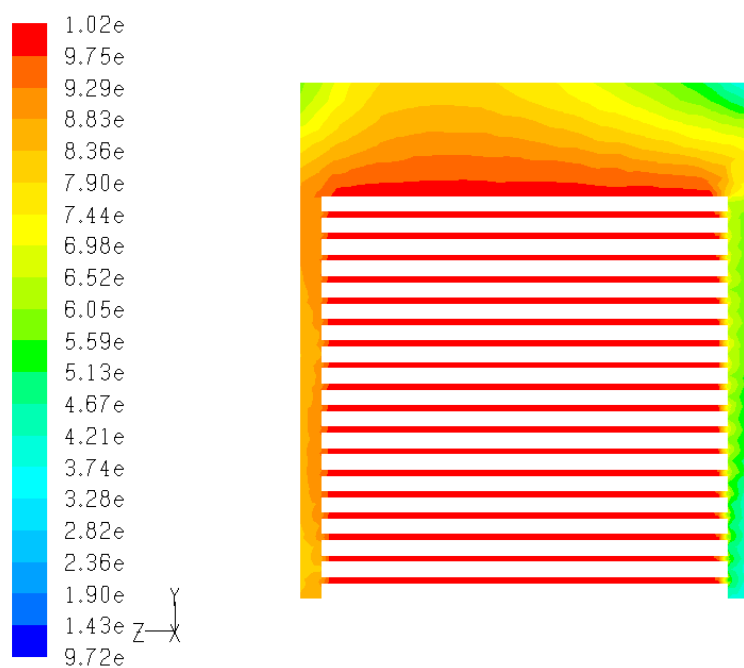
در ادامه کانتورهای رطوبت در صفحات شماره ۲، ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده است که نشان می‌دهد با حرکت در طول خشک کن رطوبت سیال دحالت کلی افزایش یافته است و همچنین دیده می‌شود از آنجا که دریچه خروجی جریان در محلی که ردیف اول سبدها وجود دارد، قرار گرفته شده است، یک الگوی جریانی شکل می‌گیرد که تا انتهای خشک کن بر رفتار جریان تاثیر گذار بوده و غلظت رطوبت در قسمتهای سمت چپ صفحات بیش از غلظت رطوبت در قسمتهای راست صفحات می‌باشد.



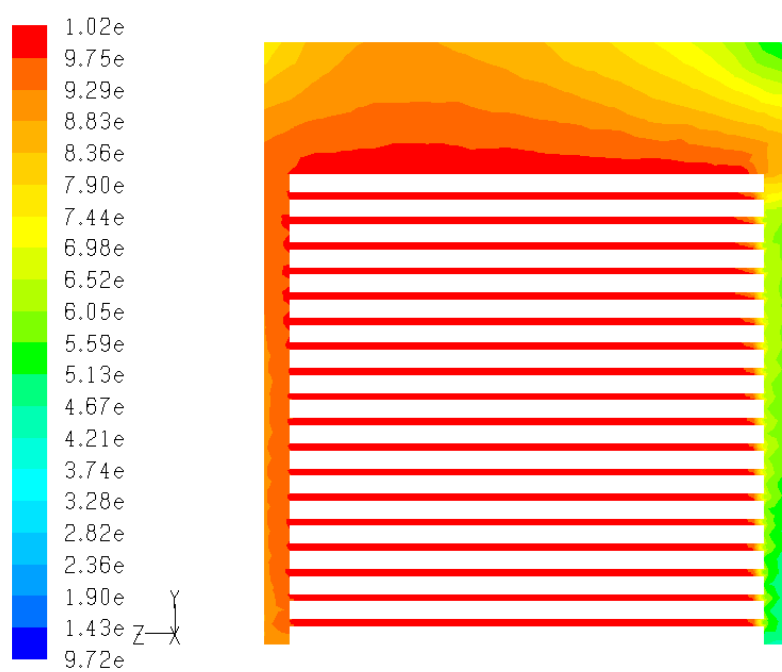
شکل ۵-۱۷ کانتور رطوبت در مقطع شماره ۲



شکل ۵-۱۸ کانتور رطوبت در مقطع شماره ۳



شکل ۵-۱۹: کانتور رطوبت در مقطع شماره ۴



شکل ۵-۲۰: کانتور فشار در مقطع شماره ۵

۵-۸- بررسی اثرات استفاده از چرخ دسیکنت در ورودی

در ابتدا می‌بایست این مطلب را بیان نمود که کانتورهای مربوطه که در اشکال بخش های پیشین مطرح گردید، در حالتی که از دسیکنت استفاده شود و یا نشود به هم شبیه می‌باشند. بنابراین آن کانتورها در یکی از حالات ترسیم شده و مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این قسمت یک مقایسه ای بین زمانی که برای خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از چرخ دسیکنت صرف می‌شود و زمانی که برای خشک کردن همان محصولات بدون استفاده از چرخ دسیکنت صرف می‌شود، انجام می‌پذیرد. نتایج در دو حالت کلی با هم مقایسه می‌شوند که عبارتند از حالتی که میوه ۵ در صد رطوبت خود را از دست دهد و حالتی که میوه ۷ درصد رطوبت خود را از دست دهد. نتایج نشان می‌دهد که در حالتی که میوه ۵ درصد رطوبت خود را از دست می‌دهد، استفاده کردن از چرخ دسیکنت موجب می‌شود که به میزان ۳ در صد در زمان صرفه جویی شود و این در حالی است که اگر ۷ در صد رطوبت کاهش یابد، استفاده از چرخ دسیکنت باعث صرفه جویی ۳/۲ درصدی در زمان می‌شود.

