



بررسی و تحلیل عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دو مرحله‌ای

مهدی جعفری وردنجانی*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

کلمات کلیدی

سانتریفیوژ پوشر، تحلیل دینامیک، تحلیل مودال.

جداسازی و فیلتراسیون مکانیکی فازهای جامد و مایع به کمک دستگاه سانتریفیوژ پوشر، عملیاتی متداول در صنایع مختلف به شمار می‌رود. آنچه که در مطالعه حاضر مد نظر است، تحلیل ساختار و عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دو مرحله‌ای است. در این راستا تحلیل این فرآیند در قالب سه فاز تحلیل مودال، تحلیل رفتار ذرات، و تحلیل دینامیک حالت گذرا انجام شده است. نتایج تحلیل مودال نشان داده است که حاشیه ایمنی به دست آمده در زمینه وقوع تشدید برای مجموعه و زیر مجموعه سبد داخلی ناشی از نیروهای اینرسی خطی و دورانی ۴۰٪ بوده است. همچنین بر اساس نتایج تحلیل دینامیک گذرا مدت زمان پایداری رفتار ذرات در حدود ۵.۵ s یا ۶۸٪ مدت زمان تغذیه ذرات، جابجایی حداکثر در نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی حداکثر ۱.۳ mm، و تنش بحرانی وارد شده بر آن در حدود ۷۰ MPa است؛ که به معنای استحکام مکانیکی قابل قبول مجموعه در مقابل تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از عملکرد دستگاه است. آنچه که با توجه به نتایج تحلیل انجام شده می‌توان استنباط نمود، توصیه بر حفظ حرکت دورانی حداکثر (۲۶.۶۸ rad/s) و عدم تغییر قابل توجه نرخ تغذیه ذرات نسبت به مقدار مشخص شده (۰.۵۶ kg/s) می‌باشد.

۱- مقدمه

تحت تأثیر نرخ تغذیه مواد و گردش آنها در طول چرخه کاری قرار می‌گیرد. این پارامترها بر استهلاک و آلودگی صوتی دستگاه نیز تأثیر گذار هستند. مجموعه این موارد ضرورت تحلیل ساختار و عملکرد دینامیکی دستگاه را اثبات می‌نماید.

سانتریفیوژهای کاسه‌ای و لوله‌ای جهت جداسازی یا طبقه‌بندی موثر جامدات ریز استفاده می‌شوند که این امر به دلیل شتاب گریز از مرکز بالای آنها می‌باشد [۳]. در طی فرآیند جداسازی گریز از مرکز، ته‌نشینی و ظهور رسوب‌ها رخ می‌دهد. رفتار رئولوژیکی این رسوب بر شکل آن تأثیرگذار است. با این حال شکل رسوب تأثیر قابل توجهی بر شرایط جریان داخل سانتریفیوژ دارد. این موضوع میزان کارایی و سرعت جداسازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴]. عملکرد سانتریفیوژها در مطالعات ابتدایی بر اساس روش سیگما مورد ارزیابی قرار گرفته است [۵]. در این روش پیچیدگی شرایط آشفتگی جریان گذرا و رسوب‌های رشد کننده نادیده گرفته می‌شود. این امر باعث ایجاد

جداسازی و فیلتراسیون مکانیکی فازهای جامد و مایع، عملیاتی متداول در صنایع به شمار می‌رود. این صنایع شامل صنایع شیمیایی، داروسازی، تصفیه فاضلاب، و صنایع غذایی می‌شود [۱]. در این راستا سانتریفیوژها برای طیف وسیعی از کاربردها استفاده می‌شود که رایج‌ترین کاربرد آنها مربوط به بحث آب‌گیری می‌شود [۲]. دستگاه سانتریفیوژ پوشر^۲ برای آب‌گیری، خشک کردن و جداسازی مداوم مواد (الیاف، کریستال‌ها و پودرها) استفاده می‌شود. مخلوط ورودی از طریق لوله تغذیه وارد سانتریفیوژ می‌شود و هنگامی که به سمت توزیع‌کننده می‌رود به طور یکنواخت در داخل سبد سانتریفیوژ توزیع می‌شود. سپس می‌توان فاز جامد تشکیل شده روی سبد را توسط جت‌های آب شست. در واقع فرآیند آب‌گیری توسط نیروی گریز از مرکز سانتریفیوژ انجام شده، تخلیه فاز جامد به صورت خشک انجام می‌شود. بنابراین، عملکرد دستگاه تحت تأثیر پارامترهایی شامل تعادل دورانی دستگاه حین تغذیه مواد، عملیات آب‌گیری و جداسازی و استحکام ایستا قرار دارد. بنابراین، عملکرد دستگاه به طور قابل توجهی

* نویسنده مسئول: m-jafari@nus.ac.ir

² Pusher centrifuge

مبحث سانتریفیوژهای پوشر دو مرحله‌ای و چند مرحله‌ای جداساز مورد تحلیل قرار گرفته است [۸]. سانتریفیوژهای دو مرحله‌ای از جمله سانتریفیوژهای جداکننده‌ای هستند که تخلیه آنها به صورت مرحله‌ای انجام می‌شود که امکان انجام عملیات پیوسته را دارند. در این سانتریفیوژها تمام مراحل جداسازی، شستشو، خشک کردن، و تخلیه در سرعت نهایی دستگاه قابل انجام است. این سانتریفیوژها علاوه بر طراحی ساختار مناسب، قابلیت استخراج پیوسته مواد، مصرف پائین، ظرفیت بالا، و حفظ رطوبت در مقادیر پائین را دارند. بنابراین از این دستگاه در صنایع شیمیایی بسیاری جهت جداسازی مواد از فازهای ناهمگون و آب‌گیری مخلوط‌های حاوی کریستال یا جامدات فیبری استفاده می‌شود [۹].

در حال حاضر تحقیقات تئوری متفاوتی روی سانتریفیوژهای پوشر دو مرحله‌ای در حال انجام است. البته، پیش‌بینی عملکرد و انجام محاسبات طراحی در این ماشین‌ها به آزمایشات تجربی وابسته است. دلیل اصلی این موضوع پیچیدگی و گوناگونی فرآیندهای جداسازی سانتریفیوژ است. عمدتاً عدم توانایی در تعیین دقیق ابعاد، شکل، و حرکات ذرات به دلیل شرایط نامنظم ایجادشده روی آنها، مسائل ریاضی پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند. این موضوع منجر به دشواری در انجام مطالعات تئوری این فرآیند می‌شود. از طرف دیگر بهینه‌سازی پارامترها صرفاً بر اساس آزمایشات تجربی چندان قابل اعتماد نبوده، هزینه‌بر است. بنابراین جهت تعیین قوانین حاکم بر جریان سیال در فرآیند سانتریفیوژ، مدل‌های ریاضی مناسبی را می‌توان توسعه داد [۱۰].

برای شبیه‌سازی‌های عددی مکانی و زمانی، رویکردی بر اساس روش سریع اولبری فری [۱۱] جهت رسیدن به تعادلی بین دقت فیزیکی مورد نیاز و زمان انجام محاسبات، ابداع شده است. در این روش فاز جامد (ذرات پودر نمک مورد نظر) و فاز مایع به صورت یک فاز مخلوط تقریب زده می‌شوند. بنابراین جهت در نظر گرفتن تأثیر شرایط مختلف این سیال بر رفتار جریان مخلوط مورد نظر، مقدار متوسط ویسکوزیته مکانی و زمانی سیال و اندازه سَط ذرات در نظر گرفته شده است. میدان سرعت $v(\vec{x}, t)$ برای فاز مخلوط به وسیله حل معادلات ناویر-استوکس محاسبه شده است. \vec{x} موقعیت در فضا، و t زمان است. میدان سرعت ذرات $(v_p(\vec{x}, t))$ را می‌توان بر اساس میدان سرعت فاز مخلوط $v(\vec{x}, t)$ و سرعت تنشینی فضایی v_{Bulk} ارزیابی نمود. این

اختلاف‌هایی بین نتایج ارزیابی عملکرد جداسازی در عمل و مباحث تئوری می‌شود [۳].

برخی مطالعات به طور کامل تحلیل شرایط جریان در سانتریفیوژها را بر اساس شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ انجام داده‌اند. در این راستا انواع مختلفی از رویکردها برای شبیه‌سازی جریان‌های چند فاز آشفته مشاهده شده‌اند. رویکردهای مورد استفاده در این زمینه شامل روش‌های استاندارد و توسعه‌یافته CFD توسط محققان می‌شود [۶]. با توجه به تحلیل‌های صورت‌گرفته در زمینه مبحث جداسازی، این موضوع مشخص شده است که بررسی فرآیند جداسازی در سانتریفیوژهای پیوسته و نیمه‌پیوسته، تا حدودی وابسته به شبیه‌سازی شرایط جریان می‌باشد. لازم به ذکر است که استفاده از مدل‌های ساده‌شده جهت بررسی جریان‌های مختلف ذرات و مایعات، به همراه بررسی آثار رسوب‌دهی نیز نتایج مطلوب و مناسبی را ارائه داده‌اند [۷]. از آنجائیکه جریان‌های پیچیده چند فاز در سانتریفیوژها اتفاق می‌افتد، نحوه چیدمان قطعات دستگاه سانتریفیوژ، پارامترهای تنظیمی فرآیند، و ویژگی‌های مواد بر الگوی جریان تأثیر می‌گذارد. گرچه جهت طراحی یک سانتریفیوژ با فرآیند جداسازی مکانیکی، نیاز به شناخت شرایط جریان می‌باشد، لیکن بررسی تجربی جریان درون سانتریفیوژها بسیار پیچیده است. از این رو CFD جایگزین مناسبی نسبت به آزمایش عملی می‌باشد. در این راستا بورگر و همکاران [۷] فرآیند ایجاد رسوب را به کمک یک رویکرد ساده در سانتریفیوژها بررسی کردند. در این تحلیل رفتار تنشینی مواد تنها با تابع چگالی شار توصیف شده است. نتایج عددی مطابقت خوبی را با نتایج آزمایشات تجربی یک فرآیند سانتریفیوژ نشان داده است.

رومانی و همکاران [۳] نیز فرآیند رسوب را در یک سانتریفیوژ کاسه‌ای با رویکرد اولبر-لاگرانژی^۲ بررسی کردند. جریان هر سه فاز موجود در سانتریفیوژها به صورت مکانی و زمانی به طور جداگانه حل شد که نیاز به صرف زمان طولانی جهت انجام محاسبات داشته است. بنابراین ناچاراً مدت زمان کوتاهی جهت تحلیل این فرآیند در نظر گرفته شد. به طور کلی تمام روش‌های به کار رفته در مطالعات پیشین موجود در تحقیقات گذشته، مصالحه‌ای را بین دقت فیزیکی نتایج و زمان انجام محاسبات در نظر گرفته‌اند، که امری طبیعی به شمار می‌رود.

