



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

تعیین پارامترهای مدل دراگر-پراگر کپ اصلاح شده برای پودر KMS-92 با روش
آزمون تجربی و بهینه‌سازی

نگارنده

سهراب سلامتی خیاوی

استاد راهنما

سید هادی قادری

استاد مشاور

سید وحید حسینی

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۱۵۵ / ۲۸۷ / ۳
تاریخ: ۱۳۹۷ / ۱۲ / ۰۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سهراب سلامتی خیابوی با شماره دانشجویی ۹۴۰۹۴۴۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان تعیین پارامترهای مدل دراگر - پراگر کپ اصلاح شده برای پودر KMS-92 با روش آزمون تجربی و بهینه‌سازی که در تاریخ ۹۷/۱۱/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: خیلی خوب) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	سید هادی قادری	استادیار	<u>قاسمی</u>
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	سید وحید حسینی	استادیار	<u>غائب</u>
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	محمد جعفری	دانشیار	<u>[Signature]</u>
۵- استاد ممتحن اول	مهدی گردویی	استادیار	<u>[Signature]</u>
۶- استاد ممتحن دوم	محمد باقر نظری	استادیار	<u>[Signature]</u>

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم نامہ

ماحصل آموختہ ہمیں را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، وجود گرام بخش پدرم

به عاشقانه ترین نگاه زندگی ام، چشمان مهربان مادرم

و خواهر مهربانم که وجودش شادی بخش و صفا بخش مایه آرامش من است

که هر چه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هر چه بلو شتم قطره ای از دریای بی کران مهربانی تان را سپاس توانم بگویم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشت رضای شما

پیش کشی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان شاکر کنم، باشد که حاصل تلاشم نیم کوزه غبار محنتی تان را برزاید

بوسه بردستان پر مهرتان

سپاس‌گزاری

پروردگارا...

نه می‌توانم سپاهی را به موهایشان که در راه قد کشیدن و شکوفایی من سپید شد بازگردانم، نه قادر به جبران این همه عشق و محبت که به من ارزانی داشته‌اند هستم.

سپاس خدای را که بزرگترین یاورم در تمامی سخت‌های زندگی بوده است

و سپاس از روشن‌ترین نشانه‌هایش بر روی زمین، پدر و مادرم...

از استاد راهنمای گرانقدرم، جناب آقای دکتر سید هادی قادری که با راهنمایی‌ها و دل‌سوزی‌های برادرانه و بی‌شائبه‌شان بنده را در پیش‌برد این پژوهش یاری نمودند و نیز از سرور گرامی جناب آقای دکتر سید وحید حسینی که در کسوت استاد مشاور از حضورشان بهره‌ها بردم سپاسگزارم. باشد که شاکرد خوبی برای این بزرگواران بوده باشم.

در انتها از مسئولین محترم آزمایشگاه تعیین خواص مکانیکی مواد جناب آقای دکتر محمدباقر نظری، کارگاه ماشین ابزار جناب آقای مهندس حسین طاهری و دفتر دانشکده مهندسی مکانیک سرکار خانم مهندس صفاری و کارشناس آموزش محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده جناب آقای مهندس محمد عرب احمدی و تمامی عزیزانی که به اینجانب در پی‌مودن این مسیر یاری رسانیدند مراتب تقدیر و تشکر خود را اعلام می‌دارم.

سهراب سلامتی خیاوی

زمنان ۱۳۹۷

تعهد نامه

اینجانب سهراب سلامتی خیایوی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تعیین پارامترهای مدل دراکر - پراگر کپ اصلاح شده برای پودر KMS-92 با روش آزمون تجربی و بهینه‌سازی تحت راهنمایی جناب آقای دکتر سید هادی قادری متعهد می‌شوم:**

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود بوده 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 تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در این پژوهش از مدل ساختاری دراگر- پراگر کپ اصلاح شده (MDPC) برای بیان رفتار تراکمی پودر آلومینای KMS-92 استفاده شد. پارامترهای مربوط به این مدل به وسیله‌ی انجام برخی آزمون‌های ساده به دست آمدند. پارامترهای سطح خرابی برشی از آزمون‌های فشردن قطری و فشردن محوری نمونه‌های استوانه‌ای به دست آمدند. از یک قالب تجهیز شده برای دستیابی به پارامترهای سطح کپ، پارامترهای کشسانی و ضریب اصطکاک بین پودر و دیواره‌ی قالب استفاده شد. در نهایت پارامترهای به دست آمده در شبیه‌سازی‌های المان محدود با نرم‌افزار آباکوس به کار گرفته شدند. زیر برنامه‌ی USDFLD، برای بیان رفتار ماده به صورت تابعی از چگالی استفاده شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمون تجربی تراکم تک‌محوری داشتند. ضمن اینکه روشی دیگر برای به دست آوردن پارامترهای مدل ساختاری پودر مشابه با استفاده از آزمون تک‌محوری ساده و شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شد. در روش پیشنهادی شبکه‌ی عصبی مصنوعی، برای تخمین پارامترهای مدل MDPC، تا حدی که اختلاف بین منحنی‌های تجربی و المان محدود تراکم تک‌محوری پودر حداقل شود، آموزش می‌بیند. پارامترهای ورودی شبکه، مولفه‌های منحنی نیرو - جابجایی هستند. در این رویکرد نیز انطباق قابل‌قبولی بین نتایج آزمون و شبیه‌سازی حاصل از پارامترهای پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی مشاهده شد. در نتیجه می‌توان برای پودرهای مشابه تنها با انجام آزمون فشردن تک‌محوری، پارامترهای مدل رفتاری را به دست آورد.

واژگان کلیدی: تراکم پودر، پودر سرامیکی، مدل دراگر - پراگر کپ اصلاح شده، قالب تجهیز شده،

مدل‌سازی المان محدود، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

فهرست عنوان‌ها

فهرست شکل‌ها ک

فهرست جدول‌ها س

فهرست نشانه‌ها ع

فصل ۱ مقدمه ۱

۱-۱ فشردن پودر ۳

۱-۱-۱ فشردن درون قالب ۴

۱-۱-۲ فشردن ایزواستاتیک سرد ۶

۲-۱ مکانیزم‌های تراکم ۸

۳-۱ پیشینه‌ی موضوع ۹

۴-۱ اهداف پایان‌نامه ۱۴

۵-۱ ساختار پایان‌نامه ۱۵

فصل ۲ مدل‌سازی المان محدود و بهینه‌سازی ۱۷

۱-۲ مقدمه‌ای بر مدل‌های رفتاری مورد استفاده برای توصیف رفتار تراکمی پودرها ۱۸

۲-۲ مدل MDPC ۱۹

۳-۲ پارامترهای مدل رفتاری MDPC ۲۳

۱-۳-۲ پارامترهای سطح خرابی برشی ۲۳

۲-۳-۲ پارامترهای سطح کپ ۲۹

۳-۳-۲ پارامترهای کشسان ماده ۳۲

۴-۳-۲ ضریب اصطکاک بین دیواره‌ی قالب و پودر ۳۳

- ۳۴-۲-۴- شبیه‌سازی المان محدود فرآیند تراکم تک‌محوری پودر
- ۳۶-۲-۵- صحت‌سنجی اندازه‌گیری کرنش محیطی
- ۳۸-۲-۶- اصول تعیین پارامترهای مدل MDPC با شبکه‌های عصبی مصنوعی
- ۳۹-۲-۶-۱- مقدمه‌ای بر شبکه‌های عصبی
- ۴۱-۲-۶-۲- شبکه‌های عصبی چند لایه
- ۴۳-۲-۶-۳- آموزش شبکه‌ی عصبی
- ۴۴-۲-۷- رویکرد تعیین پارامترهای مدل MDPC با شبکه‌های عصبی
- ۴۷-۲-۷-۱- ساختار شبکه‌ی عصبی مورد استفاده

فصل ۳ آزمون‌های تجربی برای کالیبراسیون مدل رفتاری.....۴۹

- ۵۰-۳-۱- خواص پودر KMS-92
- ۵۲-۳-۲- آزمون‌های تعیین پارامترهای سطح خرابی برشی
- ۵۲-۳-۲-۱- ساخت نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمون
- ۵۲-۳-۲-۲- آزمون فشردن قطری و فشردن محوری
- ۵۴-۳-۳- تعیین پارامترهای سطح کپ
- ۵۵-۳-۳-۱- مدار کرنش‌سنج
- ۵۷-۳-۳-۲- فشردن تک‌محوری پودر درون قالب تجهیز شده
- ۶۲-۳-۴- تعیین پارامترهای کشسان ماده
- ۶۳-۳-۵- تعیین ضریب اصطکاک بین دیواره‌ی قالب و پودر
- ۶۴-۳-۶- آزمون تک‌محوری ساده

فصل ۴ نتایج و بحث.....۶۵

- ۶۶-۴-۱- پارامترهای ماده‌ی پودر KMS-92

- ۴-۱-۱ پارامترهای سطح خرابی برشی (دراکر - پراگر) ۶۶
- ۴-۱-۲ پارامترهای سطح کپ ۷۱
- ۴-۱-۳ پارامترهای کشسان ماده ۷۷
- ۴-۱-۴ شرایط اصطکاکی ۷۸
- ۴-۲- مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود با نتایج آزمون تجربی ۷۹
- ۴-۲-۱ آزمون بارگذاری - باربرداری چند مرحله‌ای ۷۹
- ۴-۲-۲ کالیبراسیون اندازه‌گیری کرنش محیطی ۸۶
- ۴-۳- تعیین پارامترهای مدل MDPC به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی ۸۸
- ۴-۳-۱ تحلیل حساسیت ۸۹

فصل ۵ نتیجه‌گیری ۹۷

منبع‌ها ۹۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: طرح‌واره‌ی مراحل فشردن پودر. ۴
- شکل ۱-۲: انواع مکانیزم‌های قالب تراکم تک‌محوری (الف) یک‌سویه (ب) دوسویه (ج) شناور. ۶
- شکل ۳-۱: طرح‌واره‌ی تراکم ایزواستاتیک سرد. ۷
- شکل ۴-۱: نمونه‌ی قطعات ساخته شده با فشردن KMS-92 در آزمایشگاه. ۸
- شکل ۱-۲: مقایسه‌ی رفتار چند مدل ساختاری در صفحه‌ی $p-q$ ۱۹
- شکل ۲-۲: سطوح تسلیم مدل MDPC. ۲۱
- شکل ۳-۲: پتانسیل جریان مدل MDPC در صفحه‌ی $p-q$ ۲۲
- شکل ۴-۲: تعیین خط خرابی برشی در صفحه‌ی $p-q$ با انجام آزمون‌های. ۲۴
- شکل ۵-۲: طرح‌واره شرایط بارگذاری متمرکز بر روی دیسک استوانه‌ای. ۲۶
- شکل ۶-۲: طرح‌واره شرایط توزیع بارگذاری بر روی دیسک استوانه‌ای. ۲۷
- شکل ۷-۲: مسیر بارگذاری آزمون تراکم قالب تجهیز شده. ۳۱
- شکل ۸-۲: شبکه‌بندی و شرایط مرزی شبیه‌سازی المان محدود برای فشردن تک‌محوری چند مرحله‌ای. ۳۶
- شکل ۹-۲: شبکه‌بندی مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی فشار داخلی وابسته به جابجایی. ۳۸
- شکل ۱۰-۲: ساختار یک نرون مصنوعی با چند ورودی و یک خروجی. ۳۹
- شکل ۱۱-۲: ساختار یک پرسپترون. ۴۰
- شکل ۱۲-۲: ساختار لایه‌های یک شبکه‌ی عصبی. ۴۲
- شکل ۱۳-۲: بیان شبکه‌ی عصبی به صورت تابع. ۴۳
- شکل ۱۴-۲: طرح‌واره آموزش شبکه‌ی عصبی. ۴۳
- شکل ۱۵-۲: فلوجارت روند شناسایی پارامترهای مجهول. ۴۶
- شکل ۱۶-۲: گراف و نماد تابع $tansig$ [۳۷]. ۴۸
- شکل ۱۷-۲: ساختار شبکه‌ی عصبی پیش‌خور پس انتشار مورد استفاده در نرم‌افزار متلب. ۴۸

- شکل ۳-۱: پودر KMS-92 ۵۱
- شکل ۳-۲: موقعیت‌دهی و بارگذاری در آزمون الف) فشردن قطری، ب) فشردن محوری ۵۳
- شکل ۳-۳: تجهیز مورد استفاده برای آزمون فشردن قطری و محوری ۵۴
- شکل ۳-۴: قالب تجهیز شده با حسگر کرنش‌سنج ۵۵
- شکل ۳-۵: مدار یک‌چهارم پل وتستون ۵۶
- شکل ۳-۶: تراکم قالب الف) حالت‌های تنش، ب) قالب مجهز به حسگر کرنش‌سنج ۵۸
- شکل ۳-۷: ابعاد قالب مجهز به حسگر کرنش‌سنج در ابتدای فرآیند فشردن پودر ۵۹
- شکل ۳-۸: ترازوی با دقت اندازه‌گیری $g \ 0.001$ ۵۹
- شکل ۳-۹: مقطع استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار داخلی ۶۰
- شکل ۳-۱۰: دیاگرام تنش‌ها درون قالب تجهیز شده در حین فشردن پودر ۶۲
- شکل ۳-۱۱: کالیبراتور مورد استفاده برای خوانش تغییرات ولتاژ کرنش‌سنج ۶۳
- شکل ۳-۱۲: تجهیز آزمون فشردن تک‌محوری با قابلیت اندازه‌گیری کرنش محیطی ۶۴
- شکل ۴-۱: شکست نمونه‌ها در آزمون الف) فشردن قطری، ب) فشردن محوری ۶۷
- شکل ۴-۲: استحکام کششی شعاعی نمونه‌ها بر حسب چگالی نسبی ۶۷
- شکل ۴-۳: استحکام فشاری محوری نمونه‌ها بر حسب چگالی نسبی ۶۸
- شکل ۴-۴: خط خرابی برشی در صفحه‌ی $p-q$ برای چگالی‌های نسبی مختلف ۶۹
- شکل ۴-۵: چسبندگی پودر بر حسب چگالی نسبی ۶۹
- شکل ۴-۶: زاویه‌ی اصطکاک پودر بر حسب چگالی نسبی ۷۰
- شکل ۴-۷: قرص‌های شکسته شده در آزمون الف) فشردن قطری، ب) فشردن محوری ۷۱
- شکل ۴-۸: نیروی اندازه‌گیری شده در سطح بالای پودر بر حسب جابجایی ۷۲
- شکل ۴-۹: منحنی تنش محوری بر حسب کرنش محوری در مراحل مختلف فشردن ۷۳
- شکل ۴-۱۰: منحنی تنش محوری بر حسب تنش شعاعی ۷۳

- شکل ۴-۱۱: رفتار تراکمی پودر در صفحه‌ی $p q$ حین بارگذاری و باربرداری. ۷۴.....
- شکل ۴-۱۲: خروج از مرکز کپ بر حسب چگالی نسبی. ۷۵.....
- شکل ۴-۱۳: پارامتر تغییرشکل بر حسب چگالی نسبی. ۷۶.....
- شکل ۴-۱۴: تنش تسلیم هیدرواستاتیک بر حسب کرنش حجمی مومسان. ۷۶.....
- شکل ۴-۱۵: نمودار نسبت پواسون بر حسب چگالی نسبی. ۷۷.....
- شکل ۴-۱۶: نمودار مدول یانگ بر حسب چگالی نسبی. ۷۸.....
- شکل ۴-۱۷: تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب فشار تراکم. ۷۹.....
- شکل ۴-۱۸: مقادیر برون‌یابی و تصحیح شده برای مدول یانگ بر حسب چگالی نسبی. ۸۲.....
- شکل ۴-۱۹: منحنی نیرو - جابجایی تجربی و شبیه‌سازی. ۸۳.....
- شکل ۴-۲۰: توزیع چگالی نسبی (الف) در انتهای بارگذاری مرحله‌ی آخر، (ب) پس از باربرداری. ۸۴.....
- شکل ۴-۲۱: توزیع تنش در راستای محور بارگذاری و محور شعاعی پس از اتمام فرآیند. ۸۵.....
- شکل ۴-۲۲ (الف) توزیع تنش تسلیم هیدرواستاتیک، (ب) توزیع کرنش حجمی مومسان کل. ۸۶.....
- شکل ۴-۲۳: توزیع کرنش محیطی در دیواره‌ی قالب در حداکثر فشار. ۸۷.....
- شکل ۴-۲۴: منحنی‌های (الف) کرنش محیطی - ارتفاع، (ب) تنش شعاعی - کرنش محیطی و. ۸۸.....
- شکل ۴-۲۵: منحنی نیرو بر حسب جابجایی آزمون تک‌محوری. ۸۹.....
- شکل ۴-۲۶: اثر خروج از مرکز کپ R بر حداکثر نیروی سنبه. ۹۰.....
- شکل ۴-۲۷: اثر ضریب اصطکاک بر حداکثر نیروی سنبه. ۹۱.....
- شکل ۴-۲۸: منحنی نسبت پواسون - چگالی نسبی با مولفه‌های متفاوت تابع توانی. ۹۲.....
- شکل ۴-۲۹: منحنی تنش تسلیم هیدرواستاتیک - کرنش حجمی مومسان. ۹۳.....
- شکل ۴-۳۰: مقادیر رگرسیون به دست آمده برای آموزش، صحت‌سنجی و آزمون شبکه. ۹۴.....
- شکل ۴-۳۱: مقایسه‌ی منحنی نیرو - جابجایی آزمون تجربی و شبیه‌سازی به کمک شبکه‌ی عصبی. ۹۵.....
- شکل ۴-۳۲: منحنی سخت‌شوندگی به دست آمده از شبکه‌ی عصبی. ۹۶.....