در حالتی که میوه ۵ در صد رطوبت خود را از دست می‌دهد، لازم است که خشک کن برای ۲۰۰ ثانیه کار کند و اگر هدف از بین بردن ۷ درصد رطوبت است، سیستم می‌بایست به میزان ۳۱۰ ثانیه کار کند. حال اگر از چرخ دسیکنت استفاده شود این زمان ها به ترتیب به ۱۹۴ و ۳۰۰ ثانیه کاهش می‌یابد که با توجه به شار حرارتی ۱۰۰ استفاده شده در قسمت ورودی و با فرض راندمان ۸۰ درصدی احتراق و ارزش حرارتی سوخت (۵۰ مگاژول بر کیلوگرم) برابر با گاز شهری می‌توان نتیجه گرفت که در ۵ ثانیه اول ۳٪ و در ۷ ثانیه ۳/۲٪ گاز ذخیره می‌شود.

۵-۹- تحلیل انرژی و اکسرژی

به منظور انجام تحلیلهای انرژی و اکسرژی و در ادامه آن تحلیل اقتصادی، فرایند خشک کن به شکل یک فرآیند جریان پایدار در نظر گرفته شد. بر اساس قانون اول ترمودینامیک، نرخ مصرف انرژی به صورت رابطه زیر بیان میشود:

$$\dot{Q} = \dot{m}_a(h_{ai} - h_{ao}) \quad 9-5$$

که در رابطه فوق q نرخ مصرف انرژی، $\dot{m}_a$ دبی جرمی هوای خشک، h_{ai} آنتالپی ویژه هوا در ورودی محفظه خشک کن و h_{ao} آنتالپی ویژه هوا در خروجی محفظه خشک کن است .

دبی جرمی هوا با استفاده از رابطه زیر بر اساس چگالی، سرعت و سطح مقطع محاسبه میشود:

$$\dot{m}_a = \rho_a V A \quad 5-10$$

که، ρ_a چگالی هوا، V سرعت و A سطح مقطع خشک کن هستند. چگالی هوای خشک به نوبه خود تابعی از دما می باشد که در رابطه زیر بیان شده است که در آن فرض شده هوا گاز ایده ال است.

$$\rho_a = \frac{p}{RT} \quad 5-11$$

که در آن T دمای گاز بر حسب کلوین و p فشار و R ثابت مربوط به گاز است.

آنتالپی هوا در خشک کن شامل دو جزء است، یکی مربوط به انرژی محسوس که به وسیله اختلاف دما محاسبه می شود و دیگری نامحسوس و مربوط به میزان بخار آب موجود در هوا، آنتالپی در ورودی و خروجی محفظه خشک کن به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه می شود

$$h_{ai} = c_{pa} T_{ai} + x_{ai} h_w \quad 5-12$$

$$h_{ao} = c_{pa} T_{ao} + x_{ao} h_w \quad 5-13$$

که، C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت، X نسبت رطوبت هوا و h_w آنتالپی ویژه بخار آب هستند.