گرچه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه سانتریفیوژهای کاسه‌ای و لوله‌ای، و قوانین سیال حاکم بر آنها دیده می‌شود، لیکن به ندرت

² Euler-Lagrange

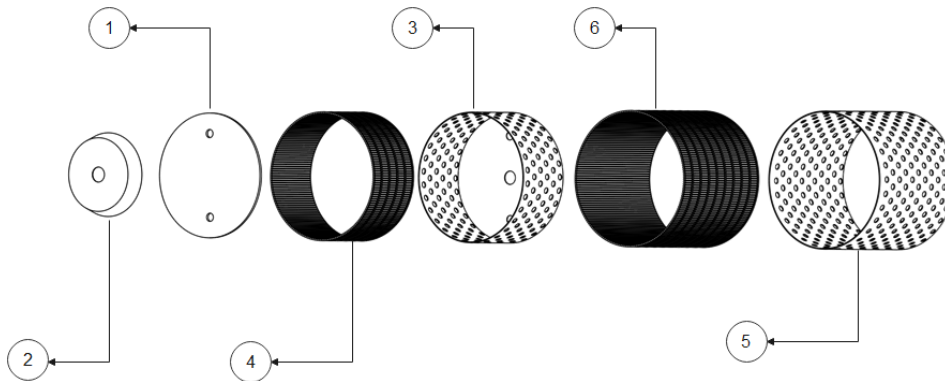
¹ Computational fluid dynamics (CFD)

آنچه که در طرح حاضر مد نظر است، تحلیل ساختار و عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دو مرحله‌ای است. در این راستا پس از مدل‌سازی انجام شده جهت ایجاد هندسه اعضای اصلی شامل زیرمجموعه‌های سبد داخلی، سبد خارجی، و محفظه تغذیه، مبحث شبیه‌سازی در سه فاز تحلیل مودال^۲، تحلیل رفتار ذرات، و تحلیل دینامیک حالت گذرا^۳ انجام شده است. دلیل جداسازی دو بخش تحلیل رفتار ذرات و رفتار دینامیک حالت گذرا، ملاحظات انجام‌شده در زمینه محاسبات المان محدود و دستیابی به دقت مورد نیاز است. بخش‌هایی از نتایج تحلیل المان محدود با نتایج تجربی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است.

کار باعث کاهش زمان حل نسبت به روش کلاسیک اویلری^۱ می‌شود. در همین راستا جهت لحاظ نمودن رفتارهای مختلف فاز مخلوط از یک ویسکوزیته موقت فضایی $(\eta_{MP}(\vec{x}, t))$ استفاده شده است:

$$\eta_{MP}(\vec{x}, t) = A \cdot \eta_{Susp}(\vec{x}, t) + B \cdot \eta_{Sed}(\vec{x}, t) \quad (1)$$

در رابطه فوق، $\eta_{MP}(\vec{x}, t)$ بر اساس ویسکوزیته مخلوط $(\eta_{Susp}(\vec{x}, t))$ و ویسکوزیته مجازی مواد ته‌نشین $(\eta_{Sed}(\vec{x}, t))$ محاسبه شده است. A ضریب مخلوط و B ضریب فضایی ته‌نشین است. مقدار A و B بسته به نوع فاز با توجه به شرط مخلوط بودن یا ته‌نشین بودن فاز بین مقدار 0 و 1 تغییر می‌کنند [۱۲]. گرچه در این مطالعه از ضرائب جهت ساده‌سازی فرآیند تحلیل مخلوط و بررسی رفتار آن استفاده شده است، راه‌کار ارائه شده جهت پیشبرد اهداف تحلیل و شبیه‌سازی قابل تأمل و حتی کاربردی است.



شکل ۱: نمای انفجاری مدل ۳ بعدی ایجاد شده جهت تحلیل المان محدود

فهرست قطعات موجود در مدل ایجاد شده شکل ۱ را نشان می‌دهد.

جدول ۱: فهرست قطعات مدل ۳ بعدی ایجاد شده

مجموعه کامل			
شماره	قطعه	نوع	تعداد
-	زیرمجموعه سبد ۱	مونتاژ	۱
-	زیرمجموعه سبد ۲	مونتاژ	۱
۱	دیسک دوار	قطعه	۱
۲	پوسته	قطعه	۱
زیرمجموعه سبد ۱			
۳	سبد ۱	قطعه	۱
۴	شبکه سیمی ۱	قطعه	۱
زیرمجموعه سبد ۲			
۵	سبد ۲	قطعه	۱
۶	شبکه سیمی ۲	قطعه	۱

³ Transient dynamic analysis

¹ Eulerian method

² Modal analysis

۲- مواد و روش‌ها

روش مدل‌سازی سه بعدی و روند شبیه‌سازی انجام شده در اینجا توضیح داده شده است.

۲-۱- مدل ۳ بعدی

نمای انفجاری مجموعه مورد نظر (شکل ۱) با طراحی زیرمجموعه سبد داخلی، زیرمجموعه سبد خارجی، دیسک دوآر، و پوسته تغذیه طبق هندسه سانتریفیوژ پوشر مدل Ferrum-P-32 ایجاد شد.

۲-۲- شبیه‌سازی

تحلیل دینامیک مورد نظر در دو مقوله مجزای تحلیل مودال و تحلیل دینامیک گذرا عضو مورد نظر انجام شده است.

۲-۲-۱- تحلیل مودال

مراحل کار جهت تعریف شرایط مرزی و اتصالات برای مجموعه کامل و اعضا به صورت زیر قابل تعریف است.

۲-۲-۱-۱- مجموعه کامل

شکل ۲-الف مدل به کار رفته را جهت انجام تحلیل مودال نمایش می‌دهد. جهت انجام تحلیل مودال در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، شرایط مرزی و اتصالات روی مجموعه و اعضاء طبق شکل ۲-ب اعمال شد. جنس به کار گرفته شده برای اعضا فولاد زنگ

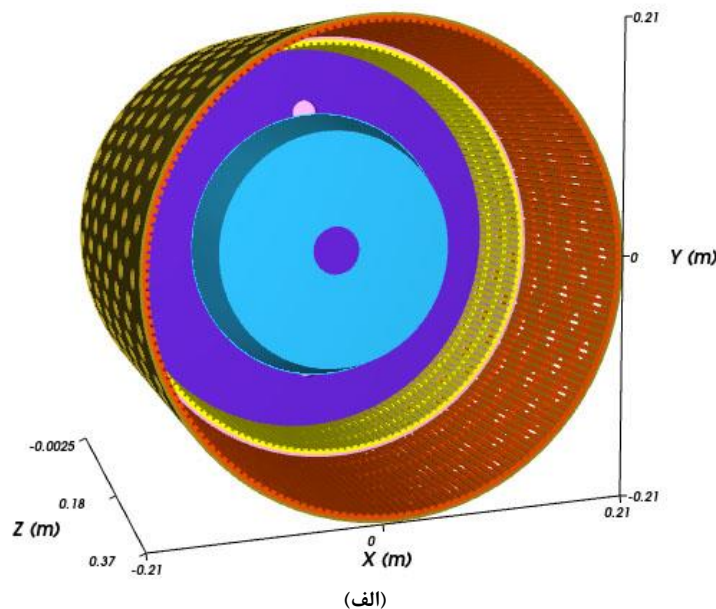
نزن با کد استاندارد AISI 304 در نظر گرفته شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۲ و خواص فیزیکی و مکانیکی مهم آن در جدول ۳ اشاره شده است.

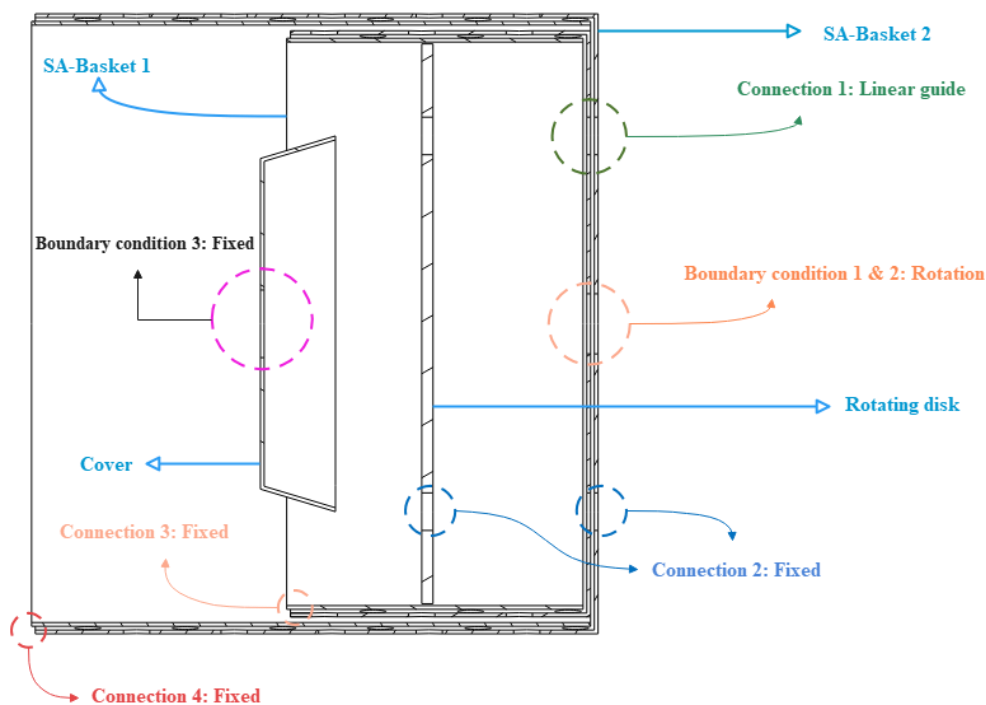
جدول ۲: ترکیب شیمیایی فولاد AISI 304 به کار رفته در اجزاء [۱۳].

عنصر	مقدار (%)	
C	0	0.08
Cr	18	20
Fe	65.8	74
Mn	0	2
Ni	8	11
P	0	0.045
S	0	0.03
Si	0	1

جدول ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی به کار رفته برای اجزاء مجموعه [۱۳]

پارامتر	مقدار
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	7960
مدول یانگ (MPa)	197
تنش تسلیم (MPa)	258
تنش کششی (MPa)	565
ضریب پواسون	0.27
سختی (HB)	175
استحکام خستگی (در 10^7 دور) (MPa)	241





(ب)

شکل ۲: تصویر مدل به کار رفته جهت تحلیل مودال؛ (الف) مدل ۳ بعدی مجموعه وارد شده؛ (ب) نمای برش خورده مدل به همراه نمایش اتصالات و شرایط مرزی (جهت سادگی در نمایش، شبکه‌های سیمی به صورت ساده نمایش داده شده‌اند).

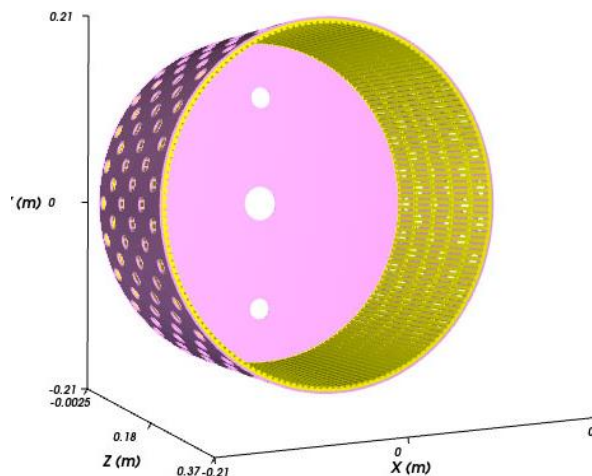
۲-۱-۲-۲- زیرمجموعه سبد داخلی

تصویر مدل وارد شده از زیرمجموعه سبد داخلی (شامل شبکه سیمی و سبد مشبک) در شکل ۳ مشاهده می‌شود. این زیرمجموعه به صورت جداگانه تحت تحلیل مودال قرار گرفته است.