شکل ۴-۳۳: منحنی نسبت پواسون - چگالی نسبی به دست آمده از شبکه‌ی عصبی.۹۶

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲- نسبت p/q در آزمون‌های مختلف.....	۲۵
جدول ۱-۳- ترکیب پودر KMS-92 [۳۸].....	۵۱
جدول ۲-۳- خصوصیات پودر KMS-92 [۳۸, ۳۹].....	۵۱
جدول ۱-۴- پارامترهای مدل مومسانی MDPC.....	۸۰
جدول ۲-۴- پارامترهای سخت‌شوندگی مدل MDPC.....	۸۱
جدول ۳-۴- محدوده‌ی مناسب برای خروجی‌های شبکه‌ی عصبی.....	۹۳
جدول ۴-۴- مقادیر نهایی پارامترهای به دست آمده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای مدل MDPC.....	۹۵

فهرست نشانه‌ها

σ_c	استحکام فشاری	F_s	سطح خرابی برشی
σ_{Top}	تنش در بالای پودر	F_c	سطح کپ
σ_{Bot}	تنش در پایین پودر	F_t	سطح گذار
K	مدول بالک	p	تنش هیدرواستاتیک فشاری
G	مدول برشی	q	تنش موثر وون - میسر
E	مدول یانگ	d	چسبندگی
ν	نسبت پواسون	β	زاویه‌ی اصطکاک
$d\varepsilon_{ij}^e$	نمو کرنش کشسان	p_a	پارامتر تغییر شکل
I_1	نامتغیر اول تنش	α	پارامتر گذار
δ_{ij}	دلتای کرونیکر	R	پارامتر کنترل کننده‌ی شکل کپ
μ	ضریب اصطکاک	σ	تنسور تنش اصلی
z	فاصله‌ی حسگر از سطح پایین پودر	S	تنسور تنش انحرافی
H	ارتفاع پودر	σ_z	تنش محوری
f	تابع انتقال شبکه‌ی عصبی	σ_r	تنش شعاعی
J	تابع هدف	ε_v^p	کرنش حجمی مومسان
$\Delta R/R$	تغییرات مقاومت کرنش سنج	p_b	تنش تسلیم هیدرواستاتیک
k	گیج فاکتور کرنش سنج	ρ	چگالی
Δe	تغییر ولتاژ کرنش سنج	ρ_0	چگالی اولیه
P	فشار داخلی قالب	G_c	پتانسیل جریان روی سطح کپ
σ_θ	تنش محیطی	G_s	پتانسیل جریان در سطح خرابی برشی
ε_θ	کرنش محیطی	ε^p_{ij}	تنسور کرنش مومسان
ε_r	کرنش شعاعی	D	قطر نمونه‌ی استوانه‌ای
$\varepsilon_{pt} _0$	کرنش مومسان اولیه	t	ضخامت نمونه‌ی استوانه‌ای
K_{flow}	نرخ تنش جریان	σ_d	استحکام کششی در فشردن قطری

فصل ۱ مقدمه

فناوری فشردن پودرها برای ساخت تجهیزات مورد نیاز بشر مسئله‌ی جدیدی نبوده و پیشینه‌ی آن به تمدن‌های قدیمی بازمی‌گردد، به عنوان مثال می‌توان به ابزارهای خاص فلزی یافت شده مربوط به مصریان باستان و اشیای فلزی گران‌بهای مربوط به اینکاها اشاره کرد [۱]. فرآیند تولید قطعات از پودرها چه فلزی و چه سرامیکی به عنوان متالورژی پودر شناخته می‌شود. متالورژی پودر مدرن حدود قرن گذشته با تولید کاربرد تنگستن و بوش‌های برنزی متخلخل برای یاتاقان‌ها آغاز شد و در دوران جنگ جهانی دوم با تولید متنوع مواد فلزی و غیرفلزی توسعه یافت [۱]. در دهه‌های اخیر با پیشرفت صنایع و تولید مواد پودری گوناگون با خصوصیات منحصر به فرد، توسعه‌ی این فرآیند سریع‌تر شده و گرایش صنعت و محققان به استفاده از پودرهای جدید برای ساخت قطعات مختلف با خصوصیات مکانیکی و فیزیکی متنوع و استحکام بیشتر افزایش یافته است. در اغلب صنایع مانند خودروسازی، هوافضا و ابزارسازی برای تولید قطعات از متالورژی پودر استفاده می‌شود. عایق سرامیکی شمع، نازل‌ها و تکه‌های ماشین‌کاری از این قبیل قطعات هستند. محصول به دست آمده از فرآیند ساخت قطعات از ماده‌ی خام پودری بسیار به قطعه‌ی نهایی مورد نظر شباهت داشته و از این رو نزدیک به شکل اصلی^۲ نامیده می‌شود. همین ویژگی موجب افزایش نرخ تولید و کاهش سایر عملیات پرداخت و در نهایت کاهش هزینه‌های تولید قطعه می‌شود. از سوی دیگر این فرآیند در مقایسه با سایر روش‌های تولید دقتی قابل توجه داشته و برای ساخت قطعات دقیق در حجم تولید بالا مناسب است. سایر ویژگی‌هایی که می‌توان به آنها اشاره کرد، کاهش دورریز مواد، امکان تولید قطعاتی که ساخت آنها با سایر روش‌های متداول دشوار است (مثلا در مورد فلزات، استفاده از موادی که دمای ذوب بالایی داشته و یا شکل‌پذیری کمتری دارند برای تولید با عملیاتی مانند آهن‌گری و ریخته‌گری دشوار و نیازمند صرف هزینه‌های زیادی است اما متالورژی پودر تنها نیازمند تغییرشکل‌های مومسان کوچکی بین ذرات است) و کاهش هزینه‌های وابسته به مصرف انرژی هستند.

^۱ Inserts

^۲ Near net-shape

متالورژی پودر طیف وسیعی از فرآیندهای تولید را در بر می‌گیرد. از میان این حوزه‌ی وسیع، می‌توان به تراکم پودر تحت فشار اعمالی برای تولید قطعه‌ای با ابعاد و هندسه‌ی مشخص اشاره کرد که به طور کامل‌تر به آن پرداخته خواهد شد.

۱-۱- فشردن پودر

همانطور که ذکر شد رایج‌ترین روش برای شکل‌دهی و تولید قطعات از پودر، تراکم آن تحت فشار درون قالب است که در آن پودر سست به ماده‌ای متراکم با چگالی نسبتاً بالاتر تبدیل می‌شود. این فرآیند اغلب به صورت تراکم سرد پودر و پس از خارج کردن قطعه از قالب (قطعه‌ی خام^۱)، انجام عملیات پخت^۲ و در صورت نیاز سایر عملیات ثانویه برای افزایش چگالی و استحکام و رسیدن به ابعاد مورد نظر انجام می‌شود. ساخت قطعات از طریق این فرآیند غالباً به دو صورت فشردن تک‌محوری درون قالب^۳ و فشردن ایزواستاتیک سرد^۴ انجام می‌شود. سایر روش‌های تولید از طریق تراکم پودرها نظیر فشردن داغ^۵ نیز وجود دارند که در آن پودر همزمان با فشردن در معرض حرارت بالا قرار می‌گیرد و محصول به دست آمده پس از خروج از قالب دارای استحکام قابل توجهی است که در این پایان‌نامه به این روش پرداخته نخواهد شد.

به طور خلاصه چرخه‌ی شکل‌دهی پودر در اثر فشار را می‌توان به سه گام اصلی پر کردن پودر درون قالب، تراکم پودر در اثر اعمال فشار و خارج کردن قطعه‌ی خام از قالب تقسیم‌بندی کرد. در مرحله‌ی ابتدایی تراکم در فشارهای پایین، بازآرایی^۶ ذرات اتفاق می‌افتد [۲]. حین این مرحله ذرات هنوز قادر به لغزش رو یکدیگر بوده و در نقاط تماس بین آنها تغییر شکل موضعی رخ می‌دهد. با افزایش فشار اعمالی ذرات به هم فشرده‌تر شده و سطح تماس بین آنها افزایش یافته و در نتیجه چگالی بالاتر می‌رود [۳]. در چگالی‌های بالاتر با افزایش

¹ Green part

² Sintering

³ Die compaction

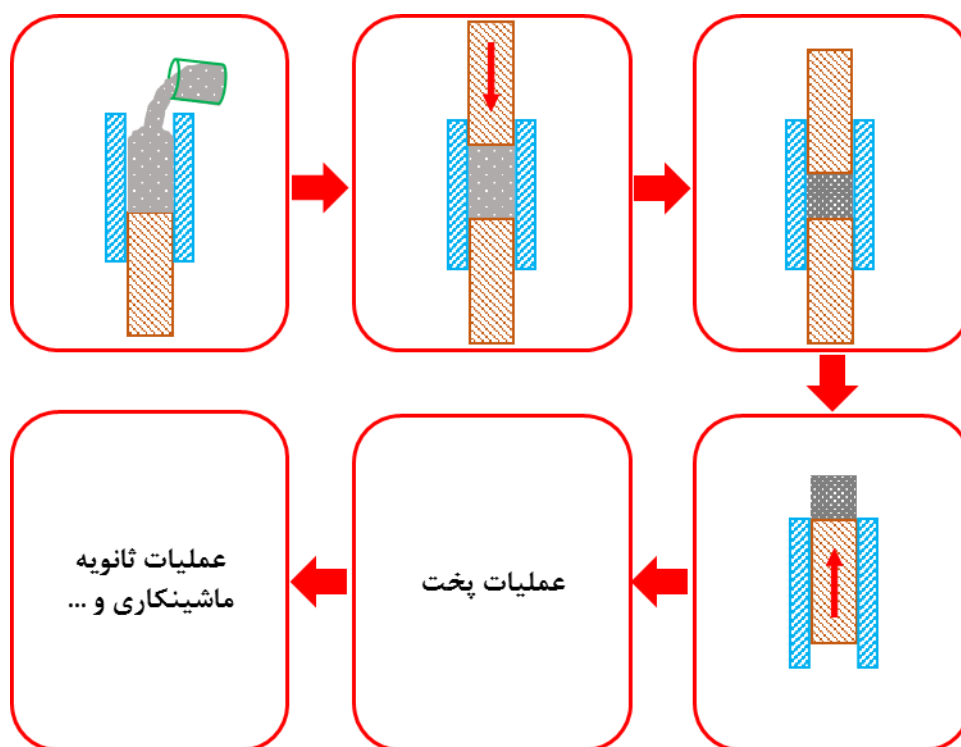
⁴ Cold isostatic pressing (CIP)

⁵ Hot pressing

⁶ Re-arrangement

تماس و چسبندگی بین ذرات، نرخ تغییر شکل کاهش یافته و ادامه‌ی اعمال فشار منجر به تغییرات کشسان در پودر می‌شود. پس از خروج قطعه از قالب، عملیات پخت برای دستیابی به استحکام بالاتر انجام شده و در صورت نیاز به محصولی با ابعاد دقیق، عملیات اضافی نظیر ماشینکاری بر روی قطعه انجام خواهد شد. شکل ۱-۱ این مراحل را به صورت طرح‌واره نشان می‌دهد.

همانطور که بیان شد، فشردن سرد پودرها را می‌توان به وسیله‌ی روش‌های فشردن قالب و یا فشردن ایزواستاتیک سرد انجام داد. هر کدام از این روش‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی در رابطه با نحوه‌ی بارگذاری و نوع قالب و قابلیت تولید بدنه‌های خام پودری دارند و انتخابشان به شکل نهایی محصول بستگی دارد.



شکل ۱-۱: طرح‌واره‌ی مراحل فشردن پودر.

۱-۱-۱ فشردن درون قالب

پرکاربردترین روش فشردن پودر برای ساخت قطعات با شکل ساده که به خاطر سادگی ساختمان قالب و نرخ بالای تولید، بسیار مقرون به صرفه و سریع است. در این فرآیند پودر سست درون یک قالب صلب در معرض فشار محوری ایجاد شده در اثر حرکت سنبه یا سنبه‌ها قرار گرفته و فشرده می‌شود. به حالتی که تنها

یکی از سنبه‌ها حرکت کرده و سنبه‌ی دیگر مقید است، فرآیند تراکم یک سوپه^۱ و به حالتی که پودر درون قالب بین هر دو سنبه‌ای که بینشان محصور است، فشرده می‌شود تراکم دو سوپه^۲ گفته می‌شود. در تراکم یک سوپه ابتدا گرانول‌ها بازآرایی شده و به هم فشرده شده و انباشته می‌شوند، در گام بعدی تغییرشکل گرانول‌ها رخ داده و در نهایت افزایش فشار اعمالی منجر به لغزش بیشتر گرانول‌ها و در نتیجه کاهش مقدار فضای خالی بین گرانول‌های تغییرشکل یافته می‌شود. در این روش به خاطر اعمال تنش از یک جهت و اثرات اصطکاک بین پودر و دیواره‌ی قالب تنش یکنواختی در سطوح پودر توزیع نمی‌شود، به طوری که در بخش‌های نزدیک به سنبه‌ی متحرک ذرات متراکم‌تر و چگالی بالاتر و رفته رفته از سمت سنبه‌ی متحرک به سمت سنبه‌ی ثابت تراکم و چگالی موضعی کاهش می‌یابد. چنین وضعیتی باعث ایجاد گرادیان‌های تنش در قطعه خواهد شد. گرادیان تنش منجر به گرادیان چگالی در بدنه‌ی خام شده که این مسئله بر کیفیت قطعه‌ی نهایی تاثیر گذاشته و منجر به بروز عیوبی مانند تورق^۳ و ترک در قطعه طی عملیات پخت شود.