گرمای ویژه هوا در فشار ثابت را می توان از رابطه بعدی محاسبه کرد

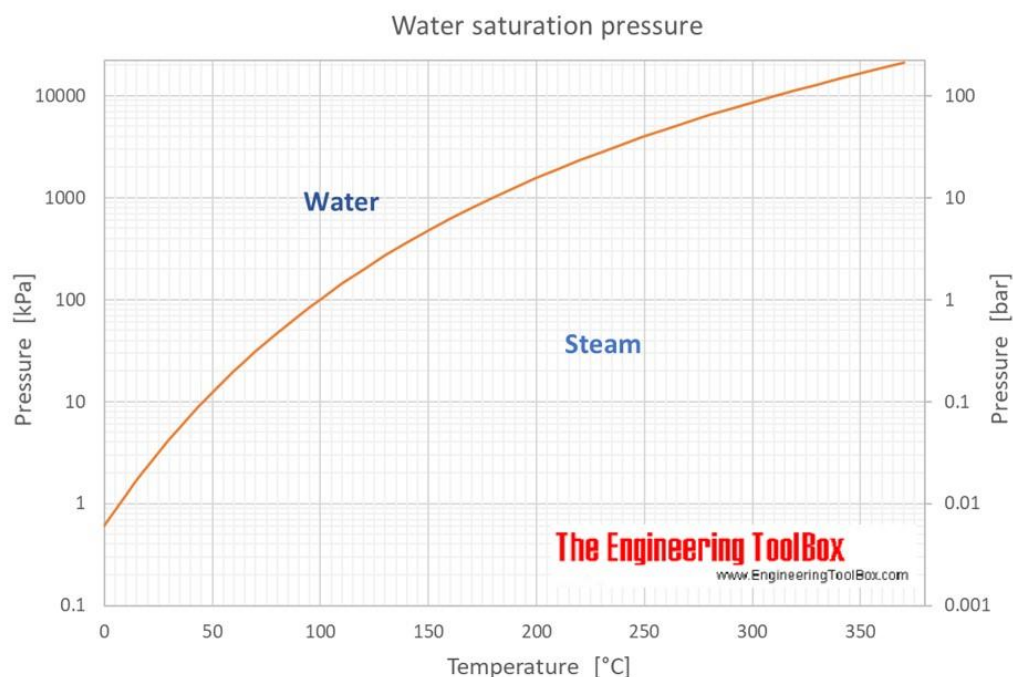
$$c_{pa} = 1.003 + 5.4 \times 10^{-5} T_a \quad 14-5$$

مقادیر میزان رطوبت نسبی و نسبت رطوبت که در اینجا با X نمایش داده شد از طریق رابطه زیر به یکدیگر قابل تبدیل هستند

$$\chi = \frac{0.62189 \times RH \times P_{vs}}{101.3 - RH \times P_{vs}}$$

۱۵-۵

که در آن RH رطوبت نسبی و p_{vs} فشار بخار اشباع است. فشار بخار اشباع را بر حسب دما می‌توان از طریق جداول ترمودینامیکی تخمین زد. شکل زیر نمودار تغییرات فشار بخار آب اشباع بر حسب دما را نمایش می‌دهد، در محدوده مورد نظر ما به دلیل اینکه سیستم تحت فشار نیست در فشارهای بالای ۱۰۰ درجه با بخار خالص و با فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال مواجه خواهیم بود و فشار بالاتر از آن مشاهده نخواهد شد.



شکل ۵-۲۱: تغییرات فشار بخار آب اشباع بر حسب دما

نسبت انرژی مصرف شده طی فرآیند به انرژی تأمین شده در سیستم توسط شاخص نسبت مصرف انرژی تعریف و با رابطه زیر محاسبه میشود

$$\varepsilon = \frac{h_{ai} - h_{ao}}{h_{ai} - h_{\infty}}$$

۵-۱۶

که در آن ε شاخص مصرف انرژی، h آنتالپی هوای خشک و زیر نویس های ai , ao و ∞ به ترتیب شرایط ورودی، خروجی از خشک کن و شرایط محیط خارج هستند.

برای عمومی سازی و آسان شدن مقایسه بهتر است تا مقادیر بر حسب واحد جرم بیان شوند. انرژی ویژه مصرف شده در حین فرآیند خشک کردن، که عبارت است از مقدار انرژی مصرفی برای تبخیر یک کیلوگرم آب از محصول، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود

$$\frac{m_a(h_{ai}-h_{ao})}{m_w} \Delta t \quad ۱۷-۵$$

که، Δt مدت زمان فرآیند و m_w مقدار آب تبخیر شده از محصول است. مقدار آب که از رابطه زیر محاسبه می شود

$$m_w = W_i - W_f \quad ۱۸-۵$$

که، W_i و W_f به ترتیب جرم اولیه و جرم نهایی محصولات داخل خشک کن هستند. گاز طبیعی از پاک ترین سوخت های فسیلی می باشد. قسمت عمده گاز طبیعی از متان تشکیل شده و اتان، پروپان، بوتان و چند ماده دیگر به ترتیب مقدار حضور در گاز طبیعی سایر موارد تشکیل دهنده هستند. گاز بسته به اینکه در چه ناحیه ای استخراج شود دارای ترکیبات و خواص متفاوت است. گاز طبیعی از مخلوطی از هیدروکربورها و مقداری ناخالصی تشکیل می شود. از آنجا که کیفیت و مشخصات گاز طبیعی در نقاط مختلف کشور متفاوت است، از میانگین تقریبی مشخصات در این مطالعه استفاده شد، مشخصات گاز که در این تحلیل استفاده شده است، در جدول زیر ارائه شده است. بازده مشعل حرارتی که باعث تبدیل انرژی حرارتی به تغییر دمای هوا می شود با بررسی تعدادی از کاتالوگ های فنی به طور میانگین برابر با ۸۰٪ در نظر گرفته شد.