۲-۲-۲- تحلیل رفتار دینامیک

در ابتدای امر روش‌های متفاوت موجود از جهت قابلیت انجام و دقت مورد ارزیابی قرار گرفتند تا گزینه مناسب انتخاب شود. از آنجائیکه مواد ورودی و خروجی دستگاه به صورت مواد دانه‌ای مجزاً (پودر) می‌باشد، موارد زیر را می‌توان به عنوان رویکردهای مختلف جهت انجام چنین تحلیلی اشاره نمود:

- تحلیل به صورت دینامیک انعطاف‌پذیر^۱ به همراه تحلیل دینامیک سیالاتی^۲: این روش یکی از پیچیده‌ترین و زمان‌برترین رویکردهایی است که می‌توان جهت شبیه‌سازی چنین مسأله‌ای به آن پرداخت. گرچه از لحاظ فرضیات می‌توان گفت که چنین روشی به واقعیت نزدیک‌تر است، لیکن دینامیک انعطاف‌پذیر عضو مورد نظر با توجه به هندسه نسبتاً پیچیده مشبک، و علاوه بر آن محاسبه هم‌زمان سیالاتی جهت بررسی رفتار پودر نمک، حل مسأله را تقریباً غیر ممکن می‌سازد.



شکل ۳: مدل زیرمجموعه سبد داخلی

² Computational fluid dynamics (CFD)

¹ Multi flexible body dynamics (MFBD)

- استخراج تابع بارگذاری (توزیع تنش)
- تحلیل دینامیک حالت گذرا
- استخراج خروجی‌های مکانیکی شامل توزیع تنش و کرنش روی عضو مورد نظر

۲-۲-۱- شبیه‌سازی المان گسسته ذرات

جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیک پودر و ذرات تغذیه شونده، از نرم‌افزار EDEM Rocky به صورت تحلیل المان گسسته ذرات استفاده شد. مراحل کار به طور اجمالی در زیر تشریح شده است.

• مدل ۳ بعدی

شکل ۲-الف مجموعه وارد شده را جهت شبیه‌سازی رفتار ذرات در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

• تغذیه کننده ذرات

منفذ ورودی تغذیه‌کننده، با قطری برابر با قطر پوسته بخش تغذیه‌کننده در نزدیکی سوراخ مرکزی تعریف شده است (شکل ۲-الف). جدول ۴ مشخصات اعمال شده در نرم‌افزار را برای ورودی تغذیه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که غلظت ذرات در سیال آب ۱۸٪ و زمان تغذیه از ابتدای شبیه‌سازی تا زمان ۸ s در نظر گرفته شده است.

- تحلیل به صورت دینامیک انعطاف‌پذیر به صورت مجزا نسبت به تحلیل دینامیک ذرات المان گسسته^۱: در این روش یک بار عمل شبیه‌سازی به صورت دینامیک اجسام صلب^۲ جهت بررسی رفتار دینامیکی ذرات انجام می‌شود. به این ترتیب میزان تماس، توزیع فشار، و تأثیر بار تصادفی ناشی از ذرات روی عضو مورد نظر به دست می‌آید. بنابراین می‌توان رفتار بار نامتعادل دینامیک ناشی از ذرات را استخراج نمود و از آن جهت یافتن تابع اعمال بار این ذرات روی عضو مورد نظر استفاده کرد. البته باید به این نکته توجه نمود که این تابع بارگذاری، وابسته به زمان و موقعیت محیطی در داخل عضو است. همچنین لازم به ذکر است که مدت زمان پایداری رفتار ذرات در تحلیل دینامیک ذرات المان گسسته به دست می‌آید. به عبارت دیگر از زمانی که عضو از حالت سکون شروع به حرکت می‌کند تا زمانی که به سرعت ثابت می‌رسد ملاک قطعی جهت ثبات رفتار این تابع نخواهد بود؛ بلکه باید مدت زمان ثبات رفتار بار را با توجه به تحلیل دینامیکی و نرخ خروج ذرات به دست آورد.

با توجه به رویکرد دوم می‌توان مراحل بحث تحلیل را به این صورت عنوان نمود:

- شبیه‌سازی المان گسسته ذرات

جدول ۴: مشخصات ذرات تغذیه‌شونده در داخل محفظه در داخل نرم‌افزار

پارامتر	جرم ذره (kg)	حجم ذره (m ³)	چگالی ذره (kg/m ³)	دبی ورودی ذرات (جرمی) (kg/s)	دبی ورودی ذرات (حجمی) (m ³ /s)
مقدار	424 × 10 ⁻⁶	1.96 × 10 ⁻⁷	2163	0.56	2.6 × 10 ⁻⁴

• تعریف حرکات

حرکات دورانی و نوسان مورد نیاز طبق مقادیر بدست‌آمده از عملکرد واقعی دستگاه، روی دیسک، زیر مجموعه سبد داخلی، و زیر مجموعه سبد خارجی اعمال شد. جدول ۵ مقادیر اعمال شده را نشان می‌دهد.

جدول ۵: مقادیر پارامترهای سینماتیک اعمال شده در داخل نرم‌افزار روی اجزا

عضو	سرعت دورانی (rad/s)	فرکانس نوسان (Hz)	دامنه حرکت (m)
دیسک دوآر	36.65	.	.
پوسته بخش تغذیه	.	.	.
زیرمجموعه سبد داخلی	36.65	0.5	0.025
زیرمجموعه سبد خارجی	36.65	.	.

² Multi body dynamics (MBD)

¹ Discrete element method (DEM)

• نرخ ته‌نشینی ذرات

که در آن η_1 ضریب اصلاحی سرعت ته‌نشینی، x_s نسبت جامد (پودر) بر مخلوط، d قطر متوسط ذرات، ρ_l چگالی سیال، ρ_s چگالی جامد (پودر)، و ω سرعت زاویه‌ای سیال در شعاع r است. این سرعت (ω) را می‌توان به کمک رابطه زیر محاسبه نمود [۶]:

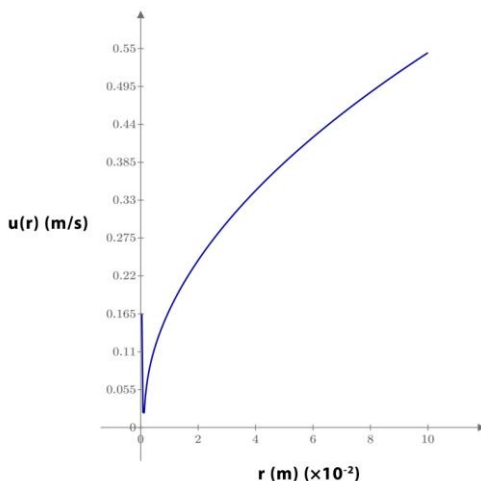
$$\omega(r) = \omega_0 \left[1 - \left(\beta \times \frac{Q}{v^{0.5} \cdot r_1} \right) \cdot \frac{\left(\frac{r_2}{r} \right)^2 - 1}{\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1} \right] \quad (۴)$$

که در آن ω_0 سرعت زاویه‌ای سبد، r_1 شعاع سطح آزاد (سطحی از سیال که در داخل سبد در حال دوران است و با هوا در تماس است، و دیده می‌شود)، r_2 شعاع دیواره سبد (شبکه سیمی)، Q دبی ورودی مخلوط سیال و پودر، v ویسکوزیته سینماتیک سیال، و $\beta = 2.6 \times 10^{-7} \frac{\sqrt{s}}{m}$ است. مقادیر در نظر گرفته شده برای رابطه (۲) تا (۴) در جدول ۶ اشاره شده است.

جدول ۶: مقادیر در نظر گرفته شده برای رابطه (۲) تا (۴) جهت محاسبه نرخ ته‌نشینی ذرات

پارامتر	d (m)	ρ_s ($\frac{kg}{m^3}$)	ρ_l ($\frac{kg}{m^3}$)	x_s	ω_0 ($\frac{rad}{s}$)	r_1 (m)	r_2 (m)	v ($\frac{m^2}{s}$)	Q ($\frac{m^3}{s}$)
مقدار	0.0072	2163	1000	0.2	36.65	0.18	0.1925	10^{-6}	0.002513

نرم‌افزار تحلیل رفتار ذرات با استخراج نمودارهای میانگین تنش-زمان انجام شد (شکل ۵).



شکل ۴: نرخ ته‌نشینی ذرات ($u(r)$) در داخل محیط سبد داخلی (شبکه سیمی) نسبت به شعاع (r)

جهت لحاظ نمودن پدیده ته‌نشینی ذرات ناشی از نیروی گریز از مرکز در سیال جهت بررسی رفتار ذرات طی فرآیند شبیه‌سازی و تبدیل آنها به توده فیلتر شده (کیک) از نتایج آزمایشات رینولد و سوکولوف^۱ [۶] استفاده شد. طبق نتایج این آزمایشات، سرعت ته‌نشینی (u) را می‌توان در شعاع r یک ناحیه متلاطم بر حسب m^3/s به صورت زیر نمایش داد:

$$u(r) = 1.75 \eta_1 \left[\frac{d\omega^2 r (\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} \right]^{0.5} \quad (۲)$$

که در آن:

$$\eta_1 = (1 - x_s)^{5.5} \quad (۳)$$

شکل ۴ نرخ ته‌نشینی ذرات ($u(r)$) در داخل محیط سبد داخلی (شبکه سیمی) نسبت به شعاع (r) نشان می‌دهد. همچنین با توجه به رابطه (۲)، تغییرات سرعت برای شعاع سطح آزاد (r_1) و حداکثر (r_2) به صورت $u(r_1) = 0.73 \frac{m}{s}$ و $u(r_2) = 0.755 \frac{m}{s}$ بدست می‌آید که نشان‌دهنده تغییرات اندک این پارامتر در راستای شعاع است. بنابراین تغییرات بدست آمده و نرخ ته‌نشینی ذرات تأثیر اندکی روی تغییرات بار و عدم تعادل رفتار آن طی فرآیند دارد و قابل چشم‌پوشی است. این موضوع در مطالعات اخیر نیز قابل مشاهده است [۱۴، ۱۵].

• استخراج تابع بارگذاری (توزیع تنش)

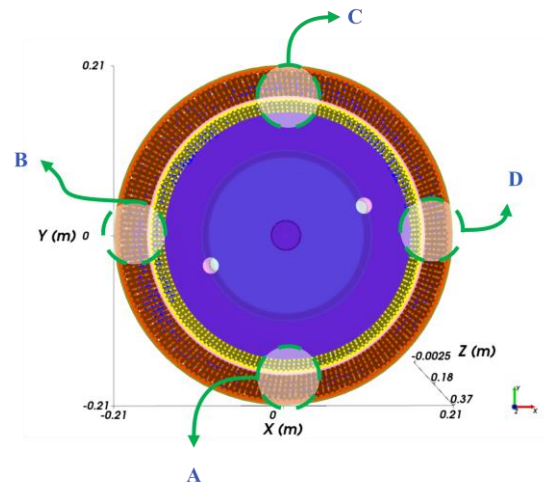
گرچه نقاط تماس طی فرآیند شبیه‌سازی متغیر است، لیکن انتخاب نقاط حساس جهت بررسی تماس ایجادشده و استخراج توزیع تنش متغیر مناسب در مراحل بعدی شبیه‌سازی اهمیت دارد. جهت استخراج بارگذاری زمانی متغیر از نقاط موجود در این محدوده استفاده شده است. بنابراین استخراج مقادیر توزیع تنش به کمک تعریف محدوده بارزسی^۲ ۶ وجهی در نقاط A تا D، به صورت محیطی و طولی در

² Inspector cells (cubes)