تراکم دو سوپه توزیع ناهمگن تنش در قطعه‌ی فشرده شده را رفع کرده و محصولی با چگالی یکنواخت‌تر ارائه می‌دهد. راه‌حل دیگر استفاده از قالب شناور^۴ برای فشردن پودر است که در آن معمولاً سنبه‌ی پایینی ثابت و قالب روی سیستم فنر بسته شده و تراکم تنها توسط حرکت سنبه‌ی بالایی انجام می‌شود. با ادامه‌ی روند تراکم، اصطکاک موجب پایین آمدن قالب شده و توسط فنرها متعادل می‌شود. شکل ۱-۲ انواع قالب‌های تراکم تک‌محوری را به صورت طرح‌واره نشان می‌دهد. تراکم دوسوپه معمولاً در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دلیل در دسترس بودن پرس‌های یک سوپه در اغلب مراکز تحقیقاتی برای تولید قطعات مورد مطالعه از قالب تراکم یک سوپه استفاده می‌شود. از این رو بر اهمیت هرچه یکنواخت‌تر شدن قطعه‌ی متراکم شده افزوده می‌شود. در فرآیند فشردن قالب، مهم‌ترین عاملی که بر یکنواختی توزیع چگالی درون قطعه‌ی تولید شده تاثیر می‌گذارد، اصطکاک بین پودر و دیواره‌ی قالب حین فشردن است. استفاده از روانکار برای

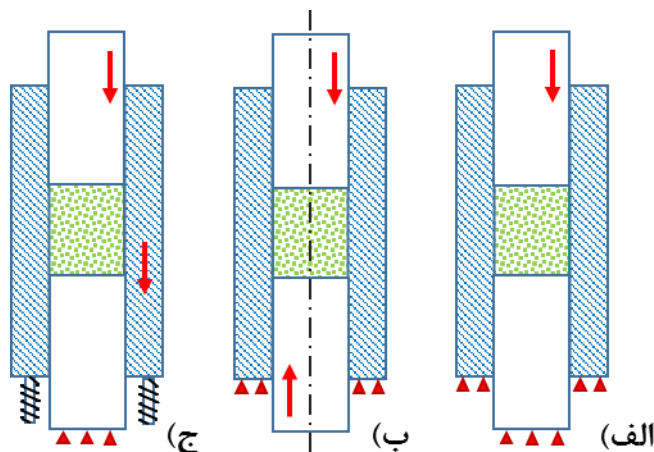
¹ Single-action pressing

² Double-action pressing

³ Lamination

⁴ Floating die system

کاستن اثر این عامل ضروری به نظر می‌رسد. نحوه‌ی استفاده از روانکار نیز متنوع است و می‌توان نسبت خاصی از برخی پودرها را به عنوان روانکار با پودر اصلی ترکیب کرد و سپس عمل تراکم را انجام داد یا اینکه مستقیماً به خود اجزای قالب اعمال شوند، مانند آغستن محلول روانکار به اجزای قالب (غوطه‌ور کردن اجزا در محلول یا افشاندن محلول بر اجزای قالب) و انجام عملیات تراکم پس از خشک شدن آن. از روانکارهای مورد استفاده می‌توان به استئارات منیزیم^۱، استئارات روی^۲ و اسید استئاریک^۳ اشاره کرد.



شکل ۲-۱: انواع مکانیزم‌های قالب تراکم تک‌محوری (الف) یک‌سویه (ب) دوسویه (ج) شناور.

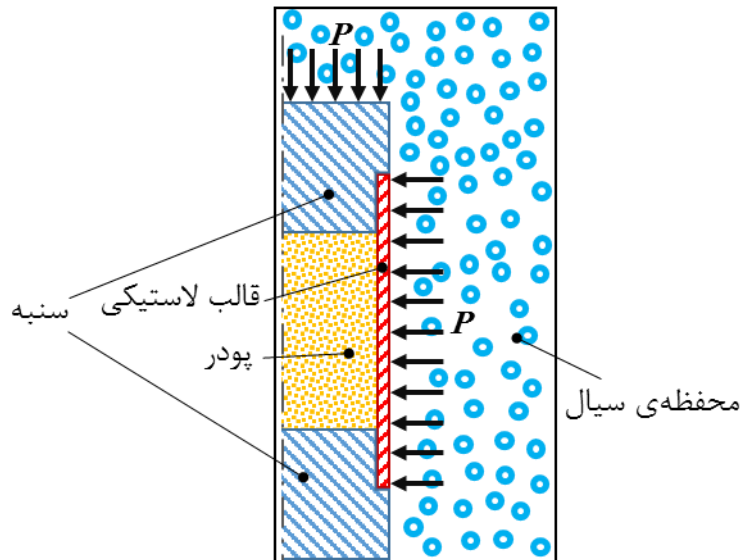
۲-۱-۱ فشردن ایزواستاتیک سرد

روش فشردن قالب، برای ساخت قطعات با هندسه‌ی ساده مناسب است. برای ساخت قطعات با هندسه‌ی نسبتاً بزرگتر و پیچیده‌تر از روش فشردن ایزواستاتیک سرد درون یک قالب انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. در این فرآیند پودر درون قالب لاستیکی آب‌بندی شده ریخته شده و سپس درون محفظه‌ی پر شده از سیال قرار می‌گیرد و در نهایت مطابق شکل ۳-۱ تحت فشار قرار می‌گیرد. به واسطه‌ی قرار گرفتن قالب در محفظه‌ی مملو از سیال محبوس، افزایش فشار منجر به اعمال تنش‌های هیدرواستاتیک به پودر در تمامی جهتها شده و پودر درون قالب فشرده خواهد شد.

^۱ Magnesium stearate

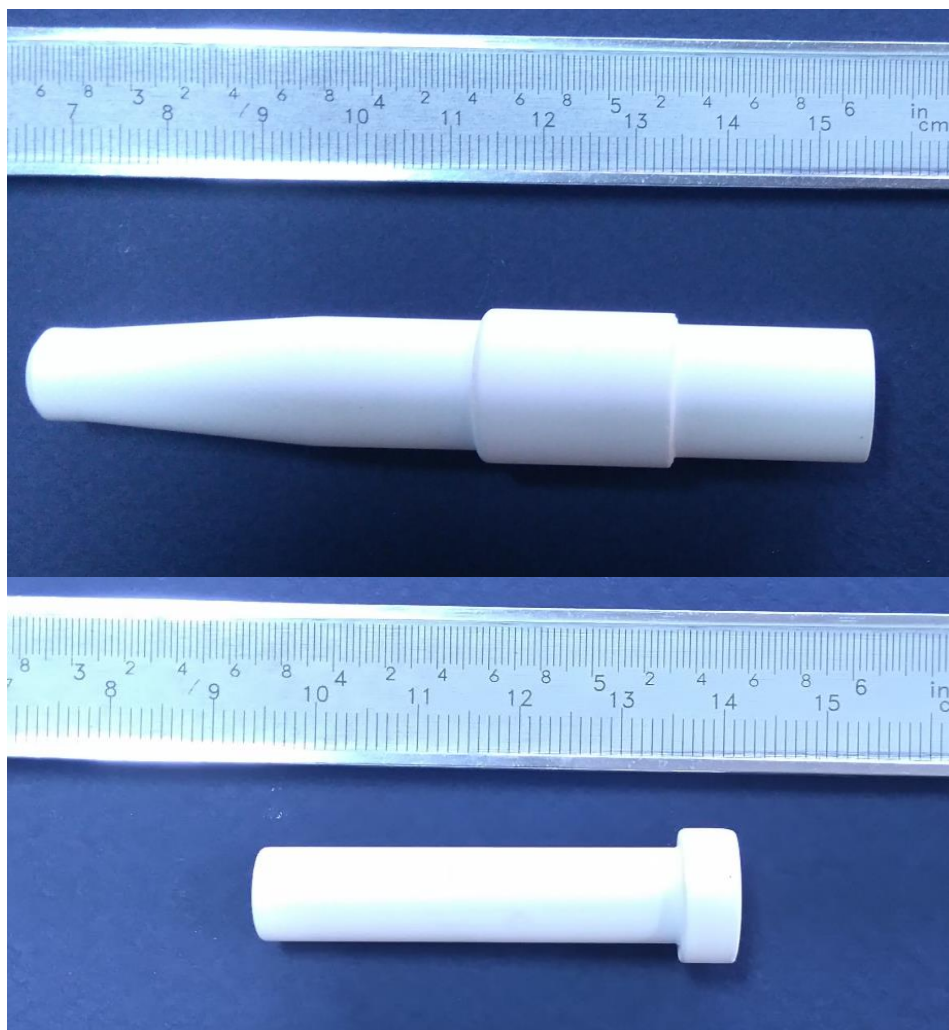
^۲ Zinc stearate

^۳ Stearic acid



شکل ۱-۳: طرح‌واره‌ی تراکم ایزواستاتیک سرد.

از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش می‌توان به چگالی یکنواخت‌تر قطعات ساخته شده (گرادیان‌های چگالی کمتر)، عدم نیاز به روانکار اضافی، چگالی و استحکام خام بالای قطعات نسبت به تراکم قالب در فشار یکسان، امکان تولید هندسه‌های پیچیده و با نسبت طول به سطح مقطع بزرگ و هزینه‌های اندک ساخت قالب اشاره کرد. از سوی دیگر این روش معایب خاص خود را نیز دارد که دقت پایین کنترل ابعاد و هندسه در قطعات نسبت به تراکم قالب، نیاز به عملیات پرداخت و ماشینکاری به خاطر صافی سطح کم و بروز برخی پدیده‌ها مانند پافیلی شدن قطعات، زمان نسبتاً طولانی و نرخ تولید اندک و پایین بودن عمر قالب لاستیکی نسبت به قالب‌های صلب فلزی یا کاربردی از این جمله عیوب هستند. شکل ۱-۴ نمونه‌هایی از قطعات ساخته شده با تراکم پودر را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴: نمونه‌ی قطعات ساخته شده با فشردن KMS-92 در آزمایشگاه سرامیک‌های پیشرفته دانشگاه

صنعتی شاهرود.

۲-۱- مکانیزم‌های تراکم

فرآیند فشردن پودرها رفتار پیچیده‌ای دارد. مکانیزم تراکم دارای مراحل متعددی است، در اولین مراحل تراکم، بازآرایی ذرات رخ می‌دهد [۲، ۳]، در این مرحله ذرات سست بوده بدون تغییر شکل مومسان و یا دارای تغییر شکل مومسان کمی به صورت موضعی در نقاط تماس بین همدیگر هستند. با افزایش تماس بین ذرات تغییر شکل مومسان افزایش یافته و ضمن اینکه تغییر شکل کشسان نیز در پودر رخ داده و منجر به تشکیل

مرزهای بین ذره‌ای جدید در توده‌ی متراکم می‌شود. به علاوه متراکم‌تر شدن پودر موجب افزایش تنش جریان موضعی^۱ شده و در نتیجه فشار مورد نیاز برای تراکم افزایش می‌یابد [۳].

قانون ساختاری که باید این رفتار پیچیده را توصیف کند، باید تمامی مکانیزم‌های یاد شده از پودر سست تا قطعه‌ی کاملاً متراکم را در برگیرد. رفتار، هندسه و شرایط مرزی پیچیده تحلیل تراکم پودر را دشوار می‌کند. رفتار و خواص کشسان و استحکام مکانیکی پودرها با تغییر حجم تغییر می‌کند، به همین خاطر طراحی دقیق ابزار و قالب نیازمند درک صحیح از رفتار پودرها تحت اثر فشار بوده و برای دستیابی به محصولی بی‌نقص و قابل قبول ضروری است. در گذشته این امر با سعی و خطا همراه بوده و مدت‌زمان زیادی صرف آزمایش‌ها و تکرار آنها تا دستیابی به نتیجه‌ای مطلوب می‌شد. در حال حاضر تحلیل المان محدود^۲ و مدل‌سازی‌های عددی با به‌کارگیری مدل‌های رفتاری و ساختاری مناسب، بهترین راه‌حل برای توصیف رفتار مواد تحت شرایط آزمایش بوده و هزینه‌های آزمون و خطای تجربی را کاهش داده و مورد توجه جوامع علمی و مراکز صنعتی برای شناخت دقیق رفتار مواد و بهبود و اصلاح ابزارهای استفاده شده برای ساخت قطعات واقع شده است.

۱-۳- پیشینه‌ی موضوع

مدل‌سازی عددی و تحلیل المان محدود فرآیند تراکم پودر از موضوعات مورد توجه جوامع علمی به خصوص در دهه‌های اخیر است. در این زمینه فعالیت‌های مختلفی برای ارائه‌ی مدل‌های رفتاری جدید یا تعیین پارامترهای انواع مواد پودری اعم از پودرهای سرامیکی، فلزی و حتی دارویی و آرایشی بر اساس مدل‌های ساختاری موجود و به اصطلاح کالیبره کردن آن مدل برای ماده‌ی مورد نظر انجام شده است. وانگ [۴] با ترکیب برخی مدل‌های ساختاری با روش‌های المان محدود سعی بر درک رفتار مکانیکی پودرها در حین فرآیند تراکم و انجام محاسبات برای کنترل طراحی و ساخت قالب‌های مورد نیاز داشته است، مدل ساختاری مورد استفاده در پژوهش وی مدلی وابسته به زمان بوده که مدل‌سازی المان محدود نیز بر اساس آن صورت گرفته

^۱ Local flow stress

^۲ Finite element analysis (FEA)

است. طبق مشاهده‌ی وی مدل مورد نظر تطابق کیفی قابل قبولی با نتایج تجربی داشته است. کیم، چوی و پارک [۵] به مطالعه‌ی رفتار تراکمی^۱ پودر سرامیکی زیرکونیا تحت تراکم سرد پرداختند، در پژوهش آنها از داده‌های آزمون تجربی تراکم سه‌محوری با شرایط مختلف بارگذاری استفاده و برای مدل‌سازی عددی تراکم پودرها، یک مدل هیپربولیک جدید در نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای مطالعه‌ی رفتار پودر در فرآیند فشردن قالب به کار گرفته شد. همچنین مدل دراگر-پراگر کپ اصلاح شده^۲ (MDPC) برای مقایسه با نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی به کار رفته است. توزیع چگالی پودر به صورت غیر مستقیم با روش سختی سنجی انجام شد. شبیه‌سازی عددی با در نظر گرفتن اثر اصطکاک بین پودر و قالب انجام و توزیع چگالی به دست آمده از آن با آزمون مقایسه شد. در پژوهش دیگر، کیم و پارک [۶] تراکم پودر کاربرد سیلیسیم^۳ را مورد مطالعه قرار دادند. داده‌های آن پژوهش نیز از تراکم سه‌محوری در فشارهای محبوس و تنش‌های محوری مختلف به دست آمدند. یک مدل رفتاری پیشنهاد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن با نتایج آزمون و دو مدل ساختاری دیگر مقایسه شد. محاسبات المان محدود هر سه مدل دارای تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمون تراکم ایزواستاتیک سرد بوده و برای فشردن قالب مدل پیشنهادی نتایج را بهتر پیش‌بینی کرده است. همچنین بر اساس مشاهدات آنها توزیع چگالی در نمونه‌ی لوله‌ای تولید شده توسط تراکم ایزواستاتیک سرد از نمونه‌ی فشردن قالب یکنواخت‌تر بوده است. زئوچ و همکاران [۷] به بررسی خصوصیات مکانیکی و سطوح خرابی برشی برای دو پودر آلومینا پرداختند. پارامترهای مدل دراگر - پراگر کپ (DPC) با استفاده از آزمون سه‌محوری به دست آمده و رابطه‌ی چگالی - فشار برای پودرهای مورد نظر تعیین شد. آنها با بررسی شکل کپ با روشی نسبتاً غیرمستقیم دریافتند که موقعیت کپ، با افزایش تنش هیدرواستاتیک حرکت می‌کند. هندرسون و موریارتی [۸] با استفاده از روش المان محدود به بررسی اثر قالب لاستیکی حین برداشت فشار پرداخته و روش‌هایی مانند تغییر هندسه قالب را برای کاستن از مشکلات رخ داده، پیشنهاد کردند. بر اساس مشاهدات آنها تغییرشکل بیش از اندازه‌ی قالب لاستیکی منجر به تنش‌های کششی درون پودر متراکم شده و