جدول ۵-۱ مشخصات گاز طبیعی به طور میانگین

چگالی	ارزش حرارتی
Kg/m ³	Kcal/m ³
0.65	8600

با استفاده از روابط فوق بحث مربوط به انرژی مصرف شده و بازده دستگاه خشک کن قابل محاسبه هستند. از مواردی مانند میزان انرژی اتلاف شده به محیط صرف نظر شده است. در واقع این بخش مربوط به قانون اول ترمودینامیک بود. در بخش بعدی بحث بر اساس قانون دوم ترمودینامیک است، که شامل تحلیل انرژی در خشک کن می‌باشد.

با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک بحث تحلیل انرژی انجام شده است. طبق قانون دوم ترمودینامیک انرژی علاوه بر مقدار، دارای کیفیت نیز است. به عبارن واضح تر یک فرآیند واقعی ترمودینامیکی در جهت کاهش کیفیت انرژی اتفاق می‌افتد. با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک قابلیت انجام کار در هوای ورودی، هوای خروجی و در نهایت کاهش قابلیت انجام کار یا به عبارتی افت کیفیت در روابط زیر بیان شده است

$$\dot{X}_i = \dot{m}_a c_p ((T_{ai} - T_\infty) - T_\infty \log \frac{T_{ai}}{T_\infty}) \quad ۱۹-۵$$

$$\dot{X}_o = \dot{m}_a c_p ((T_{ao} - T_\infty) - T_\infty \log \frac{T_{ao}}{T_\infty}) \quad ۲۰-۵$$

$$\Delta \dot{X} = \dot{X}_i - \dot{X}_o \quad ۵-۲۱$$

که در آن $\dot{X}_i$ نرخ انرژی ورودی به محفظه خشک کن، $\dot{X}_o$ نرخ انرژی خروجی از محفظه خشک کن و $\Delta \dot{X}$ نرخ اتلاف انرژی هستند

نسبت قابلیت انجام کار در خروجی از خشک کن به قابلیت انجام کار در ورودی آن به عنوان راندمان

انرژی تعریف می‌شود که از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\eta_x = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i}$$

بهترین حالت ممکن این است که بازده اگزرژی نزدیک به یک باشد، به این معنی که کیفیت انرژی افت نکرده باشد، که البته در عمل امکان پذیر نخواهد بود.

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک و اطلاعات به دست آمده از تحلیل عددی، تحلیل انرژی فرآیند خشک کردن انجام شد. مقادیر متوسط نرخ مصرف انرژی و انرژی ویژه مصرفی برای شرایط مختلف خشک کردن محاسبه شدند.

متوسط نرخ مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن قطعات میوه در شرایط مختلف دما، رطوبت و سرعت هوا تغییر می‌کند. متوسط نرخ مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن قطعات میوه در سرعت هوای ۰.۵ تا ۱/۵ متر بر ثانیه و دماهای بین دمای ۳۳۰ تا حداکثر تا ۳۵۰ درجه کلوین که معادل ۷۷، ۶۷ و ۵۷ در جدول مشاهده شده است که با افزایش دما و سرعت هوای ورودی به محفظه خشک کن، نرخ مصرف انرژی افزایش یافته است.

دمای محیط اطراف برابر با ۳۰۰ کلوین فرض شد و نسبت جرم رطوبت در ورودی برابر با ۰.۰۱ و در خروجی برابر با ۰.۰۳ فرض شد. معادلات و روابط فوق در داخل نرم افزار Excel قرار داده شدند و بر اساس جرم محصول در داخل خشک کن، زمان خشک شدن و همینطور سرعت و دمای هوای ورودی سایر پارامترها محاسبه شدند. دمای هوای خروجی از موازنه انرژی طبق قانون اول در طی زمان مورد نیاز جهت خشک شدن محاسبه شد و سپس در محاسبات مربوط به اگزرژی نیز از آن استفاده شد.

جدول ۵-۲ محاسبات قانون اول

				ou	dot	ai	ao	i	o	ai	ao	w	
		2	/s	g/m ³	g/s					J/kg	J/kg	g	J
.0	.4	.7	.5	.0	.4	50.0	13.4	.01	.03	03.1	17.3	.05	4.4
.0	.4	.7	.0	.0	.8	50.0	31.3	.01	.03	03.1	35.4	.10	56.3
.0	.4	.7	.5	.0	.3	50.0	37.3	.01	.03	03.1	41.4	.15	78.3

				ou	dot	ai	ao	i	o	ai	ao	w	
		2	/s	g/m ³	g/s					J/kg	J/kg	g	J
.0	.4	.7	.5	.1	.5	40.0	04.4	.01	.03	3.0	08.3	.05	8.0
.0	.4	.7	.0	.1	.0	40.0	21.8	.01	.03	3.0	25.8	.10	63.6
.0	.4	.7	.5	.1	.5	40.0	27.6	.01	.03	3.0	31.7	.15	89.1

				ou	dot	ai	ao	i	o	ai	ao	w	
		2	/s	g/m ³	g/s					J/kg	J/kg	g	J
.0	.4	.7	.5	.1	.6	30.0	95.5	.01	.03	2.9	9.2	.05	1.9
.0	.4	.7	.0	.1	.1	30.0	12.4	.01	.03	2.9	16.2	.10	71.2
.0	.4	.7	.5	.1	.7	30.0	18.0	.01	.03	2.9	21.9	.15	00.5