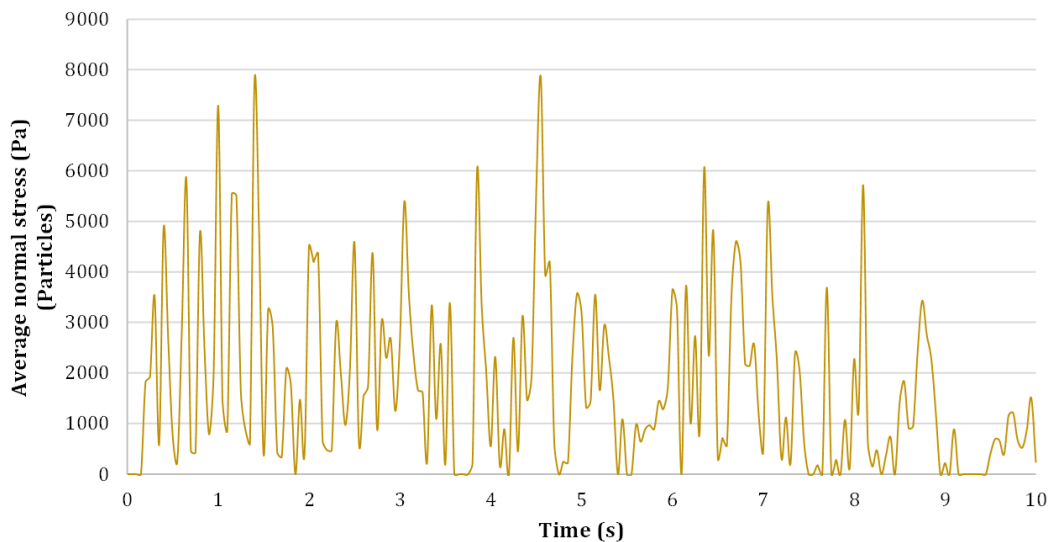
¹ Reynold and Sokolov

لازم به ذکر است که انتخاب این نقاط با توجه به هندسه دوآر و حرکت دورانی مکانیزم انتخاب شده است. می‌توان گفت که نقاط A و C در دو انتهای متقابل از جهت اعمال فشار وزن ذرات قرار گرفته‌اند. به این معنا که هر دو نقطه از جهت نیروی گریز از مرکز، تحت تنش قرار می‌گیرند، در حالیکه نقطه A علاوه بر این نیرو، متحمل نیروی وزن نیز خواهد بود. همچنین نقاط B و D در منتهی الیه شرایط مرزی افقی قرار دارند که بنابراین یکی از نقاط حدی در این تحلیل محسوب می‌شود.

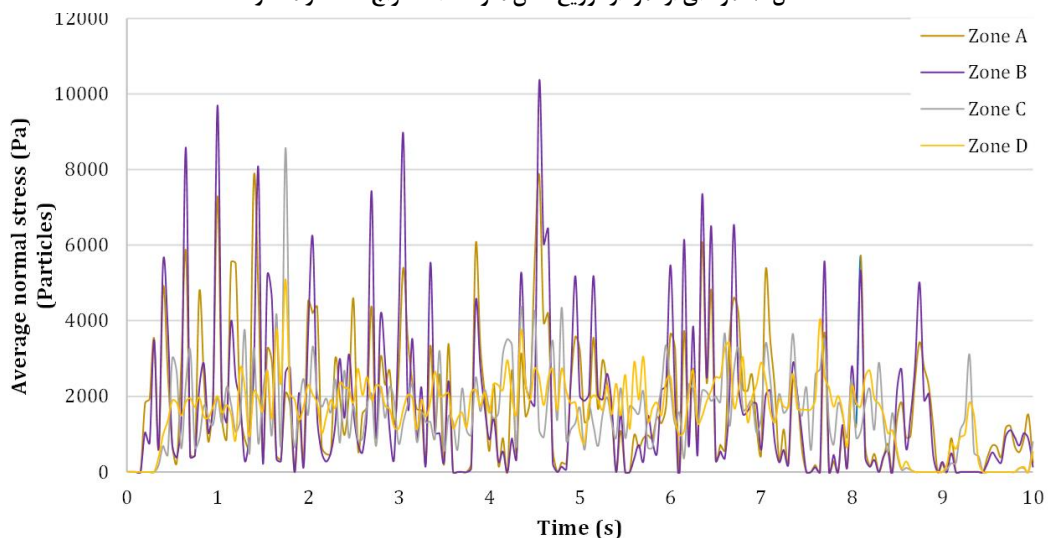
شکل ۶ نمودار تغییرات تنش قائم اعمال شده بر ناحیه A را به عنوان نمونه نمایش می‌دهد. همانطور که نمودار نشان می‌دهد، تغییرات مقدار بار در محدوده مشخصی (بین ۰ تا ۵۰۰۰ Pa) تکرار شده است.



شکل ۵: نقاط بازرسی تعریف‌شده در نرم‌افزار جهت استخراج نمودار توزیع تنش متوسط بر حسب زمان (جهت سادگی در نمایش، پوسته بخش تغذیه مخفی شده است).



شکل ۶: نمونه‌ای از نمودار توزیع تنش متوسط استخراج شده در محدوده A



شکل ۷: تغییرات تنش اعمال شده روی نواحی A تا D در داخل زیرمجموعه سبد داخلی

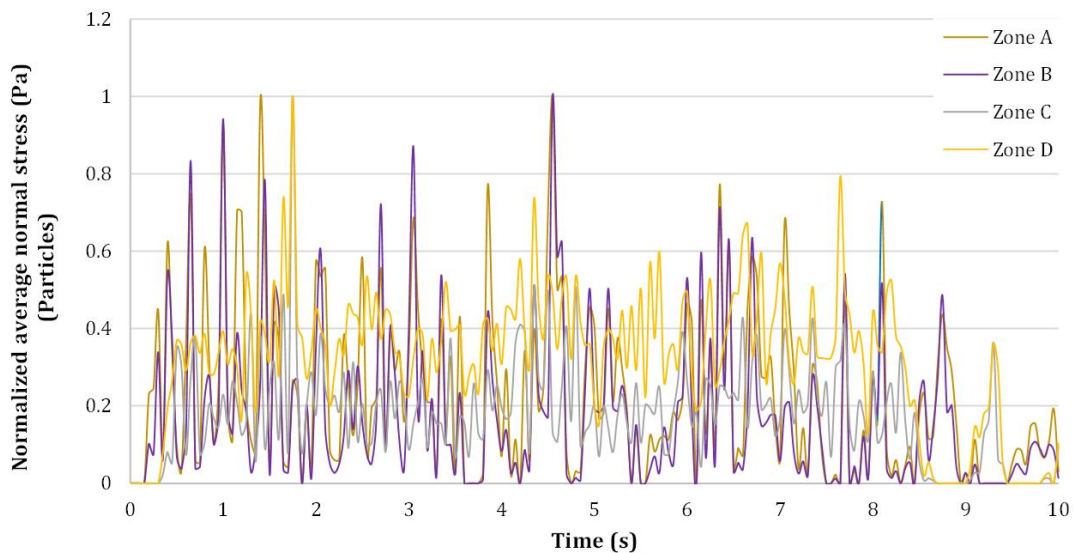
ابتدا مقادیر توزیع تنش هر ۴ ناحیه طبق شکل ۷ در طول مدت انجام شبیه‌سازی استخراج شد.

• محاسبه مقادیر نرمالیزه تغییرات بار

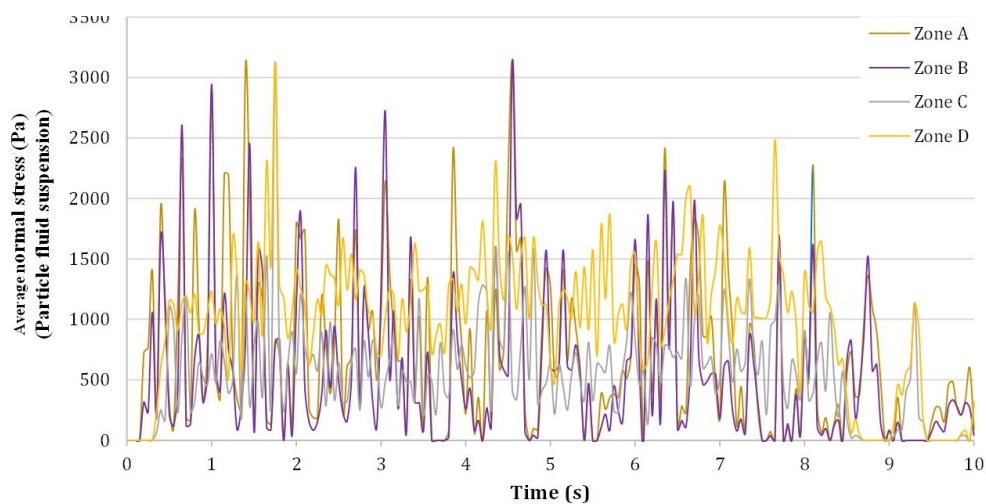
در این مرحله تابع نرمالیزه میانگین تغییرات بار در بازه بین ۰ تا ۱، با در نظر گرفتن مقادیر بیشینه و کمینه (۰) در بازه تغییرات مورد نظر طبق شکل ۸ بدست آمد.

مقادیر بدست آمده از نواحی A تا D به صورت جدول تنش-زمان استخراج شده است و جهت تحلیل دینامیک حالت گذرا، به صورت غیر مستقیم به عنوان ضریب تابع تنش وابسته به زمان در سطح داخلی سبد داخلی اعمال شده است. جهت انجام این کار مراحل زیر طی شد.

• استخراج مقادیر توزیع تنش هر ناحیه



شکل ۸: مقادیر نرمالیزه میانگین تغییرات تنش اعمال شده روی نواحی A تا D در داخل زیرمجموعه سبد داخلی

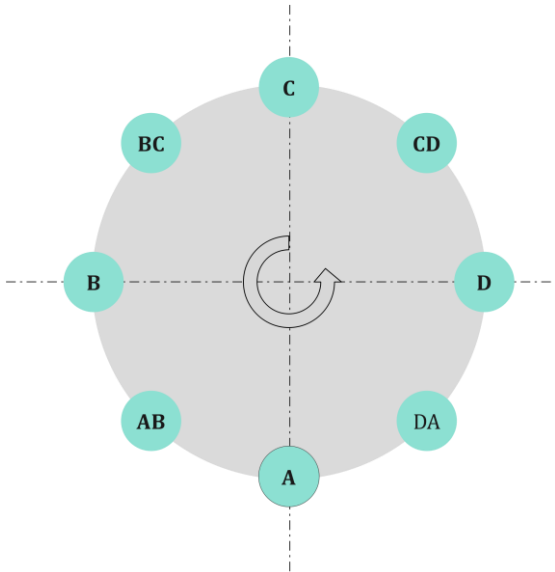


شکل ۹: مقدار تنش بر حسب زمان ناشی از مخلوط سیال و ذرات جهت اعمال در داخل زیرمجموعه سبد داخلی جهت تحلیل رفتار دینامیک در حالت گذرا

جدول ۷: مقادیر در نظر گرفته شده برای رابطه (۵) جهت محاسبه تنش (فشار) ناشی از مخلوط

r_1 (m)	R (m)	ω ($\frac{rad}{s}$)	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	پارامتر
0.18	0.1925	36.65	1000	مقدار

مقادیر لحاظ نمود. جهت دستیابی به این هدف، مقدار نرمالیزه توزیع بار هر ناحیه در نمودار شکل ۹ ضرب شده است و حاصل ضرب آن به عنوان تابع زمانی مورد نیاز جهت اعمال در تحلیل دینامیک حالت گذرا در نظر گرفته شده است. همچنین جهت افزایش دقت تحلیل در مرحله تحلیل دینامیک گذرا، نواحی مابین ناحیه‌های ۴ گانه، در نظر گرفته شده است و مقادیر آنها با انجام میان‌یابی محاسبه شده است. شکل ۱۰ چیدمان نهایی نواحی A تا D و نواحی میان‌یابی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: تصویر شماتیک چیدمان نواحی A تا D و نواحی میان‌یابی شده (AB تا DA)