¹ Densification behavior

² Modified Drucker-Prager/Cap

³ SiC

امکان بروز ترک در آن را افزایش می‌دهد. فو، شنگ و بریسکو [۹] تراکم تک‌محوری را با شبیه‌سازی‌های عددی بر مبنای روش‌های المان گسسته^۱ و المان محدود ارزیابی و تطابق خوبی را بین نتایج هر دو مدل‌سازی مشاهده کردند. شبیه‌سازی المان گسسته برای توجیه واکنش‌های مکانیکی ذرات در سطح میکروسکوپی طی تراکم و شبیه‌سازی المان محدود برای مقایسه با توزیع چگالی به دست آمده از آزمایش انجام پذیرفتند. در تراکم قالب بخش بالایی پودر که نزدیک به سنبه‌ی متحرک بالایی قرار دارد، دارای چگالی موضعی بالاتر نسبت به سایر نقاط آن است. این ناهمگنی به دلیل اصطکاک بین ذره‌ای و اصطکاک بین پودر و دیواره‌ی قالب اتفاق می‌افتد. در پژوهشی دیگر [۱۰] شبیه‌سازی المان گسسته برای بررسی رفتار بازآرایی و شکست گرانول‌ها حین تراکم انجام و برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده، نیروی اعمالی به قسمت بالای پودر در شبیه‌سازی آزمون فشردن تک‌محوری با نتایج آزمون تجربی مقایسه شد. به خاطر پیچیدگی‌های آزمون سه‌محوری برای تعیین پارامترهای ماده، عده‌ای از محققان [۲، ۱۱] روشی را برای تعیین پارامترهای ماده برای مدل مورد نظرشان با استفاده از آزمون تک‌محوری و با انجام آزمایش‌های نسبتاً ساده و شبیه‌سازی و بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی برای پودرهای فلزی توسعه دادند. وو و همکاران [۱۲] در تراکم قرص‌های گرد لاکتوز با سطح صاف وقوع پدیده‌ی کپینگ مخروطی شکل^۲ را مشاهده و برای کاستن از احتمال وقوع این عیب، تغییر هندسه‌ی سنبه‌ها برای ساخت قرص‌های محدب برای همان ماده و تغییر خصوصیات مواد مانند خصوصیات کشسانی را با استفاده از تحلیل المان محدود بررسی کردند. بر اساس مشاهدات آنها حتی با تغییر انحنای سنبه‌ها نیز در حین برداشت فشار پدیده‌ی کپینگ با تشکیل نوار برشی شدید رخ می‌دهد. کارلونه و پالازو [۱۳] با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای یک مدل المان محدود را برای تراکم تک‌محوری پودر سرامیکی توسعه داده و ارزیابی کردند. در مدل‌سازی مورد نظر اثر اصطکاک و رفتار مکانیکی اجزای قالب در نظر گرفته شده و توزیع چگالی و تغییرات آن طی باربرداری و خارج کردن قطعه از قالب مورد ارزیابی قرار گرفت. گو، هندرسون و چندلر [۱۴] به بررسی بروز ترک در قطعه در فرآیند تراکم ایزواستاتیک سرد به کمک مدل‌سازی المان محدود دو بعدی و

^۱ Discrete element (DE)

^۲ Cone-shaped capping

سه بعدی با در نظر گرفتن اثر شرایط تماسی مختلف بین پودر و قالب لاستیکی پرداخته و توزیع تنش حاصل از فعل و انفعال پودر متراکم و قالب را بیان کردند. شین و همکاران [۱۵] پارامترهای مدل MDPC را با در نظر گرفتن بشکه‌ای شدن نمونه به کمک شبیه‌سازی تعیین کردند، بر اساس مشاهدات آنها مسیر تنش نمونه‌ی بشکه‌ای حین آزمون سه‌محوری به موقعیت درون نمونه وابستگی پیچیده‌ای داشت، همچنین بارگذاری هیدرواستاتیک خالص حتی در مرحله‌ی بارگذاری هیدرواستاتیک به دست نیامد، راه‌حل پیشنهادی آنها تصحیح رابطه‌ی کرنش غیر کشسان حجمی - فشار به دست آمده از آزمون تراکم سه‌محوری در فشارهای بالا بوده است. همچنین به کار بردن مدل نمونه‌ی بشکه‌ای را در کنار مدل رایج تغییرشکل همگن در شبیه‌سازی های عددی برای تعیین پارامترهای کپ و مقایسه‌ی نتایج حاصل با یکدیگر و آزمایش نیز توصیه کردند. پیچیدگی و هزینه‌های بالای تراکم سه‌محوری باعث شده که محققان زیادی در پی یافتن راه‌حل‌ها و آزمون‌های ساده‌تر برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری برای پودرها باشند. ملو و همکاران [۱۶] رویکردی را برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی در تراکم پودرهای سرامیکی تحت تراکم ارائه کردند. طبق پژوهش آنها سطح دراگر - پراگر با انجام حداقل دو آزمون تراکم قطری و محوری نمونه کالیبره شده و برای سطح کپ، پودر را درون قالبی با سنبه‌های مجهز به حسگرهای اندازه‌گیری فشار برای تحلیل اختلاف تنش اعمالی در بالا و پایین پودر به صورت تک‌محوری فشرده و سپس نمونه‌ی به دست آمده را با آزمون ایزواستاتیک تحت فشار قرار دادند. به علت گرادیان‌های چگالی در تراکم تک‌محوری، قطعه‌ی حاصل از تراکم ایزواستاتیک به شکل مخروط ناقص در آمد. علت این امر، بالا بودن کرنش مومسان نواحی پایین نمونه‌ی به دست آمده از تراکم تک‌محوری نسبت به نواحی بالایی آن است که به فشردگی کمتر نواحی پایین نمونه‌ی تراکم تک‌محوری بازمی‌گردد. برای کالیبراسیون پارامترهای مدل المان محدود به بررسی چند مجموعه پارامتر بر اساس پیشینه‌ی پژوهش با استفاده از مدل المان محدود خودکار پرداخته و مجموعه‌ای را که دارای نزدیک‌ترین تنش نرمال به تنش اندازه‌گیری شده بود را انتخاب کردند. شکل نهایی نمونه پس از دو مرحله تراکم ایزواستاتیک با نتیجه‌ی آزمون مقایسه و برخی تفاوت‌های جزئی در شبیه‌سازی و آزمون مشاهده شد که به دلیل ساده‌سازی مدل ساختاری و مدل اصطکاکی بوده است. آزمون ساده‌تری که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته آزمون تراکم

تک‌محوری پودر درون قالب مجهز^۱ به حسگرهای اندازه‌گیری است. سینکا، کونینگام و زاوالیانگوس [۱۷] به بررسی اثر اصطکاک دیواره‌ی قالب در تراکم قرص‌های دارویی با سطح منحنی پرداختند. قالب مورد استفاده در آزمایش آنها با حسگرهای اندازه‌گیری فشار شعاعی تجهیز و همچنین برای اندازه‌گیری اصطکاک بین پودر و اجزای قالب استفاده شد. مدل المان محدود DPC برای شبیه‌سازی عددی رفتار ماده با در نظر گرفتن دو حالت روانکاری شده و روانکاری نشده مورد استفاده و توزیع چگالی حاصل از آن در انتهای تراکم با توزیع چگالی اندازه‌گیری شده به روش سختی سنجی مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین، پارامترهای کشسان و مومسان ماده به صورت توابعی از چگالی بیان شدند. هان و همکاران [۱۸] نیز به مطالعه‌ی رفتار تراکمی پودرهای دارویی با استفاده از آزمون تراکم تک‌محوری در قالب استوانه‌ای تجهیز شده پرداختند. آنها نیز از مدل مومسانی وابسته به چگالی MDPC برای مدل‌سازی استفاده و برای توصیف رفتار غیر خطی مشاهده شده حین مرحله‌ی باربرداری در آزمایش تراکم قالب، یک قانون کشسانی غیر خطی ارائه و در شبیه‌سازی المان محدود به کار بردند. توزیع تنش و چگالی قرص‌های مختلف حین تراکم، برداشت فشار و خارج شدن نمونه از قالب مورد مطالعه قرار گرفتند. بر اساس نتایج تحلیل مشاهده شد که توزیع‌های تنش و چگالی قابلیت استفاده در تحلیل و بیان عیوب در قرص‌ها مانند لب پر شدن، کپینگ و تورق را دارند. دیارا و همکاران [۱۹] پودرهای آرایشی را در تراکم تک‌محوری با قالب تجهیز شده با استفاده از مدل MDPC شبیه‌سازی و با نتایج آزمایش مورد مقایسه قرار دادند. برخی پارامترها مانند انتشار تنش‌های محوری و شعاعی حین بارگذاری، سخت‌شوندگی و تغییر شکل مومسان نهایی پودر متراکم به خوبی شبیه‌سازی شدند. با این وجود برخی ویژگی‌ها مانند تغییرات تنش طی باربرداری با نتایج آزمایش تطابق زیادی نداشت که مشخص شد این عدم تطابق ناشی از مدل کشسان خطی به کار رفته در شبیه‌سازی بوده است. آلمانستوتر [۲۰] با قالب تجهیز شده به کالیبراسیون تجربی مدل MDPC برای پودر تنگستن پرداخت. به کمک این قالب، نیروهای بارگذاری و باربرداری پودر در جهت تراکم و در جهت عرضی و نیز اصطکاک دیواره تعیین شدند. پارامترهای سطح کپ با برازش منحنی‌های تنش و کرنش به دست آمده طی بارگذاری برای مقادیر مختلف چگالی خام مشخص و همچنین پارامترهای سطح

^۱ Instrumented die

خرابی برشی با انجام آزمون‌های فشردن قطری و فشردن محوری نمونه‌ها به دست آمدند. نیروهای تراکم محاسبه شده برای فرآیند فشردن دوسویه با آزمون تجربی تطابق بسیار خوبی داشته و همچنین نتایج برای بیان سطوح تسلیم مدل به صورت تابعی از چگالی نسبی استفاده شدند. ژو و همکاران [۲۱] با استفاده از مدل دراگر - پراگر اصلاح شده به توصیف رفتار تراکمی پودرهای مرکب فلزی پرداخته و برای شبیه‌سازی پودر را به صورت پیوسته در نظر گرفته و از قانون کشسانی خطی به صورت تابعی از چگالی نسبی برای بیان رفتار کشسان پودر استفاده کردند. پارامترهای کشسان و مومسان ماده از طریق آزمایش و ضریب اصطکاک توسط قالب تجهیز شده با ترنسدیوسرهای نیرو به دست آمده و در شبیه‌سازی المان محدود به کار رفتند. نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با آزمون داشته و مشخص شد که ضریب اصطکاک در فشارهای پایین با افزایش فشار رشد کرده و در فشارهای بالا (بالتر از ۱۰۰ MPa) افزایش فشار تاثیر چندانی بر ضریب اصطکاک نداشته و این پارامتر ثابت باقی می‌ماند. گروهی دیگر [۲۲] به کالیبراسیون تئوری و تجربی مدل MDPC با استفاده از قالب تجهیز شده با هندسه‌ی متفاوت پرداختند. در پژوهش این گروه، قالبی مکعبی برای تعیین مستقیم نیروهای بارگذاری و باربرداری و جابجایی پودر در جهت‌های تراکم و عرضی بدون انجام کالیبراسیون اضافی و همچنین برآورد ضریب اصطکاک بین قالب و پودر فلزی استفاده شد. داده‌های آزمایش در شبیه‌سازی تراکم قالب برای تایید نتایج اعمال شدند. نتایج نشان دادند که پارامترهای سطح کپ و پارامترهای کشسان می‌توانند برای پودرهای فلزی با انجام آزمون‌های بارگذاری و باربرداری کالیبره شوند. عطریان و همکاران [۲۳] پارامترهای مدل DPC را برای پودر Al7075 با استفاده از داده‌های نیرو - جابجایی یک آزمون تک‌محوری ساده به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی به دست آوردند، در پژوهش آنها به جز مدول کشسانی باقی پارامترهای مدل MDPC مستقل از تغییرات چگالی در نظر گرفته شدند.

۱-۴- اهداف پایان نامه

در این پژوهش، پارامترهای مدل MDPC برای پودر KMS-92 با آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی به دست خواهند آمد. همچنین تلاش می‌شود که روشی کم‌هزینه برای به دست آوردن این پارامترها با

بهینه‌سازی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پودرهای مشابه به کار گرفته شود. چون با متراکم‌تر شدن پودر خواص آن در حال تغییر است، پارامترهای مدل رفتاری وابسته به چگالی در نظر گرفته شدند. انتظار می‌رود که نتایج به دست آمده برای طراحی صحیح قالب‌های تراکم ایزواستاتیک سرد به کار گرفته شوند.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم به قوانین ساختاری و معادلات حاکم بر مدل MDPC و مدل‌سازی عددی فرایند تراکم پودر و ارائه‌ی روشی برای یافتن پارامترهای مدل MDPC به کمک شبکه‌های عصبی پرداخته می‌شود. فصل سوم به آزمون‌های تجربی مورد نیاز برای یافتن پارامترهای مورد نیاز برای کالیبره کردن مدل می‌پردازد. فصل چهارم نتایج به دست آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی را در خود جای داده است، فصل پنجم به نتیجه‌گیری در مورد این پژوهش می‌پردازد.

فصل ۲ مدل سازی المان محدود و بهینه سازی

۲-۱- مقدمه‌ای بر مدل‌های رفتاری مورد استفاده برای توصیف رفتار تراکمی پودرها

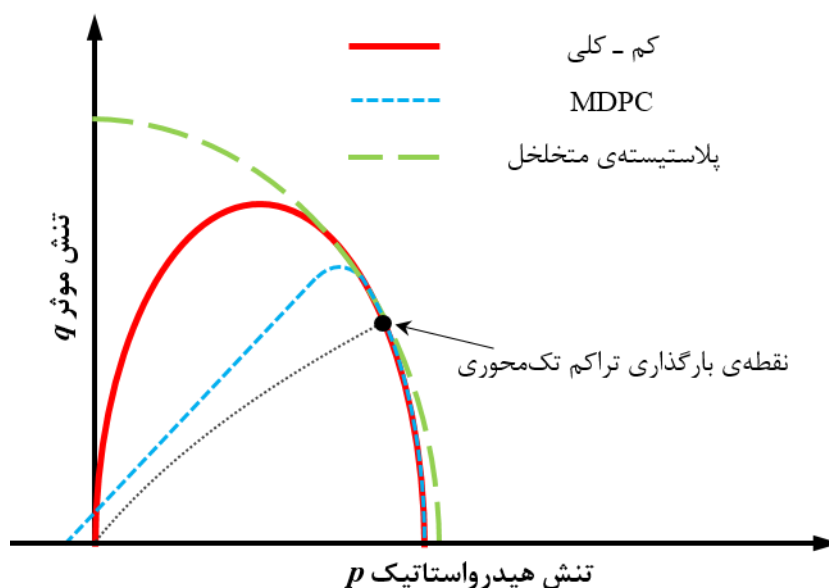
تحلیل خصوصیات ابزار و ماده بهبود و اصلاح قالب‌های تراکم پودر با روش سعی و خطا هزینه‌های اضافی مادی و صرف زمان را در پی دارد. این کار می‌تواند منجر به بهبود نه چندان مطلوب قالب و فرآیند مورد نظر و بروز عیب در قطعه شود. در نتیجه نیازمند صرف هزینه برای کنترل کیفیت نهایی قطعه شده و موجب افزایش هزینه‌های تمام شده‌ی محصول خواهد بود.