جدول ۳-۵ محاسبات مربوط به آگزری

V	rou	mdot	cp	Tai	Tao	Xi	Xo	ΔX	Eta
m/s	Kg/m ³	Kg/s		K	K	kJ/kg.K	kJ/hg.K	kJ/hg.K	
0.5	1.0	2.4	1.0	350.0	313.4	117.9	59.6	58.3	0.5
1.0	1.0	4.8	1.0	350.0	331.3	235.8	175.3	60.4	0.7
1.5	1.0	7.3	1.0	350.0	337.3	353.7	291.7	62.0	0.8

V	rou	mdot	cp	Tai	Tao	Xi	Xo	ΔX	Eta
m/s	Kg/m ³	Kg/s		K	K	kJ/kg.K	kJ/hg.K	kJ/hg.K	
0.5	1.1	2.5	1.0	340.0	304.4	104.6	47.2	57.3	0.5
1.0	1.1	5.0	1.0	340.0	321.8	209.1	149.6	59.5	0.7
1.5	1.1	7.5	1.0	340.0	327.6	313.7	252.6	61.0	0.8

V	rou	mdot	cp	Tai	Tao	Xi	Xo	ΔX	Eta
m/s	Kg/m ³	Kg/s		K	K	kJ/kg.K	kJ/hg.K	kJ/hg.K	
0.5	1.1	2.6	1.0	330.0	295.5	90.7	34.4	56.3	0.4
1.0	1.1	5.1	1.0	330.0	312.4	181.4	123.0	58.4	0.7
1.5	1.1	7.7	1.0	330.0	318.0	272.1	212.1	60.0	0.8

دوره بازگشت سرمایه

طبق مطالعات مرادی و همکاران [۲۴] ۹۵٪ از وزن فلفل را رطوبت تشکیل می‌دهد، با محاسبه زیر می‌توان انرژی لازم در حالت فرضی که برای خشک کردن این حجم رطوبت در یک کیلوگرم از محصول نیاز است را محاسبه نمود. به منظور خشک کردن باید دمای محصول را بالا برد تا رطوبت تبخیر شود، در نتیجه انرژی به دویخش محسوس مربوط به تغییر دما و نهان مربوط به تبخیر آب تقسیم می‌شود. محاسبات در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه انجام شده است. دمای بالاتر در مطالعات قبلی [۲۵] اشاره شده که باعث تخریب بافت فلفل می‌شود.

$$\begin{aligned}\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow Q &= 0.95 \times 1\text{kg} \times 4.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \times 50\text{K} + 0.95 \times 1\text{kg} \times \\ 2591 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} &= 2660\text{ kJ} \\ \Delta T = 60\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow Q &= 0.95 \times 1\text{kg} \times 4.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \times 60\text{K} + 0.95 \times 1\text{kg} \times 2608 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 2717\text{ kJ} \\ \Delta T = 70\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow Q &= 0.95 \times 1\text{kg} \times 4.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \times 70\text{K} + 0.95 \times 1\text{kg} \times 2626 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 2774\text{ kJ}\end{aligned}$$

۵-۲۳

به دو حالت می‌توان از چرخ دسیکانت استفاده نمود. راه اول این است که هوای ورودی را از چرخ دسیکانت عبور داد و راه دوم این است که هوای خروجی از محفظه خشک کن با عبور از چرخ رطوبت گیری شود و از دمای بالای آن استفاده مجدد شود. هر دو این راه از منظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفتند.

هزینه مورد نیاز جهت عملکرد چرخ دسیکانت به دو بخش قابل تقسیم است. یک هزینه خرید و نصب و دوم هزینه تعمیرات و نگهداری می‌باشد. برای محفظه مورد بررسی در مطالعه حاضر هزینه ساخت چرخ دسیکانت با قطر در حدود ۱ متر، طبق جستجو و مشورت از تعدادی از سازندگان در حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلیون ریال خواهد بود. هزینه های جاری شامل هزینه نیروی انسانی و احیا مواد جاذب و تعویض

مواد پس از دوره کارکرد نیز برابر با ۲۰٪ سالیانه مبلغ هزینه اولیه فرض شد.

تعرفه گاز در سال ۱۴۰۰ عبارت است از متوسط ۷۰۰ ریال به ازای هر متر مکعب با یارانه دولتی که البته نرخ واقعی آن بیشتر است و در صورت اضافه مصرف تا ۲۸۰۰ ریال نیز خواهد رسید. با احتساب بازده ۸۰٪ تبدیل آن به حرارت و ۵۰٪ بازده در خشک کن، به ازای خشک کردن هر یک متر مکعب گاز می‌تواند ۵ کیلوگرم فلفل را خشک کند.