• محاسبه تابع بارگذاری مخلوط

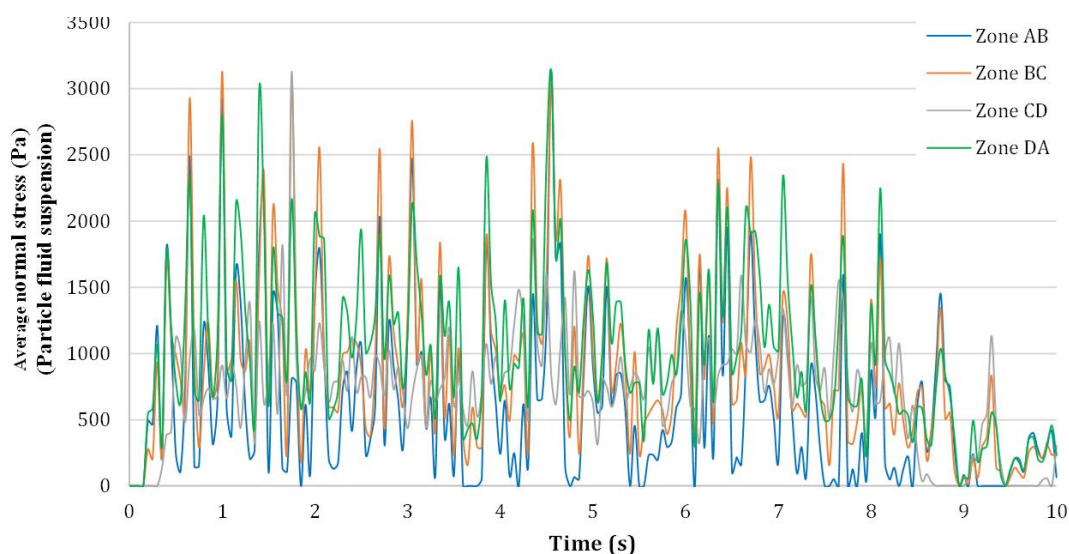
از آنجائیکه ذرات پودر به صورت مخلوط با سیال در داخل مجموعه تغذیه می‌شوند، توزیع فشار نهایی ترکیبی از فشار ایجاد شده ناشی از سیال و ذرات خواهد بود. به این دلیل توزیع تنش نهایی به صورت حاصلضرب مقادیر نرمالیزه تنش ناشی از ذرات در فشار هیدرولیک سانتریفیوژ در نظر گرفته شده است. فشار هیدرولیک ایجاد شده ناشی از سیال، روی دیواره سبد را می‌توان از طریق رابطه زیر محاسبه نمود [۱۶]:

$$p_c = \rho \omega^2 \int_{r_1}^R r dr = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (R^2 - r_1^2) \quad (5)$$

که در آن p_c فشار هیدرولیک سانتریفیوژ، ρ چگالی سیال، ω سرعت دورانی سبد، r شعاع، R شعاع سبد، و r_1 شعاع سطح آزاد سیال است. منظور از سطح آزاد، سطحی از مخلوط سیال و ذرات است که با هوا تماس دارد. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای فوق در جدول ۷ اشاره شده است.

بنابراین توزیع تنش (فشار) ناشی از مخلوط سیال و ذرات، جهت اعمال در بخش تحلیل دینامیک گذرا به صورت شکل ۹ در نظر گرفته شده است.

از آنجائیکه نمودار بدست آمده در شکل ۹، توزیع فشار را در هر زمان به طور یکنواخت در محیط داخلی فرض می‌کند، عدم تعادل در بارگذاری در موقعیت‌های زاویه مختلف لحاظ نمی‌شود. بنابراین نیاز است که به نوعی این عدم تعادل در بارگذاری نواحی مختلف در نظر گرفته شود. در واقع باید به نوعی میزان اختلاف بار بین نواحی را در



شکل ۱۱: مقادیر محاسبه شده تنش مخلوط سیال و ذرات برای نواحی میان‌یابی شده AB تا DA

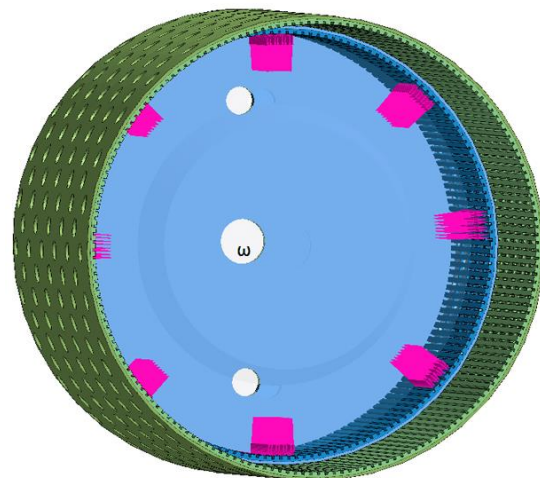
شکل ۱۱ نمودار مقادیر توزیع تنش نهایی محاسبه شده را برای نواحی میان‌یابی شده AB تا DA نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- تحلیل دینامیک حالت گذرا

مجموعه وارد شده در نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیک حالت گذار در شکل ۲-الف نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که شرایط مرزی و اتصالات مشابه آنچه که در بخش تحلیل مودال مطرح شد (شکل ۲-ب) انجام شده است، لیکن پارامترهای سینماتیک و دینامیک طبق جدول ۵ تعریف شده است.

جهت اعمال توزیع تنش دینامیک استخراج شده از بخش تحلیل رفتار ذرات توابع توزیع تنش زمانی به صورت توابع جدولی، در نواحی A تا D تعریف شد. بارگذاری متغیر مذکور برای سایر نواحی AB تا DA به طریق مشابه تعریف شد.

جهت تعریف دوران و اینرسی ناشی از آن روی مجموعه با سرعت زاویه‌ای مطلوب (جدول ۵)، سرعت زاویه‌ای برای کل مجموعه تعریف شد. همچنین جهت تعریف حرکت رفت و برگشتی زیرمجموعه سبد داخلی با فرکانس مورد نظر (جدول ۵)، حرکت متناوب سینوسی روی زیرمجموعه سبد داخلی در نظر گرفته شد. شکل ۱۲ مجموعه آماده شده را به همراه بارگذاری‌ها و حرکات اعمال شده نمایش می‌دهد.



شکل ۱۲: مجموعه با تعریف بارگذاری مورد نظر و حرکت متناوب زیر مجموعه داخلی (جهت نمایش وجوه داخلی، بخش تغذیه (دیسک دوآر و پوسته) مخفی‌سازی شده است).

۳- نتایج و بحث

نتایج تجربی در محدوده مقادیر نیرو و جابجایی نسبی بر اساس مطالعات قبلی انجام شده در این زمینه مورد اعتبارسنجی قرار گرفت [۲۰-۱۷]. با توجه به مقادیر به دست آمده در این مطالعات، مقدار

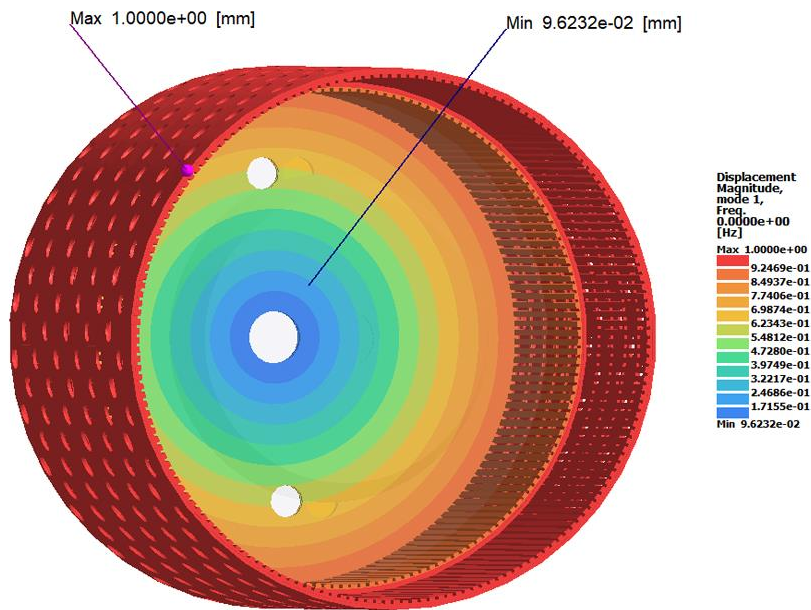
متوسط نیروی اندازه‌گیری شده در اثر تماس ذرات با سطوح داخلی سبد حدود ۹٪ متفاوت بوده است. همچنین تفاوت میانگین مقدار جابجایی نسبی به دست آمده در آزمون عملی نسبت به نتایج به دست آمده در اینجا حدود ۴٪ بود. دلایل این پراکندگی بین مقادیر تجربی و شبیه‌سازی را می‌توان به عواملی مانند ساده‌سازی مفروضات اعمال شده در هندسه، دقت اندازه‌گیری در دینامومترها و کرنش‌سنج‌ها و ساده‌سازی فرضیات در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی مرتبط دانست.

۳-۱- تحلیل مودال

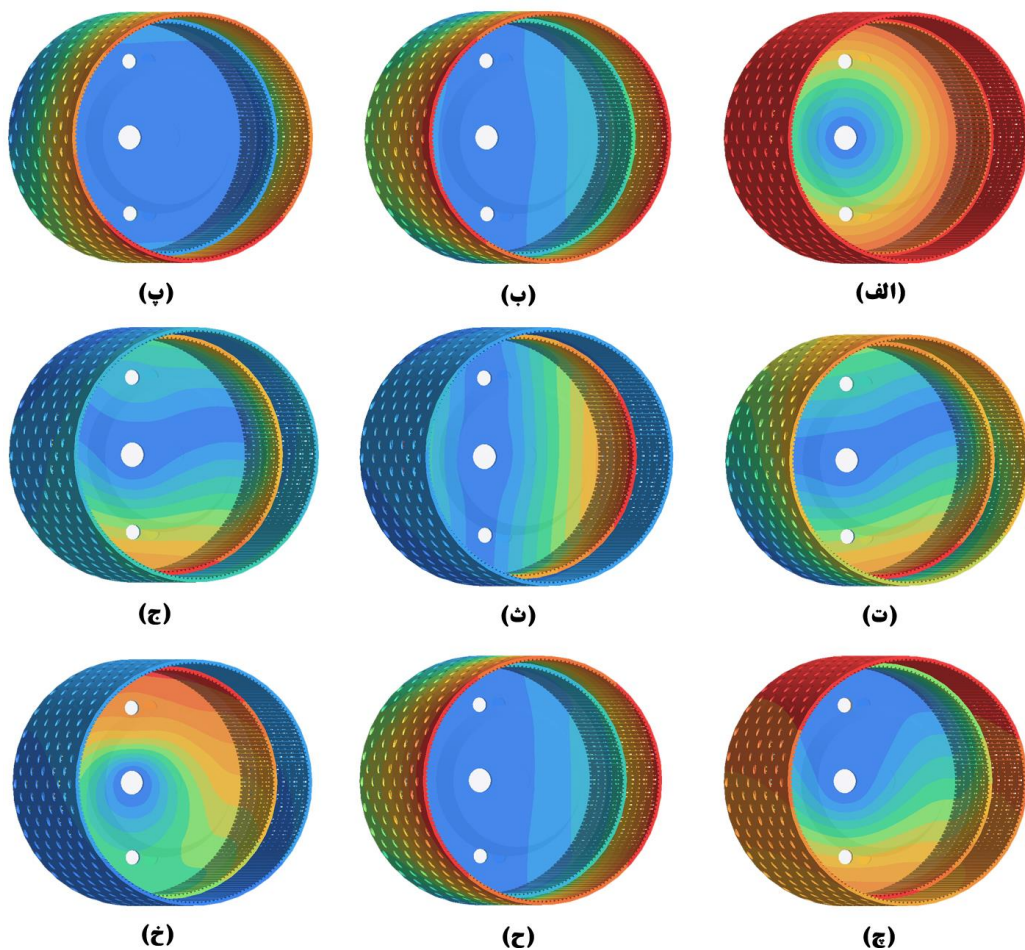
خروجی‌های بدست آمده در این بخش شامل نمایش نسبت جابجایی‌های ایجاد شده در اعضاء و محاسبه فرکانس طبیعی آنها می‌باشد. در اینجا جهت تفسیر نتایج تحلیل مودال انجام شده ابتدا فرکانس‌های طبیعی مجموعه و زیرمجموعه سبد داخلی با فرکانس ارتعاش کاری معمول دستگاه مقایسه شده است. سپس پدیده تشدید برای مود بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از مود بحرانی مودی است که در آن بیشترین جابجایی رخ می‌دهد. همچنین مقایسه‌ای بین فرکانس طبیعی مجموعه و زیرمجموعه سبد داخلی انجام شده است.