در سال‌های اخیر پژوهشگران و جوامع صنعتی توجه خود را به سمت شبیه‌سازی عددی فرآیندها معطوف ساخته‌اند. شبیه‌سازی عددی فرآیند فشردن سرد پودرها با روش المان محدود روشی ایده‌آل برای بررسی رفتار پودرها در حین تراکم، نیروهای شکل‌دهی و اثرات آنها بر توزیع‌های تنش و چگالی در نواحی مختلف پودر بدون نیاز به صرف هزینه و زمان برای آزمون و خطا است. مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی عددی فرآیند تراکم پودرها استفاده شده‌اند که می‌توان به مدل‌های مکانیک خاک کم - کلی^۱ [۲۴]، مدل مومسانی فلز متخلخل^۲ (گارسون^۳) [۲۵] و MDPC اشاره کرد. مدل MDPC چگالی را بهتر از مدل کم - کلی پیش‌بینی می‌کند [۲]. مدل گارسون نیز برای پودرهای در حدود چگالی‌های نسبی بالای ۰/۹ قابل استفاده است [۲۵]. شکل ۱-۲ به مقایسه‌ی رفتار مدل‌های MDPC، کم - کلی و گارسون با یکدیگر می‌پردازد. هر سه مدل رفتاری تقریباً یکسان را در انتهای بارگذاری پیش‌بینی می‌کنند. چنانچه مشاهده می‌شود، مدل گارسون و کم - کلی سطح تنش‌ها را بالاتر از MDPC تخمین می‌زنند. به خاطر کاربرد زیاد مدل MDPC برای توصیف رفتار تراکمی پودرها برای طیف وسیعی از چگالی نسبی، در این پژوهش نیز برای بیان رفتار تراکمی پودر KMS-92 از این مدل رفتاری استفاده شده است.

^۱ Cam-Clay

^۲ Porous metal plasticity

^۳ Gurson's model



شکل ۲-۱: مقایسه‌ی رفتار چند مدل ساختاری در صفحه‌ی $p-q$

۲-۲- مدل MDPC

مدل MDPC پرکاربردترین مدل ساختاری مورد استفاده برای بیان رفتار تراکمی پودرها است [۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۴]. این مدل توسعه یافته‌ی مدل دراگر - پراگر با افزودن یک سطح تسلیم به شکل کپ به سطح تسلیم برشی برای بیان آغاز کرنش‌های مومسان حجمی در ماده‌ی مورد نظر است [۲، ۲۵].

مدل MDPC رفتار ماده‌ی تحت تغییرشکل دائمی را بیان می‌کند [۲۵]. این مدل شامل سه بخش سطح خطی خرابی برشی نشانگر افزایش تنش برشی با تنش هیدرواستاتیک، سطح منحنی کپ شکل دارای فصل مشترک با سطح خرابی برشی و محور تنش هیدرواستاتیک و یک سطح گذار ملایم از سطح خرابی برشی به سطح کپ است [۲] (شکل ۲-۲). روابط (۱-۲) تا (۳-۲) سطوح مورد نظر را در صفحه‌ی تنش هیدرواستاتیک - تنش موثر $(p-q)$ بیان می‌کنند [۲۵].

$$F_S = q - p \tan \beta - d = 0 \quad (1-2)$$

$$F_C = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[\frac{Rq}{1 + \alpha - \alpha/\cos \beta} \right]^2} - R(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (2-2)$$

$$F_t = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[q - \left(1 - \frac{\alpha}{\cos \beta} \right) (d + p_a \tan \beta) \right]^2} \quad (3-2)$$

$$- \alpha(d + p_a \tan \beta) = 0$$

که F_t و F_c ، F_s به ترتیب سطح تسلیم خرابی برشی، سطح کپ و سطح گذار بوده و q تنش موثر، p تنش هیدرواستاتیک، β زاویه اصطکاک، d چسبندگی پودر، p_a پارامتر تغییرشکل، R خروج از مرکز کپ^۱ و α زاویه کوچک ناحیه گذار از سطح برشی به سطح کپ هستند.

این سطوح می‌توانند برای مدل‌سازی سه مرحله‌ی تراکم استفاده شوند. سطح خطی خرابی برشی بیانگر اولین مرحله‌ی تراکم یعنی بازآرایی است، در این مرحله تنها کرنش کشسان در فشارهای کم رخ می‌دهد. عرض از مبدا این ناحیه خطی، چسبندگی ماده و شیب آن زاویه اصطکاک را نشان می‌دهد. سطح گذار کمان کوچکی بین دو سطح خرابی برشی و سطح کپ است که عبور ملایم از سطح خرابی برشی به کپ را فراهم می‌کند. در این ناحیه منافذ پودر از بین رفته و ذرات شروع به فشرده شدن به یکدیگر کرده و کرنش‌های مومسان آغاز می‌شوند. عمده‌ی تغییرشکل مومسان در ناحیه‌ی کپ رخ می‌دهد که شامل سومین مرحله‌ی تغییرشکل یعنی تغییرشکل حجمی است. در انتهای این ناحیه پودر تحت اثر فشار بالا مستحکم شده و ادامه‌ی تراکم را دشوار می‌سازد [۲].

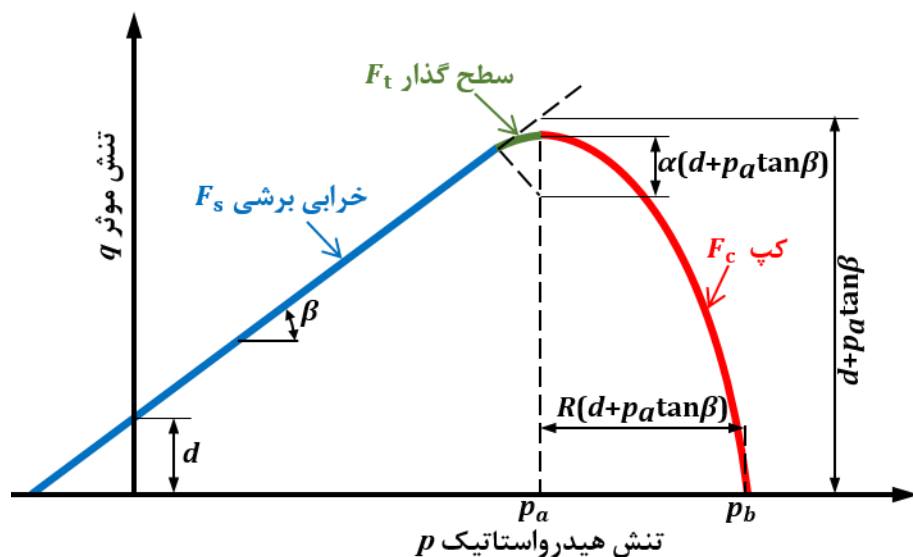
تنش فشاری هیدرواستاتیک و تنش معادل میسز به ترتیب با روابط (۲-۴) و (۲-۵) تعریف می‌شوند:

$$p = -\frac{1}{3} \text{trace}(\sigma) \quad (4-2)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} (S:S)} \quad (5-2)$$

که σ تنسور تنش اصلی و S تنسور تنش انحرافی بوده و به صورت $S = \sigma + pI$ تعریف می‌شود.

¹ Cap eccentricity



شکل ۲-۲: سطوح تسلیم مدل MDPC.

سخت شوندگی / نرم شوندگی وابسته به تنش تسلیم فشاری هیدرواستاتیک و کرنش مومسان متناظر با آن است. تنش تسلیم فشاری هیدرواستاتیک را می‌توان به صورت تابع کرنش حجمی مومسان بیان کرد [۲۵]:

$$p_b = f(\varepsilon_v^p) \quad (۶-۲)$$

کرنش حجمی مومسان به چگالی اولیه و چگالی پودر در حین فرآیند بستگی دارد و می‌توان آن را با رابطه‌ی (۷-۲) بیان کرد:

$$\varepsilon_v^p = \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \quad (۷-۲)$$

ε_v^p بیانگر کرنش حجمی مومسان، ρ و ρ_0 نیز به ترتیب چگالی فعلی و چگالی اولیه‌ی پودر هستند.

پارامتر تغییرشکل بر حسب سایر پارامترهای سطح کپ با استفاده از رابطه‌ی (۸-۲) به دست می‌آید:

$$p_a = \frac{p_b - Rd}{(1 + R \tan \beta)} \quad (۸-۲)$$

که p_b تنش تسلیم هیدرواستاتیک پودر است.

برای تعیین قانون جریان مومسان، پتانسیل مومسان با یک مولفه‌ی وابسته روی کپ و یک مولفه‌ی غیر وابسته روی نواحی خرابی و گذار تعریف شد. مولفه‌ی پتانسیل روی ناحیه‌ی کپ به صورت رابطه‌ی (۹-۲) بیان شده است [۲۰, ۲۵, ۲۶]:

$$G_c = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[\frac{Rq}{1 + \alpha - \alpha/\cos \beta} \right]^2} \quad (9-2)$$

مولفه‌ی مستقل در نواحی خرابی و گذار نیز به صورت رابطه‌ی (۱۰-۲) تعریف می‌شود:

$$G_s = \sqrt{[(p - p_a) \tan \beta]^2 + \left[\frac{q}{1 + \alpha - \alpha/\cos \beta} \right]^2} \quad (10-2)$$

این دو بخش بیضوی، سطح پتانسیل پیوسته و همواری را تشکیل می‌دهند.

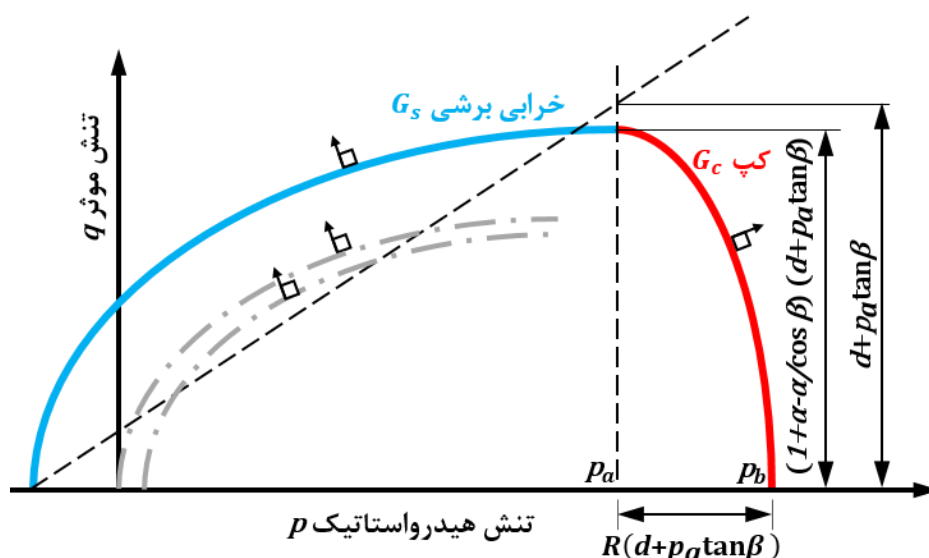
با در نظر گرفتن قانون جریان وابسته، نرخ کرنش مومسان را در ناحیه‌ی کپ می‌توان با استفاده از رابطه‌ی

(۱۱-۲) بیان کرد:

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial G_c}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda \frac{\partial F_c}{\partial \sigma_{ij}} \quad (11-2)$$

λ اندازه‌ی تغییرشکل مومسان و عددی مثبت و $\frac{\partial G_c}{\partial \sigma_{ij}}$ حاکی از جریان مومسان هستند. شکل ۳-۲ پتانسیل

جریان را در صفحه‌ی $p-q$ نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲: پتانسیل جریان مدل MDPC در صفحه‌ی $p-q$.

۳-۲- پارامترهای مدل رفتاری MDPC

پارامترهای مدل رفتاری MDPC برای پودر مورد نظر توسط آزمون‌های متعدد تعیین و به اصطلاح کالیبره می‌شوند. در این بخش تنها به بیان روابط تعیین کننده پارامترها پرداخته شده و به روند انجام آزمون‌ها در فصل بعد اشاره خواهد شد.

برای تعریف هر یک از سطوح تسلیم، شش پارامتر $\alpha, p_b, R, p_a, d, \beta$ باید به دست آیند. از میان این پارامترها R, d, β و p_a تابع چگالی نسبی هستند. زاویه‌ی اصطکاک β و چسبندگی d برای تعریف سطح خرابی برشی دراکر - پراگر ضروری‌اند. تعریف سطح کپ نیازمند دستیابی به دو پارامتر خروج از مرکز R و تغییرشکل p_a است. پارامتر p_b برای تعریف قانون سخت شوندگی / نرم شوندگی کپ استفاده خواهد شد. سطح گذار نیز توسط پارامتر α تعریف خواهد شد.

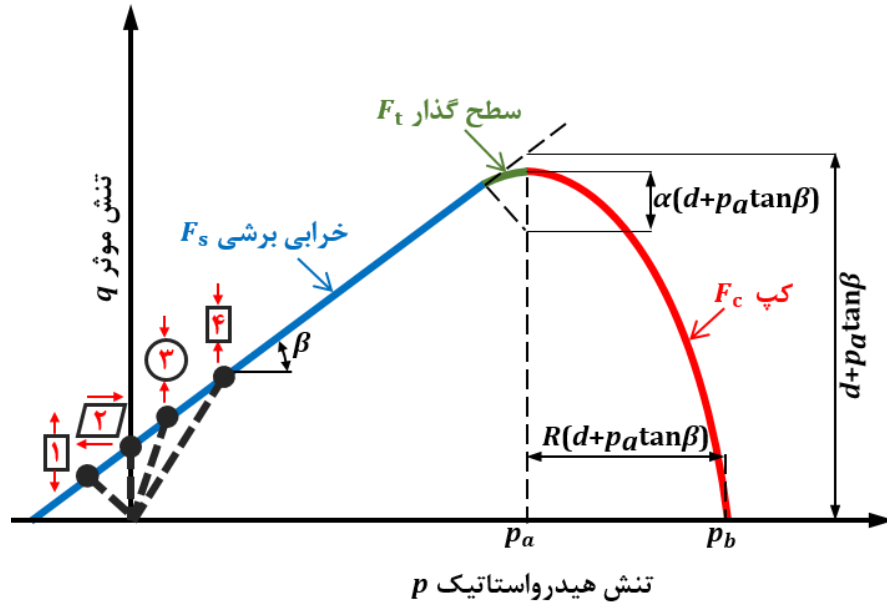
پارامترهای مدل MDPC را می‌توان با انجام آزمون تراکم سه‌محوری به دست آورد اما عدم دسترسی آسان به تجهیزات مورد نیاز این آزمون و گران‌قیمت بودن آن‌ها محققان را به یافتن راه‌های ساده‌تر و کم هزینه‌تر سوق داده است [۲، ۱۸، ۲۰، ۲۱].

۳-۲-۱ پارامترهای سطح خرابی برشی

سطح خرابی برشی مدل MDPC در صفحه‌ی $p-q$ ناحیه‌ای خطی است که عرض از مبدا آن چسبندگی پودر و شیب آن زاویه‌ی اصطکاک را بیان می‌کند. خط یاد شده با انجام آزمون‌های کشش تک‌محوری، برش خالص، آزمون دیسک برزیلین^۱ (فشردن قطری) و فشردن تک‌محوری برای اندازه‌گیری استحکام متراکم‌های پودری قابل تعیین است [۱۷، ۲۱، ۲۷]. این آزمون‌ها حداکثر نقاط بارگذاری را روی خط خرابی برشی در اختیار قرار می‌دهند. برای تعیین خط خرابی برشی انجام تنها دو آزمون از چهار آزمون یاد شده کافی بوده و دو نقطه را روی این خط مشخص می‌سازند. شکل ۲-۴ چگونگی تعیین این خط را با انجام آزمون‌های یاد شده

^۱ Brazilian disc test

نشان می‌دهد. هر کدام از آزمون‌های یاد شده نسبت تنش معادل میسر به تنش فشاری هیدرواستاتیک مشخصی را در صفحه‌ی $p-q$ دارند، این نسبت‌ها را می‌توان در جدول ۱-۲ مشاهده کرد.