در صورتی که هوای ورودی فاقد رطوبت باشد در مقایسه با مقدار ۰.۰۱ که قبلاً فرض شده بود، مقدار انتالپی هوای ورودی در دو حالت به شکل زیر قابل مقایسه است

$$x = 0.01 @ T = 50\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{ai} = c_{pa}T_{ai} + x_{ai}h_w = 76\text{ kJ/kg} \quad 5-24$$

$$x = 0.0 @ T = 50\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow h_{ai} = c_{pa}T_{ai} + x_{ai}h_w = 50\text{ kJ/kg} \quad 5-25$$

همانطور که مشاهده میشود میزان مصرف انرژی ۶۵٪ حالت اولیه است. در نتیجه برای این حالت دوره بازگشت سرمایه برای سه خشک کن با ظرفیت های مختلف در جدول زیر بیان شده است.

جدول ۴-۵ دوره برگشت سرمایه با عبور هوای ورودی از چرخ دسیکنت

وزن محصول	مصرف گاز	هزینه انرژی	دوره برگشت سرمایه
kg	متر مکعب	ریال	سال
10000	2000	1400000	408.16327
100000	20000	14000000	40.816327

در حالتی که هوای برگشتی از محفظه کابینت را از چرخ دسیکنت عبور دهیم تنها دو عامل افت انرژی داریم یکی افت انرژی از جداره خشک کن و دیگری تغییرات دمای هوای عبوری که به طور میانگین در حدود ۲۰ درجه سانتیگراد است. در نتیجه اختلاف انتالپی ورود و خروج در حدود 20 kJ/kg خواهد

بود که تنها ۲۶٪ مقدار حالت بدون چرخ دسیکانت است

جدول ۱-۵ دوره برگشت سرمایه با عبور هوای خروجی از چرخ دسیکانت

وزن محصول	مصرف گاز	هزینه انرژی	دوره برگشت سرمایه
kg	متر مکعب	ریال	سال
10000	2000	1400000	193.05019
100000	20000	14000000	19.305019

همانطور که مشخص است با نرخ فعلی سوخت استفاده از چرخ دسیکانت توجیه اقتصادی مناسبی نخواهد داشت. اما از طرف دیگر با احتساب قیمت بدون یارانه و تولید بالای محصول این موضوع تفاوت خواهد داشت و به عنوان مثال در صورت تولید بیش از ۱۰۰ تن سالیانه و قیمت گاز ۲۸۰۰ ریال به ازای هر متر مکعب دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۵ سال خواهد بود.

فصل ششم نتیجه گیری و

پیشنهادات

۱-۶ نتیجه گیری

در مطالعه حاضر عملکرد فنی و اقتصادی یک خشک کن میوه به همراه یک چرخ دسیکانت مورد مطالعه قرار گرفت. این نوع از خشک کن می تواند در شهرهای با رطوبت بالا مورد استفاده قرار گیرد. اهمیت خشک کن میوه و سبزیجات در بهبود صنعت مواد غذایی واضح است، مروری بر مطالعات پیشین در زمینه خشک کن ها نشان از اهمیت مصرف انرژی در این بخش داشت. در نتیجه از بررسی فنی اقتصادی این راهکار برای کاهش مصرف انرژی درای اهمیت است.

به منظور بررسی فنی از مکانیک سیالات محاسباتی و شبیه سازی جریان هوا و رطوبت در کابین خشک کن استفاده شد. معادلات حاکم سیالات و روش عددی مورد اشاره قرار گرفتند. علاوه بر آن از قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای تخمین میزان انرژی مورد نیاز جهت فرایند خشک کردن استفاده شد. بر اساس نتایج حل عددی کانتورهای سرعت، فشار و رطوبت در داخل کابین خشک کن ترسیم شدند. مقایسه ای بین مصرف سوخت در حالتی که از چرخ دسیکانت استفاده شده و در حالتی که از چرخ دسیکانت استفاده نمی شود انجام می پذیرد که نتایج گویای این مطلب است که استفاده از چرخ دسیکانت در کاهش رطوبت های ۵٪ و ۷٪ به ترتیب باعث می شود که ۳٪ و ۳/۲٪ در مصرف سوخت صرفه جویی شود.

با تخمین هزینه سرمایه گذاری اولیه جهت تامین چرخ دسیکانت و همینطور افزایش هزینه جهت تعمیر و نگهداری از آن و همینطور تعرفه گاز طبیعی در کشور در سال ۱۴۰۰ بحث توجیه پذیری اقتصادی استفاده از چرخ دسیکانت در خشک کن میوه مورد بررسی دقیق قرار گرفت. بحث توجیه پذیری بر اساس دوره بازگشت سرمایه انجام شد. با انجام تحلیل انرژی و اکسرژی به ترتیب بر اساس قانون اول و دوم ترمودینامیک مشخص گردید که در صورت تولید بیش از ۱۰۰ تن محصول به شکل سالیانه و قیمت گاز طبیعی بر مبنای قیمت آزاد دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۵ سال خواهد بود. از طرف دیگر، در صورت تولید کمتر یا قیمت گاز یارانه ای استفاده از چرخ دسیکانت توجیه اقتصادی نخواهد داشت و دوره بازگشت سرمایه در حدود ۱۹ سال خواهد شد.