شکل ۱۳ میزان جابجایی بیشینه را در مود اول تحلیل مودال انجام شده نشان می‌دهد. نتیجه بدست آمده برای تمام مودها به صورت اجمالی در شکل ۱۴ ارائه شده است. مقادیر فرکانس طبیعی برای شکل ۱۴ در جدول ۸ اشاره شده است.

لازم به ذکر است که با توجه به سرعت دورانی دستگاه طبق جدول ۵ (۳۶۶۵ rad/s)، می‌توان به این نتیجه دست یافت که فرکانس ارتعاش معمول کاری دستگاه می‌تواند ۵.۸۳ Hz است. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۱۴ و جدول ۸ فرکانس‌های طبیعی مدها از فرکانس ارتعاش کاری معمول دستگاه متفاوت است. بنابراین احتمال بروز پدیده تشدید برای مجموعه قابل چشم‌پوشی است. آنچه که در اینجا از اهمیت بالاتری برخوردار است، اختلاف نسبتاً کم مقدار فرکانس ارتعاشی دستگاه و فرکانس طبیعی در مود ارتعاشی دوم (شکل ۱۴-ب)) با مقدار ۸.۱۵ Hz طبق جدول ۸ است. گرچه تفاضل این دو مقدار احتمال بروز پدیده تشدید را به صورت قابل توجهی افزایش نمی‌دهد، لیکن توجه به آن هائذ اهمیت است و باید در دستورالعمل استفاده از دستگاه مد نظر قرار گیرد.



شکل ۱۳ نتیجه بدست آمده از تحلیل مودال انجام شده روی مجموعه در ۱ در قالب کانتور رنگی جابجایی بیشینه نسبی



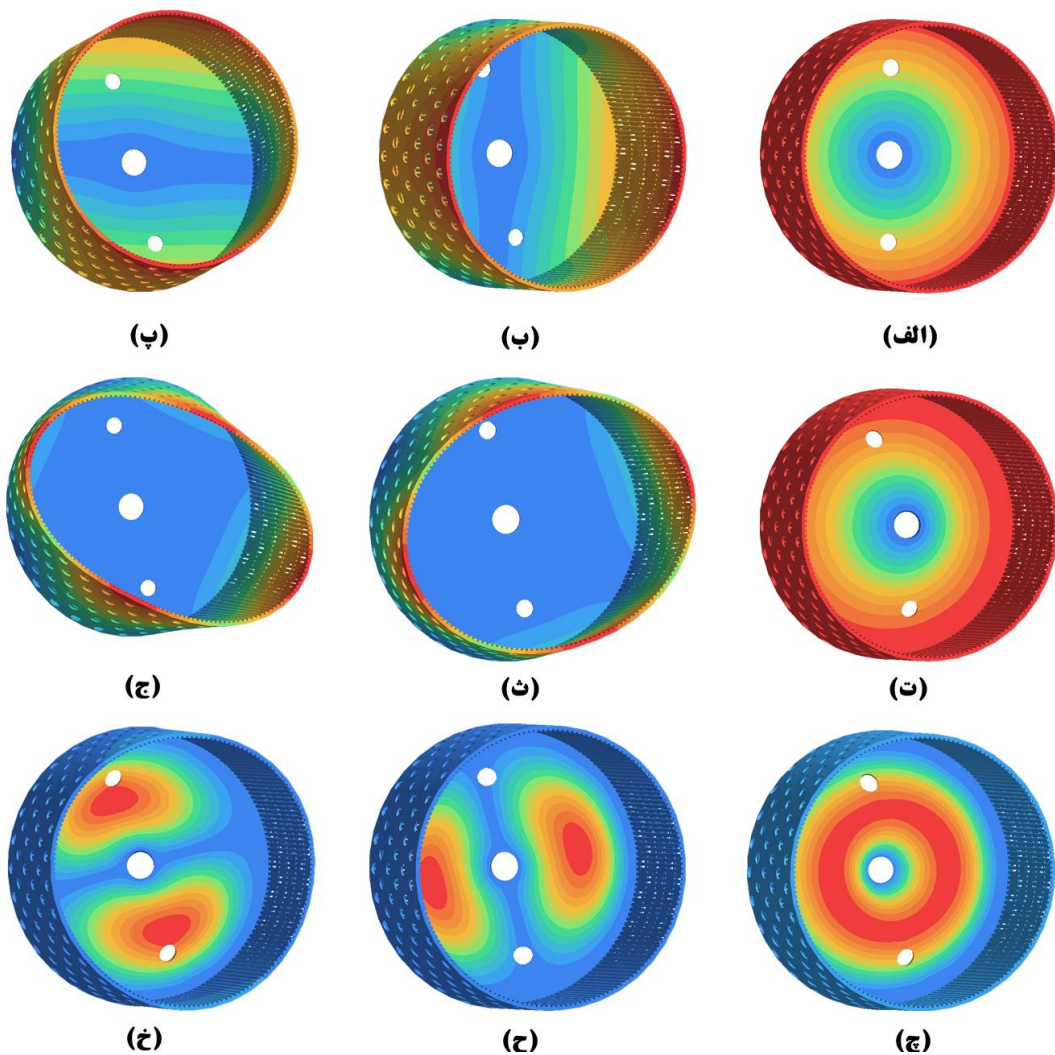
شکل ۱۴: نتایج تحلیل مودال انجام شده روی مجموعه در قالب کانتور رنگی جابجایی بیشینه نسبی: (الف) مود ۱؛ (ب) مود ۲؛ (پ) مود ۳؛ (ت) مود ۴؛ (ث): مود ۵؛ (ج): مود ۶؛ (د): مود ۷؛ (ح): مود ۸؛ (خ): مود ۹؛ (طیف تغییرات حداقل (آبی) تا حداکثر (قرمز) برای تمام تصاویر یکسان است).

جدول ۸: مقادیر فرکانس طبیعی در مدهای ارتعاشی مورد بررسی مجموعه

مقدار فرکانس طبیعی (Hz)	شماره مد	مقدار فرکانس طبیعی (Hz)	شماره مد
23.49	۶	0.00	۱
27.76	۷	8.15	۲
29.61	۸	9.42	۳
42.11	۹	20.60	۴
		21.59	۵

مقدار بالایی برخوردار است که می‌تواند نمایانگر تشدید در این مود باشد. لیکن با مقایسه مقدار فرکانس طبیعی این مود و محدوده فرکانس معمول کاری دستگاه (۵.۸۳ Hz) مشخص می‌شود که احتمال بروز تشدید با توجه به محاسبات در این عضو ناچیز است.

در مورد فرکانس تشدید زیرمجموعه سبد داخلی موضوع کمی متفاوت به نظر می‌رسد. گرچه در اینجا نیز طبق شکل ۱۵-الف)، میزان جابجایی در مد اول نسبتاً بالا است، اما مود ۴ (شکل ۱۵-ت)) در مورد زیرمجموعه سبد داخلی دارای اهمیت است. همانطور که در این مود مشاهده می‌شود، جابجایی نسبی، نسبت به سایر مدها از



شکل ۱۵: نتایج تحلیل مودال انجام شده روی زیر مجموعه سبد داخلی در قالب کانتور رنگی جابجایی بیشینه نسبی؛ الف) مود ۱؛ ب) مود ۲؛ پ) مود ۳؛ ت) مود ۴؛ ث) مود ۵؛ ج) مود ۶؛ چ) مود ۷؛ ح) مود ۸؛ خ) مود ۹؛ طیف تغییرات حداقل (آبی) تا حداکثر (قرمز) برای تمام تصاویر یکسان است.

جدول ۹: فرکانس‌های طبیعی در مدهای ارتعاشی مورد بررسی زیر مجموعه سبد داخلی

شماره مد	مقدار فرکانس طبیعی (Hz)	شماره مد	مقدار فرکانس طبیعی (Hz)
۱	0.01	۶	178.35
۲	12.80	۷	394.29
۳	13.06	۸	425.07
۴	32.11	۹	433.89
۵	177.61		

نقاط پرتماس ایجادشده در وسط زمان فرآیند شبیه‌سازی در Error! Reference source not found. و شکل ۵ روی زیرمجموعه سبد داخلی مشاهده می‌شود. از آنجائیکه مدت زمان تغذیه از ابتدای آغاز شبیه‌سازی تا زمان ۸ s در نظر گرفته شده است، طبق آنچه که در نمودار شکل ۷ مشخص است، تنش‌های ایجادشده پس از اتمام تغذیه روند کاهشی داشته است. علت این امر خروج تدریجی ذرات موجود در سبد داخلی بوده است که در هر بار رفت و برگشت بخشی از ذرات به زیرمجموعه سبد خارجی انتقال یافته‌اند. همانطور که شکل ۶ نشان می‌دهد، محدوده معمول مقادیر تنش‌ها بین ۰ تا ۴۰۰۰ Pa بوده است. با توجه مساحت بخش مورد نظر در نواحی A تا $D (0.004 \text{ m}^2)$ می‌توان نیروی متوسط اعمال شده روی این نواحی را بین ۰ تا ۱۶ N تخمین زد. دلیل تغییرات مشاهده شده در این نمودار تماس‌های پی در پی و تصادفی ذرات با ناحیه مورد نظر است که باعث ایجاد نوسانات در مقدار بدست آمده شده است. داده‌های بدست آمده از این بخش نشان می‌دهد که عضو مورد نظر از لحاظ مکانیکی استحکام لازم را در برابر تنش دینامیک ایجادشده از ذرات را دارد.