شکل ۲-۴: تعیین خط خرابی برشی در صفحه‌ی $p-q$ با انجام آزمون‌های: ۱ کشش تک‌محوری، ۲ برش خالص، ۳ فشردن قطری، ۴ فشردن تک‌محوری.

استفاده از دو آزمون فشردن قطری و فشردن محوری برای دستیابی به پارامترهای ناحیه‌ی خطی خرابی برشی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفت است [۲، ۱۱، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۷-۳۲]. زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی می‌توانند به ترتیب با به دست آوردن شیب خط و محل تقاطع آن با محور تنش موثر به دست آیند. به دلیل عدم امکان ساخت نمونه‌های کشش تک‌محوری^۱ از مواد متخلخل پودری، انجام این آزمون برای این گونه مواد میسر نیست، از این رو برای اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه‌ها، از آزمون فشردن قطری که به نام‌های دیگری نظیر آزمون دیسک برزیلین و کشش غیرمستقیم^۲ نیز معروف است، استفاده می‌شود. در این آزمون، تنش کششی موضعی در جهت عکس تنش فشاری اعمالی به قطعه ایجاد می‌شود. این روش، به خاطر سادگی هندسه نمونه‌های آزمون و شرایط بارگذاری اش مورد توجه اغلب پژوهشگران قرار گرفته و در بسیاری

^۱ Dog bone shape

^۲ Indirect tensile test

از زمینه‌های فنی و مهندسی نظیر بتن، مواد مرکب فلزی، سرامیک‌ها و حتی مواد مورد استفاده در دندانپزشکی و داروسازی توسعه یافته است [۳۳].

جدول ۱-۲- نسبت p/q در آزمون‌های مختلف

$\frac{p}{q}$	آزمون
-۳	کشش تک‌محوری
∞	برش خالص
$(\sqrt{13})/2$	فشردن قطری
۳	فشردن تک‌محوری

هرتز [۳۳] عبارات ریاضی را برای توصیف حالت‌های تنش برای دیسک‌های کشسان و کره‌ها تحت فشردن قطری در شرایط بارگذاری متمرکز بسط داد (شکل ۲-۵).

$$\sigma_x = \frac{-2F_d}{\pi t} \left[\frac{x^2(r-y)}{((r-y)^2 + x^2)^2} + \frac{x^2(r+y)}{((r+y)^2 + x^2)^2} - \frac{1}{2r} \right] \quad (12-2)$$

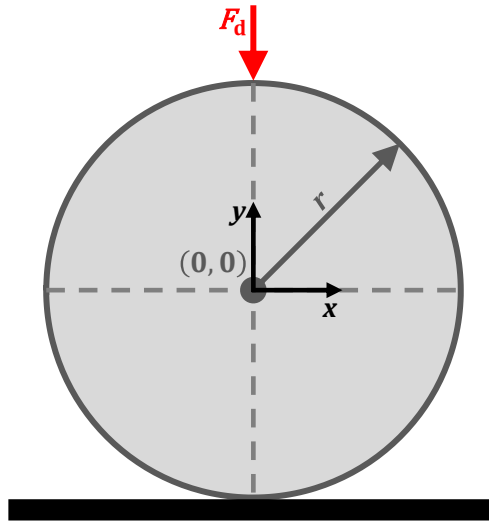
$$\sigma_y = \frac{-2F_d}{\pi t} \left[\frac{(r-y)^3}{((r-y)^2 + x^2)^2} + \frac{(r+y)^3}{((r+y)^2 + x^2)^2} - \frac{1}{2r} \right] \quad (13-2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{2F_d}{\pi t} \left[\frac{x(r-y)^2}{((r-y)^2 + x^2)^2} + \frac{x(r+y)^2}{((r+y)^2 + x^2)^2} \right] \quad (14-2)$$

بر اساس راه‌حل هرتز حداکثر تنش اصلی در مرکز دیسک رخ داده و در امتداد جهت x کششی است. با فرض اینکه حداکثر تنش اصلی کششی باعث خرد شدن و بروز خرابی در نمونه در امتداد خط مرکز نمونه می‌شود با جاگذاری $x = 0$ و $y = 0$ در رابطه‌ی (۱۲-۲) استحکام کششی به صورت رابطه‌ی (۱۵-۲) حاصل می‌شود [۲، ۱۸، ۲۱، ۲۷]:

$$\sigma_d = \frac{2F_d}{\pi D t} \quad (15-2)$$

σ_d استحکام کششی، F_d نیروی منجر به شکست نمونه، D و t به ترتیب قطر و ضخامت نمونه هستند.



شکل ۲-۵: طرحواره شرایط بارگذاری متمرکز بر روی دیسک استوانه‌ای.

هوندروس با اصلاح کار هرتز و با در نظر گرفتن اینکه نیرو به صورت توزیع نمونه اعمال می‌شود (شکل

۲-۶) روابط زیر را برای دستیابی به تنش‌ها ارائه کرد [۳، ۳۳]:

$$\sigma_x(0, y), \sigma_y(0, y)$$

$$= \pm \frac{2F_d}{\gamma \pi D t} \left[\frac{\left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \sin 2\gamma}{1 \mp \frac{2r_i^2}{r^2} \cos 2\gamma + \frac{r_i^4}{r^4}} \mp \tan^{-1} \left(\frac{1 \pm \frac{r_i^2}{r^2} \tan \gamma}{1 \mp \frac{r_i^2}{r^2}} \right) \right] \quad (16-2)$$

$$\sigma_x(x, 0), \sigma_y(x, 0)$$

$$= \mp \frac{2F_d}{\gamma \pi D t} \left[\frac{\left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \sin 2\gamma}{1 \mp \frac{2r_i^2}{r^2} \cos 2\gamma + \frac{r_i^4}{r^4}} \pm \tan^{-1} \left(\frac{1 \pm \frac{r_i^2}{r^2} \tan \gamma}{1 \mp \frac{r_i^2}{r^2}} \right) \right] \quad (17-2)$$

$$\tau_{xy}(0, y), \tau_{xy}(x, 0) = 0$$

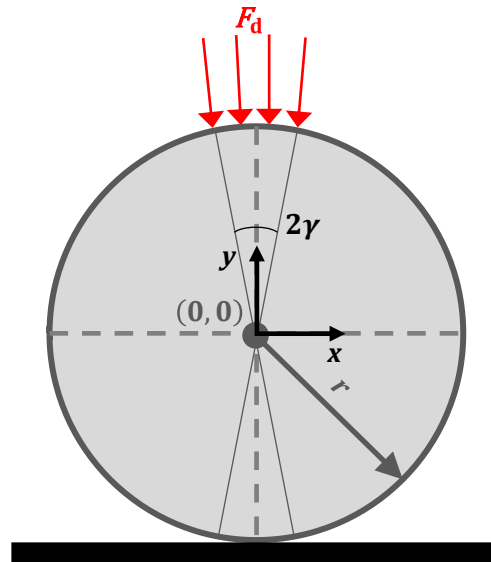
(18-2)

در مرکز دیسک، تنش در راستای x به صورت زیر است:

$$\sigma_x(0,0) = \frac{2F_d}{\gamma \pi D t} (\sin 2\gamma - \gamma) \quad (19-2)$$

برای مقادیر کوچک γ : $\sin 2\gamma = 2\gamma$ ، بنابراین:

$$\sigma_x(0,0) = \frac{2F_d}{\pi Dt} \quad (20-2)$$



شکل ۲-۶: طرح‌واره شرایط توزیع بارگذاری بر روی دیسک استوانه‌ای.

بنابراین در زاویه‌های بسیار کوچک، راه‌حل هوندروس با راه‌حل هرتز یکسان شده و معادله‌ی (۲۰-۲) به معادله‌ی (۱۵-۲) میل می‌کند. بر اساس راه‌حل هوندروس، توزیع نیرو بر حداکثر تنش کششی محاسبه شده تاثیر خواهد گذاشت و زاویه‌های توزیع بالاتر از 30° تفاوت قابل توجهی را با بارگذاری نقطه‌ای نشان می‌دهند [۳۳].

مقدار استحکام فشاری محوری نیز از رابطه‌ی (۲۱-۲) به دست می‌آید [۲، ۳، ۱۸، ۲۱]:

$$\sigma_c = \frac{4F_c}{\pi D^2} \quad (21-2)$$

F_c نیروی محوری منجر به شکست نمونه است.

همانطور که بیان شد سطح خرابی برشی دراکر - پراگر یک خط مستقیم است و می‌توان آن را با در اختیار داشتن دو نقطه روی آن تعریف کرد، این دو نقطه با دو آزمون فشردن قطری و فشردن محوری به دست

می‌آیند. نمونه در فشردن محوری در تنش‌های بالاتری نسبت به فشردن قطری دچار شکست و ترک شده و سطح بالاتری از تنش‌های هیدرواستاتیک و تنش میسر را عرضه می‌کند. معادلات (۲-۲۲) تا (۲-۲۵) تنش‌های هیدرواستاتیک و میسر را برای هر کدام از این آزمون‌ها بیان می‌کنند که این مقادیر مشخص‌کننده‌ی دو نقطه‌ای هستند که خط خرابی از آن گذشته و شیب آن برابر با زاویه‌ی اصطکاک و تقاطع آن با محور q در صفحه‌ی p - q بیانگر چسبندگی ماده است [۲, ۲۱, ۳۰]:

برای آزمون فشردن قطری:

$$p = \frac{2}{3}\sigma_d \quad (2-22)$$

$$q = \sqrt{13}\sigma_d \quad (2-23)$$

برای آزمون فشردن محوری نیز:

$$p = \frac{1}{3}\sigma_c \quad (2-24)$$

$$q = \sigma_c \quad (2-25)$$

بنابراین می‌توان زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی را بر حسب استحکام کششی و فشاری به صورت روابط (۲-۲۶) و (۲-۲۷) بیان کرد:

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{3(\sigma_c - \sqrt{13}\sigma_d)}{\sigma_c - 2\sigma_d} \right] \quad (2-26)$$

$$d = \left[\frac{\sigma_c \sigma_d (\sqrt{13} - 2)}{\sigma_c - 2\sigma_d} \right] \quad (2-27)$$

رابطه‌ی (۲-۲۸) بیانگر ارتباط زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی ماده است.

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{3(\sigma_c - d)}{\sigma_c} \right] \quad (2-28)$$

پارامترهای به دست آمده در معادلات (۲-۲۶) و (۲-۲۷) پارامترهای سطح خرابی یا به اصطلاح سطح دراگر - پراگر هستند که با ترکیب دو آزمون ساده قابل دستیابی هستند. پارامترهای سطح کپ با استفاده از یک قالب مجهز شده به حسگرهای کرنش‌سنج قابل تعیین و کالیبره شدن هستند.

۲-۳-۲ پارامترهای سطح کپ

حداقل سه آزمون فشردن هیدرواستاتیک و دو آزمون فشردن سه‌محوری یا یک آزمون فشردن سه‌محوری و یک فشردن تک‌محوری برای کالیبره کردن مدل کپ لازم است. در آزمون فشردن هیدرواستاتیک، نمونه از تمامی جهت‌ها در معرض فشار یکسان قرار گرفته و تغییرات فشار اعمالی و حجم ثابت می‌شوند. منحنی تنش - کرنش این آزمون، تغییرات تنش تسلیم هیدرواستاتیک را بر حسب کرنش حجمی مومسان می‌دهد. این تغییر و تحول برای تعریف منحنی سخت‌شوندگی ضروری است. در آزمون فشردن تک‌محوری، نمونه بین دو صفحه‌ی صلب فشرده می‌شود. نیرو و جابجایی در جهت بارگذاری و جابجایی جانبی ثابت شده و در نتیجه تغییرات صحیح حجم قابل کالیبره شدن است. آزمون تراکم سه‌محوری با استفاده از تجهیز استاندارد سه‌محوری انجام می‌شود. در این آزمون در حالی که تنشی متغیر اعمال شده، فشار محبوس ثابت نگه‌داشته می‌شود. برابرداری این آزمون‌ها برای کالیبره کردن ثوابت کشسانی قابل استفاده است [۲۵].

برای تعیین پارامترهای سطح کپ معمولاً از آزمون تراکم سه‌محوری استفاده شده است [۵-۷, ۱۵]. اما تجهیزات مورد نیاز به راحتی قابل دسترسی نبوده و هزینه‌های زیادی در پی دارد. از این رو پژوهشگران برای کالیبره کردن مدل MDPC به سوی راه‌حل‌های ساده و کم‌هزینه‌تر رفته‌اند. در مقایسه با آزمون سه‌محوری، انجام آزمون فشردن تک‌محوری با استفاده از قالب تجهیز شده [۳, ۱۲, ۱۸, ۲۱, ۲۲, ۲۷, ۲۹, ۳۴, ۳۵] به لحاظ سادگی تجهیزات، هزینه‌ی کمتر و سرعت بالاتر نسبت به نوع سه‌محوری بین محققان و صنایع ارجحیت داشته و به صورت وسیعی برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری ماده‌ی مورد نظر استفاده می‌شود. در آزمون قالب تجهیز شده، تنش شعاعی بین قالب و پودر اهمیت به‌سزایی در تعیین پارامترهای سطح کپ و حتی ضریب اصطکاک بین پودر و دیواره‌ی قالب دارد. در این باره در فصل آینده به‌طور کامل بحث خواهد شد.

برای تراکم تک‌محوری درون قالب استوانه‌ای تجهیز شده، تنش فشاری هیدرواستاتیک و تنش معادل

میسز با روابط (۲۹-۲) و (۳۰-۲) قابل بیان هستند [۱۸, ۲۱, ۲۶, ۳۰]:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_z + 2\sigma_r) \quad (29-2)$$

$$q = |\sigma_z - \sigma_r| \quad (30-2)$$

σ_r و σ_z به ترتیب تنش‌های محوری و شعاعی هستند.

تنش‌های محوری و شعاعی از طریق انجام آزمون تراکم تک‌محوری با استفاده از قالب تجهیز شده به دست

می‌آیند. تنش اعمالی از سنبه‌ی بالا و تنش منتقل شده به سنبه‌ی پایین به ترتیب با حاصل تقسیم نیروهای

اندازه‌گیری شده بر سطح مقطع سنبه‌ها به دست خواهند آمد (معادله (۳۱-۲) و (۳۲-۲)).

$$\sigma_{\text{Top}} = \frac{F_{\text{Top}}}{A} \quad (31-2)$$

$$\sigma_{\text{Bot}} = \frac{F_{\text{Bot}}}{A} \quad (32-2)$$

σ_{Bot} و σ_{Top} به ترتیب تنش بالا و پایین پودر و A نیز سطح مقطع آن درون قالب است.