در نتیجه به نظر می‌رسد این راهکار تنها در مورد صنایع با ظرفیت بالا توجیه اقتصادی دارد و در مقیاس خرد قابل توصیه نمی‌باشد. مگر در صورتی که توسط دولت برای این موضوع مشوق اقتصادی از قبیل وام و تسهیلات در نظر گرفته شود. موضوع دیگر که در بخش پیشنهادات نیز به آن اشاره شده است و بیشتر در حوزه صنایع غذایی باید مورد بررسی قرار گیرد، تاثیر چرخ دسикنت در کیفیت نهایی محصول است. این موضوع در نتیجه این است که هوای عبوری از چرخ دسикنت به دلیل قابلیت جذب بالای رطوبت می‌تواند در زمان کوتاه تر و دمای کمتر عملیات رطوبت گیری و خشک کردن را انجام دهد که در این صورت و تاثیر چرخ دسикنت بر کیفیت محصول این موضوع نیز در تحلیل اقتصادی نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

۲-۶ پیشنهادات

ایده استفاده از چرخ دسикنت در خشک کن میوه مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه توجیه اقتصادی کاربرد این ترکیب در وضعیت تعرفه انرژی حاضر کشور در مقیاس کوچک توجیه پذیر نیست. اما در صورت افزایش قیمت انرژی و یا در مقیاس صنعتی این ترکیب ارزش پژوهش بیشتر را دارا می‌باشد. تعدادی از پیشنهادات برای ادامه تحقیق در ادامه بیان شده اند.

در مطالعه حاضر شبیه سازی عددی کابین خشک کن انجام پذیرفت. به عنوان پیشنهاد بعدی می‌توان از نمونه آزمایشگاهی جهت ارزیابی تجربی این راهکار استفاده نمود. با ساخت و استفاده از این خشک کن ترکیبی هزینه های مربوط به ساخت و تامین و هزینه های جاری با دقت بالاتر قابل محاسبه خواهند بود.

به عنوان یک پیشنهاد دیگر جهت ادامه تحقیق می‌توان به تاثیر چرخ دسикنت در کیفیت نهایی محصول اشاره نمود. به دلیل خاصیت رطوبت گیری بیشتر در هوای عبوری از چرخ دسикنت فرایند خشک کردن در دمای پایین تر و یا زمان کمتر قابل انجام است که این موضوع می‌تواند بر کیفیت محصول تاثیر بگذارد.

پیشنهاد دیگر ترکیب خشک کن میوه با یک فرایند صنعتی دیگر که در طی آن انرژی اتلاف می‌شود است.

از روشی که در این مطالعه استفاده شد می‌توان برای بهینه سازی طراحی کابین خشک کن و همینطور چیدمان سینی‌های داخل خشک کن نیز استفاده کرد تا کیفیت محصول نهایی یکنواخت باشد که نیازمند توزیع یکنواخت جریان هوا و دما در داخل کابین است.

- [1] Ehiem JC, Irtwange SV, Obetta SE. Design and development of an industrial fruit and vegetable dryer. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2009 Aug 31;1(2):44-53.
- [2] Stiling J, Li S, Stroeve P, Thompson J, Mjawa B, Kornbluth K, Barrett DM. Performance evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels. *Energy for sustainable development*. 2012 Jun 1;16(2):224-30.
- [3] Ivanova D, Enimanev K, Andonov K. Energy and economic effectiveness of a fruit and vegetable dryer. *Energy Conversion and Management*. 2003 Mar 1;44(5):763-9.
- [4] Amer BM, Hossain MA, Gottschalk K. Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy conversion and management*. 2010 Apr 1;51(4):813-20.
- [5] Sreekumar A. Techno-economic analysis of a roof-integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables. *Energy Conversion and Management*. 2010 Nov 1;51(11):2230-8.
- [6] Zhang Q, Litchfield JB. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*. 1991 Mar 1;9(2):383-95.
- [7] Bala BK, Mondol MR. Experimental investigation on solar drying of fish using solar tunnel dryer. *Drying technology*. 2001 Feb 28;19(2):427-36.
- [8] Akpınar E, Midilli A, Bicer Y. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy conversion and management*. 2003 Jun 1;44(10):1689-705.
- [9] Chegini GR, Ghobadian B. Spray dryer parameters for fruit juice drying. *World Journal of Agricultural Sciences*. 2007;3(2):230-6.
- [10] Goyal RK, Kingsly AR, Manikantan MR, Ilyas SM. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*. 2007 Mar 1;79(1):176-80.
- [11] Zarein M, Samadi SH, Ghobadian B. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2015 Jan 1;14(1):41-7.
- [12] Pattanayak B, Mohapatra SS, Das HC. Energy and exergy analyses of paddy drying

process in a vertical fluidised bed dryer. *International Journal of Exergy*. 2019;28(2):113-25.