۳-۲-۲- رفتار دینامیک حالت گذرا

شکل ۱۶ نتایج حاصل از تحلیل دینامیک حالت گذرا را برای مجموعه نشان می‌دهد. جهت سادگی در نمایش، پوسته بخش تغذیه مخفی شده است. طبق شکل ۱۶-الف) میزان جابجایی ایجاد شده در مجموعه برای نقاط محیطی و انتهایی بیشتر است. در واقع با دورتر شدن از نقاط درگیری انتقال قدرت، میزان جابجایی بیشتر شده است که امری طبیعی است. البته مقدار جابجایی مشاهده شده قابل چشم‌پوشی است. لازم به ذکر است که در تحلیل انجام‌شده، میزان جابجایی به صورت لحظه‌ای محاسبه شده است. به بیان دیگر، میزان جابجایی در یک بازه زمانی کوچک و موقت در نظر گرفته شده است و سرعت و شتاب ایجادشده در اینجا انجام بررسی نشده است. همانطور که در شکل ۱۶-ب) مشاهده می‌شود، مقدار توزیع تنش ایجادشده در

در مجموع باید بیان نمود که با مقایسه مقدار فرکانس کاری معمول دستگاه با تمام مقادیر فرکانس طبیعی مجموعه مورد نظر (جدول ۸) و زیرمجموعه سبد داخلی (جدول ۹) هیچ‌یک از مدهای محاسبه شده با فرکانس ارتعاش کاری دستگاه برابر نیست. گرچه طبق جدول ۸، مقدار فرکانس طبیعی بدست آمده برای مود ۲ مجموعه اختلاف کمتری نسبت به سایر مقادیر دارد، لیکن از آنجائیکه این مقدار (۸۰۱۵ Hz) از فرکانس ارتعاش کاری دستگاه (۵۰۸۳ Hz) بیشتر است، رسیدن به این مقدار عملاً اتفاق نمی‌افتد. بنابراین می‌توان حاشیه ایمنی حاصل از این مقایسه را ۴۰٪ تخمین زد.

با مقایسه مستقیم مقادیر فرکانس طبیعی در جدول ۸ و جدول ۹ این نتیجه به دست می‌آید که کمترین مقدار تفاضل (۲.۵ Hz) برای مود ۸ مجموعه و مود ۴ زیرمجموعه سبد داخلی است. لیکن به دلیل تفاوت مودها و بنابراین مکانیزم ارتعاشی، این دو مود از لحاظ تشدید به طور مستقیم با یکدیگر قابل مقایسه نیستند و نمی‌توان نتیجه معناداری از این مقایسه دریافت نمود. لیکن آنچه از اهمیت بالاتری برخوردار است، تفاضل اندک (۳.۶۴ Hz) بین مقادیر فرکانس طبیعی مود ۳ برای مجموعه و زیرمجموعه مورد نظر است. نتیجه مشابهی را می‌توان برای مود ۲ مجموعه و زیرمجموعه مشاهده نمود. طبق شکل ۱۵-پ)، این مود ارتعاشی مربوط به جابجایی حول یک محور افقی در صفحه کف می‌شود. از آنجا که چنین جابجایی و حرکتی را نمی‌توان به طور مستقیم با عملکرد طبیعی دستگاه به دست آورد، می‌توان به این نتیجه رسید که چنین ارتعاشی دور از انتظار است.

۳-۲-۳ رفتار دینامیک

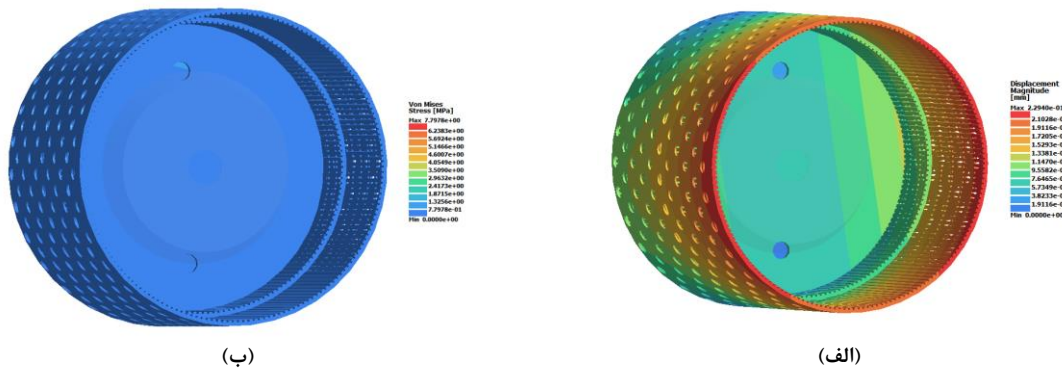
در این بخش پارامترهای توزیع تنش و جابجایی ایجادشده به طور خاص مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که منظور از جابجایی در تحلیل دینامیک حالت گذرا یا موقت، جابجایی لحظه‌ای یا دیفرانسیلی است و جابجایی سینماتیک و نمایش حرکت نیاز به تحلیل دیگری دارد که در اینجا به طور مستقیم مد نظر نمی‌باشد.

۳-۲-۱ رفتار ذرات

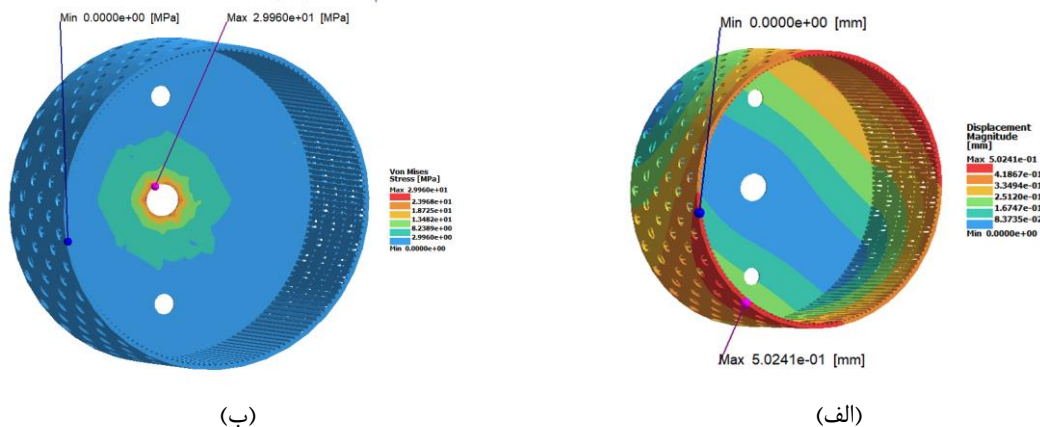
است. به این معنا که مقادیر تنش در اطراف سوراخ مرکزی حداکثر، و در نقاط محیطی کمترین مقدار را دارد. همچنین در صفحه کف سبد، مقادیر تنش در حلقه خارجی در حد اندکی بیش از حلقه داخلی است. در مورد توزیع تنش سوراخ‌های میله هادی تفاوت خاصی نسبت به حلقه داخلی مشاهده نشده است. بنابراین توزیع تنش ایجاد شده در صفحه کف سبد را می‌توان از لحاظ اهمیت به صورت شماتیک در شکل ۱۸ تقسیم‌بندی نمود.

زیرمجموعه سبد خارجی قابل چشم‌پوشی است و آنچه که باید تحت بررسی قرار گیرد زیرمجموعه سبد داخلی است.

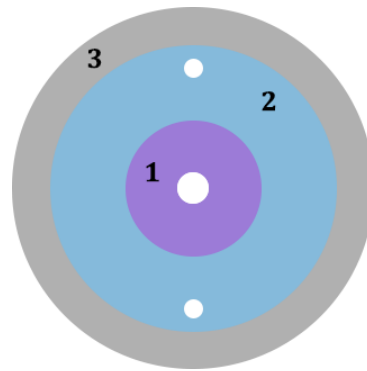
شکل ۱۷ نتایج حاصل از تحلیل دینامیک حالت گذرا را برای زیرمجموعه سبد داخلی نشان می‌دهد. همانطور که در تصویر توزیع جابجایی (شکل ۱۷-الف)) مشاهده می‌شود، طبیعتاً جابجایی بیشتر در نقاط محیطی و اطراف بیشتر از بخش‌های مرکزی و سوراخ است، البته مقدار آن ناچیز است و قابل چشم‌پوشی است. نکته دیگری که در این تصویر مشاهده می‌شود این است که توزیع جابجایی ایجاد شده در صفحه کف سبد به صورت لایه‌ای تغییرات داشته است. به بیان دیگر، این تغییرات به صورت شعاعی یا حلقه‌ای نبوده است. البته جهت دوران تعریف شده در عضو، در این موضوع بی‌تأثیر نیست. این قضیه برای بحث توزیع تنش (شکل ۱۷-ب)) به صورت منظم‌تری مشاهده شده



شکل ۳: جابجایی و تغییر شکل ایجاد شده (الف) به همراه توزیع تنش (ب) روی مجموعه در وضعیت بحرانی در قالب کانتور رنگی طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حال گذرا



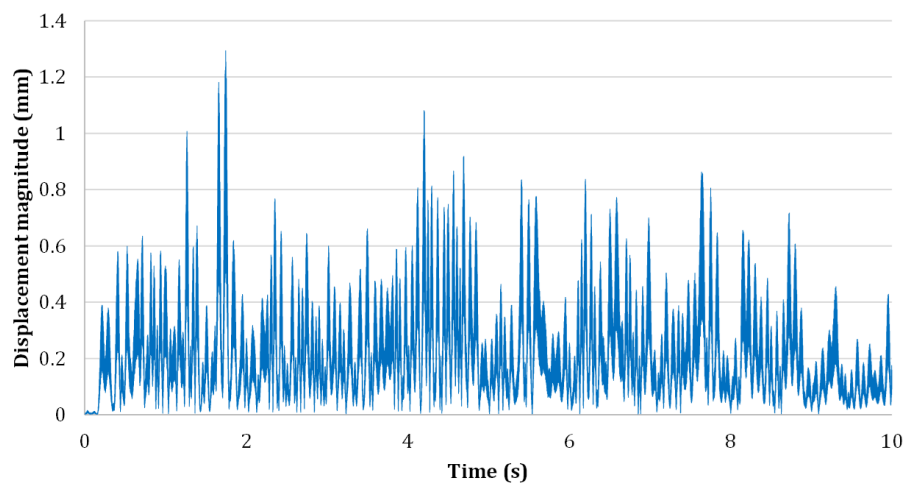
شکل ۴: جابجایی ایجاد شده (الف) به همراه توزیع تنش (ب) و تغییر شکل بزرگ‌نمایی شده روی زیرمجموعه سبد داخلی در وضعیت بحرانی در قالب کانتور رنگی طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حال گذرا



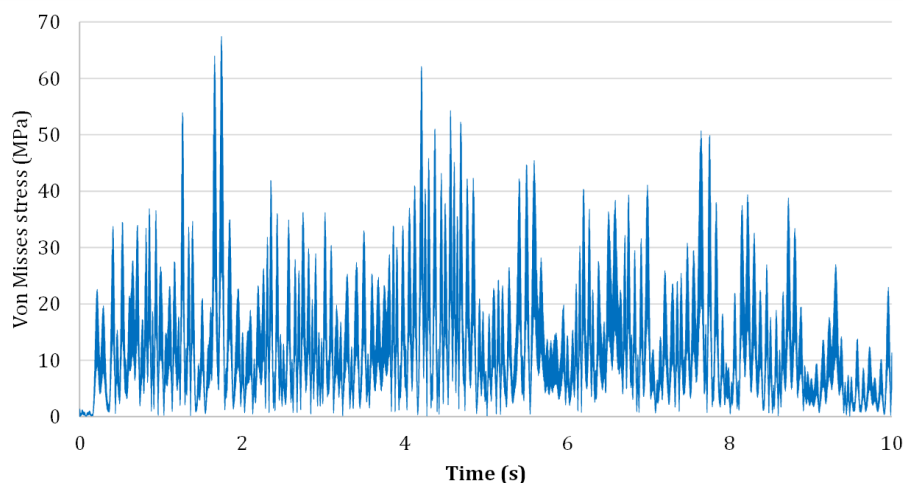
شکل ۵: پهنه‌بندی صفحه کف سبد از جهت اهمیت توزیع تنش

مقدار تنش برای نقطه بحرانی شکل ۱۷-ب) مشاهده می‌شود. بازهم در این نمودار روند تغییرات به گونه‌ای است که پایداری نسبی پس از ۸ s مشاهده می‌شود. بنابراین مدت زمان پایداری رفتار ذرات حدوداً ۵.۵ s یا ۶۸٪ مدت زمان تغذیه ذرات است. لازم به ذکر است که طبق شکل ۲۰ حداکثر مقدار تنش معادل وون میسر زیر ۵۰ MPa بوده است. گرچه این مقدار از لحاظ مکانیکی و جنس به کار رفته در اعضا قابل توجه نیست، لیکن جهت بررسی رفتار دینامیک مفید است. در مجموع باید گفت که نتایج تحلیل دینامیک حالت گذرا نشان داده است که جابجایی حداکثر در نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی حداکثر ۱.۳ mm و تنش بحرانی وارد شده بر آن در حدود ۷۰ MPa است. در نتیجه استحکام مکانیکی مجموعه در مقابل تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از عملکرد دستگاه قابل قبول است.