پارامترهای کپ با انجام آزمون تراکم قالب برای چگالی‌های مختلف به دست می‌آیند. پارامترهای R و p_b

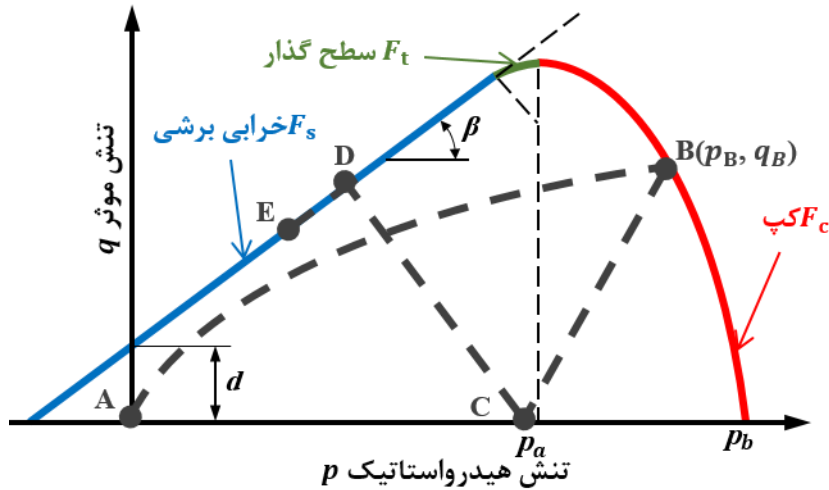
با تحلیل حالت تنش نقاط بارگذاری روی سطح کپ تعیین می‌شوند. مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی تنش‌های

محوری و شعاعی روی مسیر بارگذاری با استفاده از معادله‌ی (۲۹-۲) و (۳۰-۲) به تنش فشاری هیدرواستاتیک

و معادل میسز تبدیل می‌شوند. چنانچه در شکل ۷-۲ نشان داده شده است، نقطه‌ی B با مختصات (p_B, q_B)

روی سطح کپ قرار گرفته و تسلیم رخ می‌دهد، بنابراین خروج از مرکز ناحیه‌ی کپ به صورت تابعی از p_B و

q_B قابل بیان است (معادله‌ی (۳۳-۲)).



شکل ۲-۷: مسیر بارگذاری آزمون تراکم قالب تجهیز شده.

$$R = \sqrt{\frac{2(1 + \alpha - \alpha/\cos \beta)^2}{3q_B} p_B - p_a} \quad (۳۳-۲)$$

در نتیجه، پارامتر تغییرشکل p_a نیز به صورت معادله‌ی (۳۴-۲) نوشته خواهد شد.

$$p_a = -\frac{[3q_B + 4d \tan \beta (1 + \alpha - \alpha/\cos \beta)^2]}{4[(1 + \alpha - \alpha/\cos \beta) \tan \beta]^2} + \frac{\sqrt{9q_B^2 + 24dq_B(1 + \alpha - \alpha/\cos \beta)^2 \tan \beta}}{4[(1 + \alpha - \alpha/\cos \beta) \tan \beta]^2} + \frac{\sqrt{8(3p_B q_B + 2q_B^2)[(1 + \alpha - \alpha/\cos \beta) \tan \beta]^2}}{4[(1 + \alpha - \alpha/\cos \beta) \tan \beta]^2} \quad (۳۴-۲)$$

پارامتر α دارای مقداری کوچک بین ۰/۰۱ و ۰/۰۵ بوده و برای گذار ملایم از سطح خرابی برشی به سطح کپ تعریف می‌شود. پارامترهای خروج از مرکز کپ و تغییرشکل به ترتیب از معادلات (۳۳-۲) و (۳۴-۲) به دست آمده و در نهایت با جاگذاری این پارامترها در رابطه‌ی (۸-۲)، تنش تسلیم هیدرواستاتیک به دست خواهد آمد.

۲-۳-۳ پارامترهای کشسان ماده

مدول یانگ و نسبت پواسون از پارامترهای ضروری مدل MDPC هستند که با مدول حجمی و مدول برشی ارتباط دارند. مدولهای حجمی و برشی، رفتار کشسان را به ترتیب تحت فشار هیدرواستاتیک و تنش برشی بیان می‌کنند، ارتباط این پارامترها با یکدیگر در معادلات (۲-۳۵) و (۲-۳۶) بیان شده است [۱۸، ۲۱]:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۲-۳۵)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۲-۳۶)$$

در این روابط، E ، K ، G و ν به ترتیب مدول برشی، حجمی، یانگ و نسبت پواسون هستند. در ناحیه‌ی کشسان، رفتار ماده‌ی همسانگرد با قانون نموی هوک معین می‌شود [۳]:

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{dI_1}{9K} \delta_{ij} + \frac{ds_{ij}}{2G} \quad (۲-۳۷)$$

که $d\varepsilon_{ij}^e$ نمو کرنش کشسان، I_1 نامتغیر اول تنش، $s_{ij} = \sigma_{ij} - \left(\frac{I_1}{3}\right) \delta_{ij}$ تنسور تنش انحرافی و δ_{ij} دلتای کرونیکر است.

بنابراین برای کرنش محوری می‌توان نوشت:

$$d\varepsilon_z = \frac{d\sigma_z + 2d\sigma_r}{3K} = \frac{dI_1}{3K} = \frac{dp}{K} \quad (۲-۳۸)$$

$$d\varepsilon_z = \frac{d\sigma_z - d\sigma_r}{2G} = \frac{dq}{2G} \quad (۲-۳۹)$$

برای آزمون تراکم قالب تک‌محوری، نمو کرنش و نمو کرنش کشسان طی باربرداری به صورت رابطه‌ی (۲-۴۰)

(۴۰) قابل بیان است:

$$d\sigma_z = \left(K + \frac{3}{4}G \right) d\varepsilon_z \quad (40-2)$$

و رابطه‌ی بین نمو تنش محوری و نمو تنش شعاعی نیز مطابق معادله‌ی (۴۱-۲) بیان می‌شود.

$$d\sigma_z = \frac{3K + 4G}{3K - 2G} d\sigma_r \quad (41-2)$$

سپس نسبت پواسون و مدول کشسانی می‌توانند به صورت توابعی بر حسب چگالی نسبی به ترتیب از منحنی‌های باربرداری تنش شعاعی - تنش محوری و کرنش محوری - تنش محوری به دست آیند [۱۸, ۲۱]. معادلات (۴۲-۲) و (۴۳-۲) ارتباط خصوصیات کشسان ماده را با منحنی‌های یاد شده نشان می‌دهند که از جاگذاری روابط (۳۵-۲) و (۳۶-۲) در روابط (۴۰-۲) و (۴۱-۲) حاصل شده‌اند:

$$\frac{d\sigma_z}{d\sigma_r} = \frac{1 - \nu}{\nu} \quad (42-2)$$

$$\frac{d\sigma_z}{d\varepsilon_z} = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (43-2)$$

۲-۳-۴ ضریب اصطکاک بین دیواره‌ی قالب و پودر

حین تراکم پودر اصطکاک بین دیواره‌ی قالب و پودر موجب گرادیان‌های غیر یکنواخت تنش محوری در پودر شده و به تبع آن موجب بروز گرادیان‌های چگالی در سطوح مختلف آن خواهد شد، بنابراین اصطکاک نقش برجسته‌ای در تولید قطعات از پودرها دارد. می‌توان ضریب اصطکاک را بر مبنای تئوری جانسن-واکر^۱ [۳, ۱۷, ۱۸, ۲۱, ۲۷] از معادله‌ی (۴۴-۲) محاسبه کرد:

$$\mu = \frac{D}{4H} \frac{\sigma_{Bot}}{\sigma_r} \left(\frac{\sigma_{Top}}{\sigma_{Bot}} \right)^{\frac{z}{H}} \ln \left(\frac{\sigma_{Top}}{\sigma_{Bot}} \right) \quad (44-2)$$

^۱ Janssen-Walker

که D و z , H , σ_r , σ_{Bot} , σ_{Top} به ترتیب تنش در سنبه‌های بالا و پایین، تنش شعاعی، ارتفاع نمونه، فاصله‌ی حسگر از سنبه‌ی پایین و قطر نمونه هستند.

پارامترهای مورد نیاز برای تعریف مدل MDPC توسط آزمون‌هایی که در فصل پیش رو ذکر خواهند شد قابل دستیابی هستند.

۲-۴- شبیه‌سازی المان محدود فرآیند تراکم تک‌محوری پودر

ساخت دقیق قطعات در متالورژی پودر نیازمند شناخت دقیق خصوصیات و رفتار پودرها تحت اثر تراکم است. به همین دلیل محققان همواره به دنبال روش‌هایی برای پی بردن به رفتار این مواد در اثر اعمال فشار بوده‌اند تا طراحی قالب و نحوه‌ی بارگذاری خود را بهبود بخشند. در گذشته برای این منظور پژوهشگران ناگزیر به آزمون و خطا بوده‌اند، این عمل مستلزم صرف زمان و هزینه‌ی قابل توجهی بوده و امروزه در جوامع علمی و صنعتی با اقبال مواجه نیست. با گسترش علم و فناوری، نرم‌افزارهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی متعددی برای سهولت کار پژوهشگران عرضه شده‌اند. استفاده از این نوع نرم‌افزارها نیاز به آزمون و خطا را مرتفع کرده و در نتیجه از ضرورت انجام آزمون‌های متعدد و صرف زمان و هزینه‌ی زیاد کاسته است.

در این پایان‌نامه از نرم‌افزار تجاری آباکوس ۲-۱۴-۱۶^۱ برای انجام مدل‌سازی عددی استفاده شده است. شبیه‌سازی فرآیند تراکم پودر توسط حل گر استاندارد^۲ نرم‌افزار انجام شده است. تغییرات توزیع چگالی نسبی با استفاده از زیر برنامه‌ی USDFLD بیان و جهت انجام شبیه‌سازی به کار رفته است. پودر به صورت محیط پیوسته در نظر گرفته شده و فرآیند تراکم تک‌محوری به خاطر هندسه‌اش به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است.

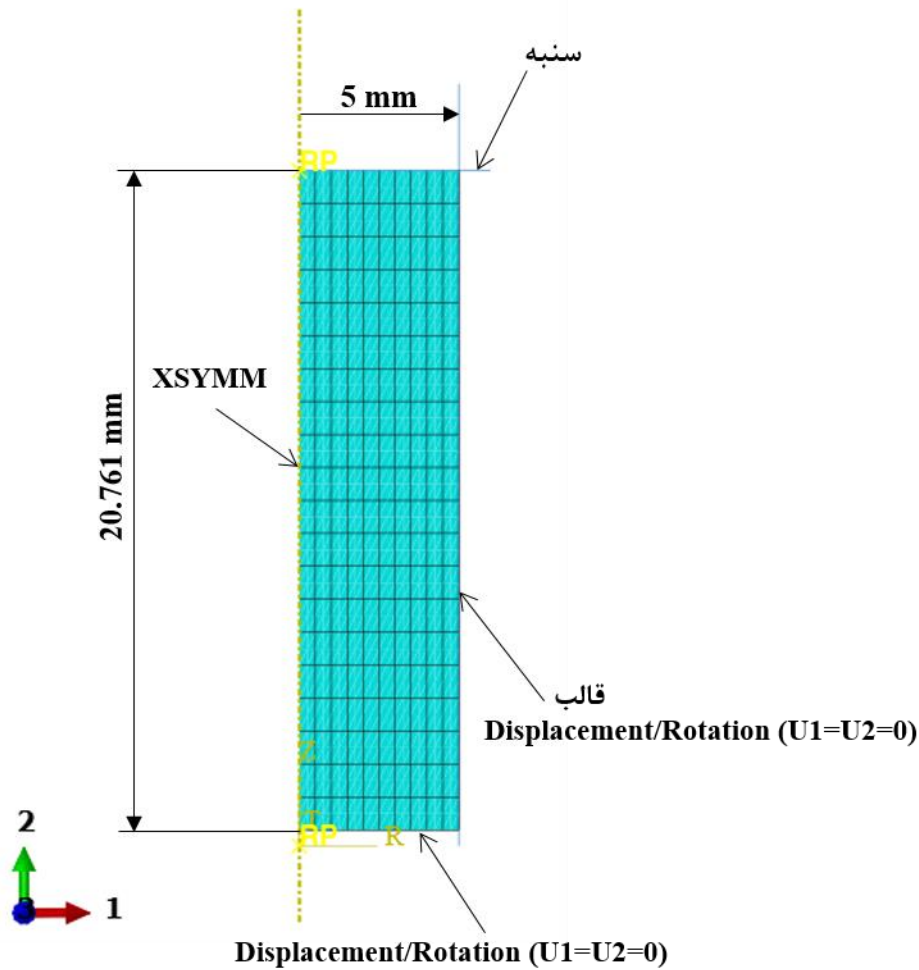
^۱ Abaqus/CAE 6-14-2

^۲ Abaqus `

برای شبیه‌سازی فرایند بارگذاری - باربرداری چند مرحله‌ای، قالب و سنبه به صورت صلب تحلیلی^۱ و پودر به صورت تغییرشکل‌پذیر با المان‌های هشت گره‌ای CAX8R مدل شده‌اند، این المان‌ها از نوع پیوسته‌ی متقارن محوری درجه‌ی چهارم^۲ هستند. شعاع داخلی قالب ۵ mm و ارتفاع اولیه‌ی پودر ۲۰/۷۶۱ mm در نظر گرفته شده است. خصوصیات مومسان و کشسان ماده به دست آمده از آزمون‌ها برای مدل MDPC برای انجام شبیه‌سازی به نرم‌افزار اعمال شدند. در مجموع شش مرحله شبیه‌سازی بارگذاری - باربرداری مطابق با آزمون تجربی انجام می‌شود. مطابق شکل ۲-۸ شرایط مرزی قطعه‌های صلب در نقطه‌ی مرجع مربوط به آنها اعمال شده به طوری که قالب و کف پودر هیچ حرکتی در جهت ۱ و ۲ و حرکت دورانی در راستای ۳ نداشته و بخش خط تقارن در جهت ۱ جابجایی و در جهت‌های ۲ و ۳ امکان دوران ندارد. سنبه فقط در راستای جهت ۲ قابلیت جابجایی دارد. در هر مرحله با حرکت سنبه‌ی بالایی به مقدار مشخص به سمت پایین و متراکم شدن پودر، جابجایی و نیروی اعمالی از سنبه به عنوان خروجی محاسبه و ثبت شده و در نهایت با نتایج حاصل از آزمون تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

^۱ Analytical rigid

^۲ Biquadratic



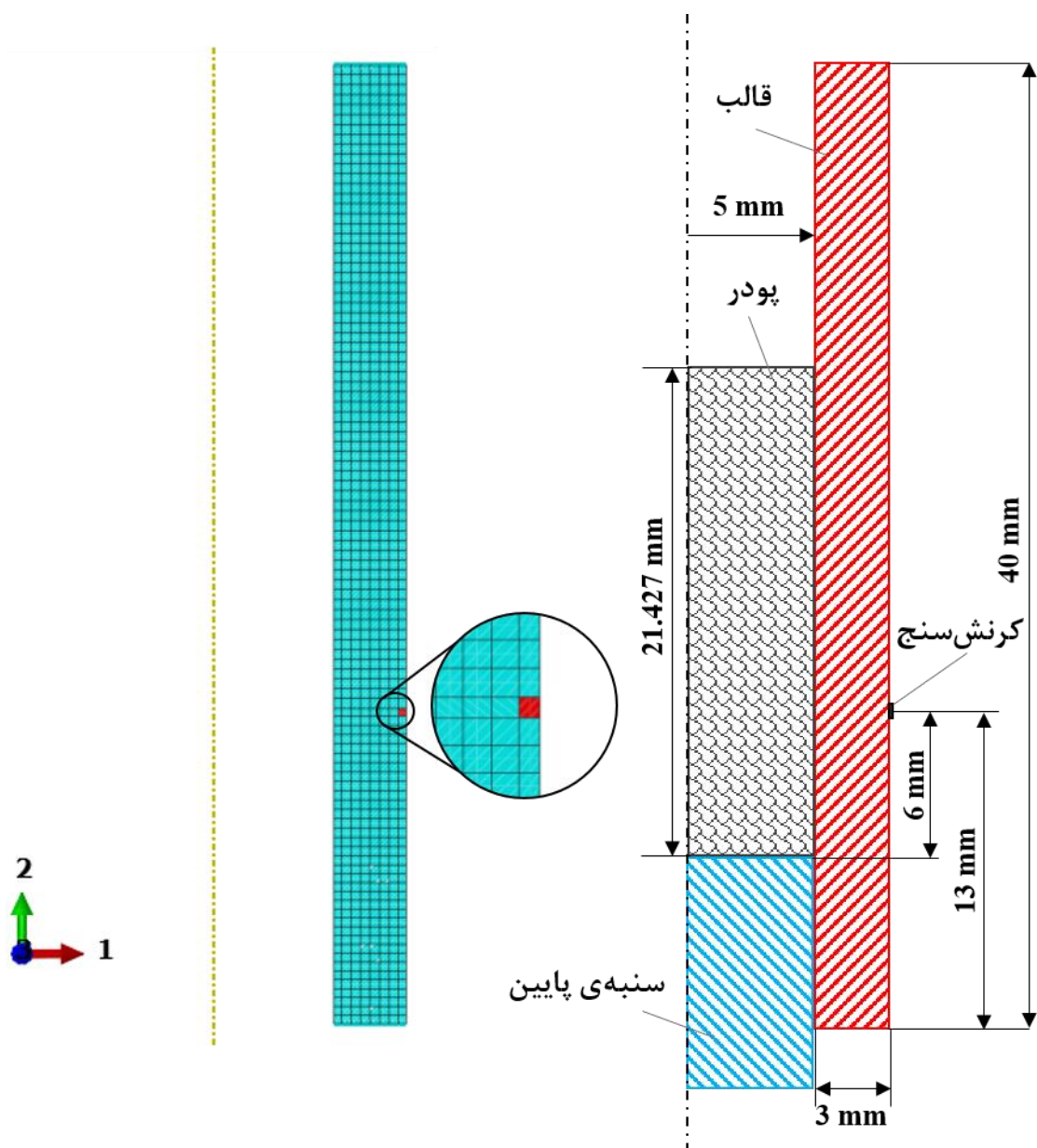
شکل ۲-۸ شبکه‌بندی و شرایط مرزی شبیه‌سازی المان محدود برای فشردن تک‌محوری چند مرحله‌ای.