[13] Amanlou Y, Zomorodian A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. *Journal of food engineering*. 2010 Nov 1;101(1):8-15.

[14] Jamil F, Arshad R, Ali MA. Design, fabrication and evaluation of rotary hot-air dryer for the value addition of fruit waste. *Earth Sciences Pakistan*. 2018;2(2):07-11.

[15] Poonia S, Singh AK, Santra P, Jain D. Performance evaluation and cost economics of a low cost solar dryer for ber (*Zizyphus mauritiana*) fruit. *Agricultural Engineering Today*. 2017;41(1):25-30.

[16] Huselstein S, Weinstein SJ, Stevens RJ. Prototype and model of passive tropical fruit dryer utilizing a flexible transpired solar collector. In 2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC) 2016 Oct 13 (pp. 815-816). IEEE.

[17] Efendi A, Nugraha A, Baharta R. Manufacturing of Electrical Dryer Machine for Food and Fruit Products. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 Nov (Vol. 692, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.

[18] Silva DI, Souza GF, Barrozo MA. Heat and mass transfer of fruit residues in a fixed bed dryer: Modeling and product quality. *Drying Technology*. 2019 Jul 27;37(10):1321-7.

[19] Susanti I, Hasanah F, Wijaya H, Heryani S, Hartanto ES. Drying of extracted betacyanin from red dragon fruit (*Hylocereus Costaricensis*) as natural colorant by using spray dryer in various operating condition. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Jul 1 (Vol. 885, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.

[۲۰] آق خانی محمدحسین، عباس پورفرد محمدحسین، بیاتی محمدرضا، مرتضی پور حمید، ساعدی سیدایمان، مقیمی علی. بررسی عملکرد یک خشک کن خورشیدی مجهز به سامانه گردش هوای بسته و محفظه جاذب رطوبت.

[۲۱] فرزانه الهام، رحیمی محمودرضا، مددی اورگانی وحید. مطالعه سینتیک خشک شدن و چروکیدگی یک نمونه زالزالک در یک خشک کن بستر شناور ارتعاشی با کنترل رطوبت هوای ورودی.

[۲۲] مهدیه دوروزی، ساخت و ارزیابی خشک کن خورشیدی مجهز به سامانه فتوولتائیک گرمایی و مایع جاذب رطوبت، دانشگاه شهید باهنر کرمان - دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی - ۱۳۹۵ - [کارشناسی ارشد]

[۲۳] مسعود محمدیان کروی، محمد حسن سعیدی، سیروس آقاجفی، "بررسی تاثیر چرخ دسکنت بر روی عملکرد برج های خنک کننده ترو کاهش دمای آب خروجی از آن"، هفدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، اردیبهشت ۱۳۸۸

[۲۴] مهدی مرادی، سعدی عزیزی، مهرداد نیاکوثری، سعادت کامگار، "سنتیک خشک کردن تکه های فلفل دلمه ای در

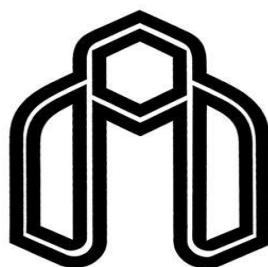
یک خشک کن بستر جهنده"، کنفرانس بین المللی کشاورزی مرسوم و ارگانیک، ۱۳۹۶

[۲۵] بهشته شعبانی، حمید توکلی پور، "مدلسازی ریاضی سینتیک خشک کردن لایه نازک فلفل دلمه ای"، مجله نوآوری در علوم و فناوری غذایی، سال چهارم، شماره چهارم، ۱۳۹۱.

Abstract

This dissertation examines an industrial cabin dryer using natural gas as a source of heat production. Initially, it is assumed that air enters the dryer with relative humidity, and in the next step, the humidity entering the dryer is reduced by the desiccant wheel. The relationships between the desiccant wheel are derived from the work of other researchers and are used here to determine how the velocity, pressure, and humidity counters change after simulating a dryer building. Due to systemic limitations, the results are obtained at two different times, and a comparison is made between fuel consumption when the desiccant wheel is used and when the desiccant wheel is not used that results indicate that the use of the desiccant wheel, reducing humidity of 5% and 7%, respectively, saves 3% and 3.2% in fuel consumption. With the analysis of energy and exergy, it was determined that in case of producing more than 100 tons of product annually and the price of natural gas based on the free price, the payback period will be less than 5 years.

Keywords: dryer, numerical solution, desiccant wheel, economic analysis.



Shahrood University of Technology

**Design and Technical _ Economic Analysis of Fruit
Dryer Equipped with Humidity Control System**

By: Amir GHolinezhad

Supervisors:

Dr. Ahmad Nazari

Dr.Ali Jabbari moghadam

2021