شکل ۱۹ جابجایی ایجادشده در یکی از نقاط محیطی را با بیشترین میزان جابجایی در وضعیت بحرانی نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشخص است، تغییرات در بازه کوچکی رخ داده است و نوسانات زیاد آن مربوط به مقادیر کوچک آن می‌شود. نکته دیگری که در این نمودار قابل برداشت است، روند کاهشی مقادیر بیشینه آن است که به معنای پایدار شدن رفتار دینامیک آن پس از گذشت مدت زمان مشخص است. همانطور که نمودار شکل ۱۹ نشان می‌دهد، تغییرات قابل توجه قله‌ها پس از مدت زمان ۵ s نسبتاً کاهش یافته است و می‌توان گفت که پایداری رفتار از این زمان به بعد مشاهده می‌شود. البته باید توجه داشت که کاهش مشاهده شده از در بازه زمانی ۹ s تا پایان به دلیل قطع تغذیه ذرات در زمان ۸ s بوده است و نمی‌توان آن را مستقیماً با تغییرات رفتار دینامیک و پایداری مرتبط دانست. همین قضیه به صورت دیگری در شکل ۲۰ در مورد تغییرات



شکل ۶: تغییرات مقدار جابجایی طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حالت گذرا برای نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی



شکل ۷: تغییرات مقدار تنش طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حالت گذرا برای نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی

جهت اندازه‌گیری میزان جابجایی و تنش اعمال شده ناشی از گردش ذرات، از کرنش‌سنج‌های نصب شده روی سبد خارجی استفاده شده است. میزان جابجایی حداکثر به دست آمده به طور مستقیم توسط این کرنش‌سنج‌ها 1.21 mm ، و تنش حداکثر معادل آن 74 MPa محاسبه شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده در مطالعات تجربی قبلی [۱۸-۲۱]، نتایج نشان می‌دهد که نوسانات ایجاد شده در نمودارهای جابجایی و تنش اعمال شده روی بدنه دوار دستگاه، سبد خارجی تا زمان 5.9 s به مقادیر پائین‌تر از 15% مقدار متوسط رسیده است. به این ترتیب پایداری رفتار ذرات در این زمان در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۰: مقایسه نتایج تحلیل نرم‌افزاری و تجربی جهت اعتبار سنجی پارامترهای خروجی

تنش بحرانی [MPa]	جابجایی حداکثر نقطه بحرانی سبد داخلی [mm]	زمان پایداری [s]	
70	1.3	5.5	تحلیل نرم‌افزاری
74	1.21	5.9	مطالعه تجربی
5.71	6.92	7.27	درصد اختلاف

شده 40% می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج تحلیل دینامیک گذرا مدت زمان پایداری رفتار ذرات در حدود 5.5 s یا 68% مدت زمان تغذیه ذرات، جابجایی حداکثر در نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی حداکثر 1.3 mm ، و تنش بحرانی وارد شده بر آن در حدود 70 MPa است؛ که به معنای استحکام مکانیکی قابل قبول مجموعه در مقابل تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از عملکرد دستگاه است. آنچه که با توجه به نتایج تحلیل انجام شده می‌توان استنباط نمود، توصیه بر حفظ حرکت دورانی حداکثر (36.68 rad/s) و عدم تغییر قابل توجه نرخ

شکل ۲۰ تغییرات مقدار تنش طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حالت گذرا برای نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی طبق آنچه که در روابط (۲) تا (۵) گفته شد، محاسبه نرخ ته‌نشینی برای تخمین سرعت دورانی نقاط مختلف در راستای شعاع، و فشار هیدرولیک ایجاد شده ناشی از سیال، روی دیواره سبد به صورت تئوری لحاظ شده است. طبق آنچه که در ابتدای بخش نتایج نیز ذکر شد، اعتبارسنجی نتایج تحلیل با توجه به نتایج آزمایشات تجربی صورت گرفته در مطالعات قبلی [۱۷-۲۰] انجام شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۱۰ قابل مشاهده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ساختار و عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دو مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا مبحث شبیه‌سازی در سه فاز تحلیل مودال، تحلیل رفتار ذرات، و تحلیل دینامیک حالت گذرا انجام شده است. نتایج تحلیل مودال نشان داد که حاشیه ایمنی بدست‌آمده در زمینه بروز پدیده تشدید با توجه به فرکانس ارتعاش کاری معمول دستگاه و فرکانس طبیعی مجموعه و زیرمجموعه سبد داخلی به واسطه تغییر در روند نیروهای اینرسی خطی و دورانی ایجاد

- [3] Romani Fernández, X. and H. Nirschl, Multiphase CFD Simulation of a Solid Bowl Centrifuge. *Chemical Engineering & Technology*, 2009. 32: p. 719-725.
- [4] Stahl, S., L.-E. Spelter, and H. Nirschl, Investigations on the Separation Efficiency of Tubular Bowl Centrifuges. *Chemical Engineering & Technology*, 2008. 31(11): p. 1577-1583.
- [5] Ambler, C.M., The theory of scaling up laboratory data for the sedimentation type centrifuge. *Journal of Biochemical and Microbiological Technology and Engineering*, 1959. 1(2): p. 185-205.
- [6] Pang, C., et al., Simulating multiphase flow in a two-stage pusher centrifuge using computational fluid dynamics. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2012. 6(3): p. 329-338.
- [7] Bürger, R. and F. Concha, Settling velocities of particulate systems: 12. *International Journal of Mineral Processing - INT J MINER PROCESS*, 2001. 63: p. 115-145.
- [8] Yan, F. and B. Farouk, Numerical Simulations of Flows Inside a Partially Filled Centrifuge. *Journal of Fluids Engineering*, 2003. 125: p. 1033.
- [9] Anlauf, H., Recent developments in centrifuge technology. *Separation and Purification Technology*, 2007. 58(2): p. 242-246.
- [10] Wang, Y., et al., CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fibre membrane bioreactor using a porous media approach. *Journal of Membrane Science*, 2010. 363(1): p. 57-66.
- [11] Ferry, J. and S. Balachandar, A fast Eulerian method for disperse two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001. 27: p. 1199-1226.
- [12] Wakeman, R.J., Modelling slurry dewatering and cake growth in filtering centrifuges. *Filtration & Separation*, 1994. 31(1): p. 75-81.
- [13] Kutz, M., *Handbook of Materials Selection*. 2002: Wiley.
- [14] Chapter 11 - Centrifugal Separations, in Coulson and Richardson's *Chemical Engineering Design*, 2002. 4th ed. p. 11.1-11.10.
- تغذیه ذرات نسبت به مقدار مشخص شده (۰.۵۶ kg/s) می‌باشد. موارد زیر نیز با توجه به نتایج تحقیق انجام شده استنباط می‌شود:
- با توجه به تحلیل مودال انجام شده، سرعت دورانی فعلی دستگاه، منجر به ارتعاشات مخرب یا تشدید نخواهد شد.
 - با توجه به تحلیل مودال انجام شده، فرکانس طبیعی مجموعه مورد نظر و سبب داخلی در مودهای مختلف مشکل ارتعاشی ایجاد نمی‌کند.
 - طبق تحلیل رفتار دینامیک حالت گذرای انجام شده روی زیرمجموعه سبب داخلی، اهمیت توزیع تنش در صفحه کف در مرکز مهم‌ترین و در حلقه میانی کم‌اهمیت‌ترین شناسایی شده است.
 - بازه جابجایی‌های مشاهده شده در تحلیل دینامیک حالت گذرا نشان می‌دهد که جابجایی‌های اطراف مجموعه در بازه مقادیر کوچکی قرار می‌گیرد و مشکل‌ساز نخواهد بود.
 - گرچه محدوده مقادیر تنشی و جابجایی حاصل در حدی نیست که از لحاظ مکانیکی مشکل خاصی برای اعضا ایجاد شود، لیکن افزایش نرخ تغذیه جهت افزایش بازده دستگاه، با توجه به نیروهای اینرسی خطی و دورانی ایجادشده، می‌تواند منجر به تغییر فرکانس ارتعاش کاری دستگاه گردد. بنابراین احتمال بروز تشدید با توجه به تفاضل‌های بدست آمده با مجموعه و زیرمجموعه بالا می‌رود. لذا پیشنهاد می‌شود که مقدار نرخ تغذیه ذرات با احتیاط و حتی‌الامکان پس از آزمون تجربی افزایش یابد.
 - با توجه به بازه استحکام مکانیکی مورد نیاز بدست‌آمده، به کارگیری جنس‌های سبک‌تر و حتی کم‌استحکام‌تر از جنس فعلی می‌تواند انتخاب مناسبی جهت بینه‌سازی طراحی و عملکرد دستگاه باشد؛ به این ترتیب نه تنها فرآیند ساخت و مونتاژ دستگاه تسهیل خواهد شد، بلکه نیروهای اینرسی ناشی از جرم اعضا و تمایل به گریز از مرکز و وارد آمدن صدمه به یاتاقان‌ها در آن کاهش خواهد یافت.

۵- منابع

- [1] Ergun, S. and A.A. Orning, Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1949. 41(6): p. 1179-1184.
- [2] Leung, W.W.F., *Industrial Centrifugation Technology*. 1998: McGraw-Hill Education.

- during Solids-Liquid Separation. Chemical Engineering & Technology, 2004. 27(10): p. 1075-1080.
- [19] Deshmukh, S. and J. Joshi, Flow Visualization and Three-Dimensional CFD Simulation of the Annular Region of an Annular Centrifugal Extractor. Industrial & Engineering Chemistry Research - IND ENG CHEM RES, 2007. 47.
- [20] Leung, W.W.F. and A.H. Shapiro, Improved design of conical accelerators for decanter and pusher centrifuges. Filtration & Separation, 1996. 33(8): p. 735-738.
- [21] Records, A. and K. Sutherland, Decanter Centrifuge Handbook. 2001: Elsevier Science.
- Engineering (Sixth Edition), R. Chhabra and M.G. Basavaraj, Editors. 2019, Butterworth-Heinemann. p. 627-656.
- [15] Pusher centrifuge technology evolves. Filtration + Separation, 2021. 58(2): p. 18-20.
- [16] Brouwers, J.J.H., Innovative Methods of Centrifugal Separation. Separations, 2023. 10(3): p. 181.
- [17] Anlauf, H. and J.A. Sorrentino, The Influence of Particle Collective Characteristics on Cake Filtration Results. Chemical Engineering & Technology, 2004. 27(10): p. 1080-1084.
- [18] Bentz, M., O. Hartmetz, and W. Stahl, Particle Destruction Effects in Pusher Centrifuges