۲-۵- صحت‌سنجی اندازه‌گیری کرنش محیطی

تنش شعاعی اعمالی به دیواره‌ی قالب عاملی حیاتی در تعیین پارامترهای مدل رفتاری است. حین تراکم ارتفاع پودر با فشار به طور پیوسته در حال تغییر است [۲۱]. از آنجایی که در پژوهش حاضر تنش شعاعی از کرنش محیطی اندازه‌گیری شده محاسبه شده است، دستیابی به ارتباط بین تنش شعاعی وارد بر سطح داخلی و کرنش محیطی سطح خارجی قالب با ارتفاع نمونه ضروری است.

شبیه‌سازی المان محدود برای محاسبه‌ی کرنش محیطی سطح خارجی قالب با فشار در حال تغییر حین کاهش ارتفاع پودر با استفاده از حل گر استاندارد نرم‌افزار آباکوس انجام شد. قالب از جنس فولاد به صورت متقارن محوری تغییرشکل‌پذیر با ارتفاع ۴۰ mm و به ترتیب با شعاع داخلی و ضخامت ۵ و ۳ mm با مدول

یانگ 202 GPa و ضریب پواسون $0/3$ با المان‌های پیوسته‌ی متقارن محوری CAX8R مدل و شبکه‌بندی شد. زیر برنامه‌ی DLOAD برای بیان فشار درون قالب به صورت تابعی از جابجایی سنبه‌ی بالایی استفاده شده است. این زیر برنامه می‌تواند برای تعیین تغییرات اندازه‌ی بار گسترده به صورت تابعی از موقعیت، زمان و ... استفاده شود [۲۵]. ارتفاع اولیه و نهایی پودر به ترتیب $21/427$ و $11/627 \text{ mm}$ دقیقاً مشابه با آزمون تک‌محوری انجام شده بوده و رابطه‌ی فشار با جابجایی نیز از داده‌های همین آزمون محاسبه و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. یک المان در موقعیتی که کرنش‌سنج در آزمون تجربی روی قالب نصب شده است به عنوان حسگر انتخاب شده و خروجی کرنش برای آن محاسبه و ثبت شد. در نهایت ارتباط بین تنش شعاعی و کرنش محیطی به دست آمده از شبیه‌سازی با ارتفاع با نتایج به دست آمده از آزمون مقایسه شدند. شکل ۲-۹ شبکه‌بندی و طرح‌واره قالب به کار رفته را نشان می‌دهد. المان انتخاب شده به عنوان کرنش‌سنج نیز مشخص شده است.



شکل ۲-۹: شبکه‌بندی مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی فشار داخلی وابسته به جابجایی.

۲-۶- اصول تعیین پارامترهای مدل MDPC با شبکه‌های عصبی مصنوعی

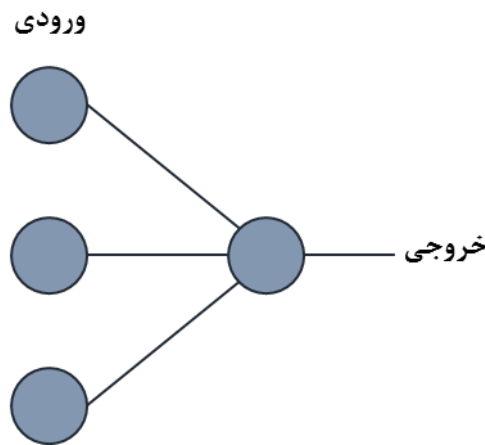
در این بخش به معرفی روش تعیین پارامترهای مدل MDPC به کمک شبکه‌ی عصبی^۱ مصنوعی پرداخته

می‌شود.

^۱ Artificial neural network (ANN)

۲-۶-۱ مقدمه‌ای بر شبکه‌های عصبی

شبکه‌ی عصبی مصنوعی الگویی برای پردازش اطلاعات با تقلید از سیستم زیست‌شناختی مغز انسان است. این سیستم دارای عناصر زیادی است که کاملاً قدرتمند و هماهنگ با یکدیگر برای حل مسائل خاص در ارتباط هستند. از این عناصر به عنوان نرون^۱ یاد می‌شود. وظیفه‌ی نرون‌ها ارسال و دریافت اطلاعات از سلول‌های دیگر است. اطلاعات ارسالی به نرون‌ها تحت عنوان ورودی و اطلاعات خارج شده از آن به عنوان خروجی شناخته می‌شوند. شکل ۲-۱۰ یک مدل ساده از نرونی را که ورودی را از سایر نرون‌ها گرفته و خروجی مرتبط را ارسال می‌کند، نشان می‌دهد. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود سه نرون اطلاعات را به یک نرون ارسال کرده و یک خروجی از تک نرون بیرون می‌آید.



شکل ۲-۱۰: ساختار یک نرون مصنوعی با چند ورودی و یک خروجی.

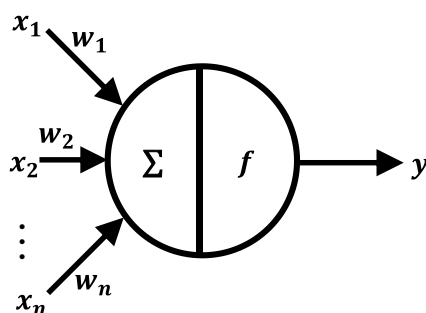
ساده‌ترین نوع مدل‌سازی نرون، پرسپترون^۲ است. یک پرسپترون قادر به داشتن چند ورودی و چند خروجی است. هر کدام از این ورودی‌ها دارای اهمیت منحصر به فردی هستند که تحت عنوان وزن^۳ شناخته می‌شود. به عنوان مثال ممکن است یک ورودی نسبت به سایر ورودی‌ها تاثیر بیشتری بر روی نرون و خروجی بگذارد در نتیجه وزنی که به آن اختصاص می‌یابد نسبت به سایرین بیشتر خواهد بود. شکل ۲-۱۱ یک پرسپترون را

^۱ Neuron

^۲ Perceptron

^۳ Weight

همراه با تمامی بخش‌هایش نشان می‌دهد. با توجه به شکل هر ورودی به نرون با وزنی همراه است. ورودی مورد نظر در وزن مربوط به خود ضرب شده و در بخشی از نرون با حاصل ضرب سایر ورودی‌ها با وزن متناظرشان جمع می‌شود. اطلاعات این مجموع حاصل ضرب در نرون ذخیره شده و سپس بخش دیگر نرون که تصمیم‌گیرنده اصلی در مورد فعال شدن آن است دست به کار شده و با پردازش روی داده‌ی ذخیره شده اقدام به تولید و ارسال خروجی می‌کند. به این بخش از نرون تابع انتقال (فعال‌سازی)^۱ گفته می‌شود.



شکل ۲-۱۱: ساختار یک پرسپترون.

رابطه‌ی (۲-۴۵) بیانگر ارتباط خروجی با ورودی‌ها و وزن‌های متناظرشان است.

$$y = f \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i \right) \quad (۲-۴۵)$$

که x_i ورودی، w_i وزن متناظر با ورودی، n تعداد ورودی‌ها و y خروجی و f نیز تابع انتقال هستند. رابطه‌ی به دست آمده ضرب نقطه‌ای^۲ دو بردار بوده و در نتیجه حاصل آن، یک مقدار خواهد بود. از سوی دیگر چنانچه بیان شد، تابع انتقال تعیین‌کننده‌ی فعال شدن نرونی خاص در شبکه است. فعال شدن نرون به حاصل این ضرب بستگی دارد، اگر این حاصل از یک مقدار بیشتر باشد نرون فعال خواهد شد. به مقدار مورد نظر مقدار آستانه^۳ گفته می‌شود [۳۶]. برای مثال تابع پرسپترون، یک تابع انتقال خطی و دارای مقادیر خروجی ۱

^۱ Transfer (activation) function

^۲ Scalar product

^۳ Threshold

و ۰ است. اگر حاصل ضرب ورودی‌های نرون مورد نظر در وزن‌های متناظرشان بیشتر از مقدار آستانه باشد خروجی ۱ و اگر کمتر از این مقدار باشد خروجی ۰ خواهد بود. این مقدار آستانه، انحراف^۱ نام داشته و با $-b$ نمایش داده می‌شود. روابط (۲-۴۶) و (۲-۴۷) نشان دهنده‌ی ارتباط انحراف و ضرب نقطه‌ای ورودی‌ها و وزن‌ها هستند.

$$\text{خروجی} \begin{cases} 0, w \cdot x \leq -b \\ 1, w \cdot x > -b \end{cases} \quad (۲-۴۶)$$

$$\text{خروجی} \begin{cases} 0, w \cdot x + b \leq 0 \\ 1, w \cdot x + b > 0 \end{cases} \quad (۲-۴۷)$$

۲-۶-۲ شبکه‌های عصبی چند لایه

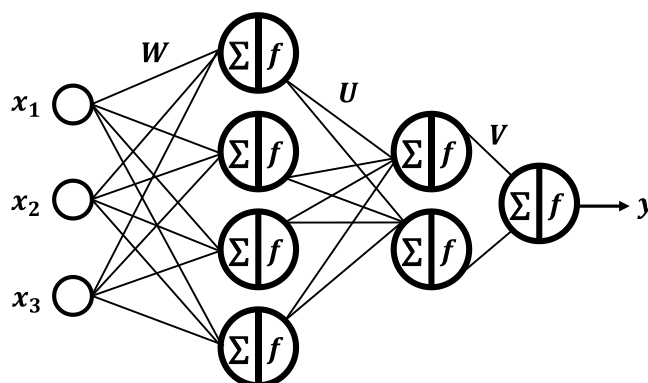
یک پرسپترون به خوبی قابلیت حل مسائل ساده را دارد، اما همه‌ی مسائلی که باید حل شوند ساده نبوده و پیچیدگی‌های خاص خود را دارند. در این حالت، تک پرسپترون کارایی خود را برای حل مسأله از دست می‌دهد. از این رو برای حل مسائل پیچیده‌تر شبکه‌های عصبی چند لایه مطرح شدند. همانطور که از نام این شبکه مشخص است ساختار آن از چند لایه و هر کدام از این لایه‌ها از تعدادی نرون تشکیل شده‌اند. در این شبکه ورودی به واسطه‌ی حداقل یک لایه‌ی موسوم به لایه‌ی مخفی^۲ به لایه‌ی خروجی منتقل می‌شود. لایه‌ی مخفی عملیات پردازش را بر روی ورودی انجام داده و به واسطه‌ی تابع انتقال خود داده‌ی پردازش شده را به خروجی ارسال می‌کند.

ساختار یک شبکه‌ی عصبی چند لایه با دو لایه‌ی مخفی و یک لایه‌ی خروجی در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. سیگنال ورودی به نرون‌های لایه‌ی مخفی اول ارسال شده و در آنجا مجموع حاصل ضرب هر ورودی با وزن متناظرشان در نرون‌ها ذخیره می‌شود. نرون‌های موجود در این لایه با اعمال تابع انتقال به داده‌های

^۱Bias

^۲ Hidden layer

ذخیره شده، خروجی متناظر را تولید می‌کنند. در مرحله‌ی بعد خروجی‌های حاصل از لایه‌ی مخفی اول به عنوان سیگنال ورودی برای نرون‌های لایه‌ی مخفی دوم ارسال می‌شوند. در این مرحله نیز هر کدام از این ورودی‌های جدید دارای وزن منحصر به فرد هستند. مانند مرحله‌ی قبل هر ورودی در وزن مختص خودش ضرب شده و در نرون مورد نظر ذخیره و سپس با تابع انتقال این لایه به لایه‌ی خروجی ارسال خواهد شد. نحوه‌ی ذخیره‌سازی ورودی‌ها و انتقال آن‌ها به عنوان خروجی مانند مراحل پیشین است. به این خاطر که در سرتاسر شبکه هر لایه وظیفه‌ی تغذیه‌ی ورودی لایه‌ی بعد خود را دارد به این نوع شبکه‌ها، شبکه‌ی پیش‌خور^۱ گفته می‌شود. در این شبکه‌ها هر لایه قادر به داشتن هر نوع تابع انتقال دلخواه هستند.



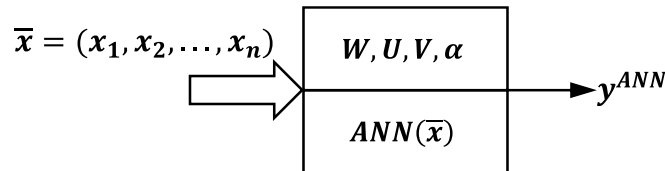
شکل ۲-۱۲: ساختار لایه‌های یک شبکه‌ی عصبی.

از شبکه‌های پایه و ساده‌ی شبکه عصبی پیش‌خور می‌توان به شبکه‌ی عصبی پرسپترون چند لایه اشاره کرد. در این نوع شبکه‌ها تابع انتقال لایه‌ها تابع خطی پرسپترون است. توابع انتقال خطی در حل مسائل پیچیده‌تر امکان پیش‌بینی نادرست را دارند. از این رو برای حل این مسائل از توابع انتقال غیر خطی در لایه‌ها استفاده می‌شود.

یک شبکه‌ی عصبی ساختاری متشکل از چند لایه نرون در کنار یکدیگر است و می‌توان آن را به صورت نگاشتی از فضای ورودی به فضای خروجی توصیف کرد که این مفهوم هم‌ارز با یک تابع ریاضی است، پس هدف یک شبکه عصبی نگاشت ورودی به خروجی دلخواه است [۳۶]. یک تابع با انجام عملیاتی روی ورودی‌ها،

^۱ Feedforward network

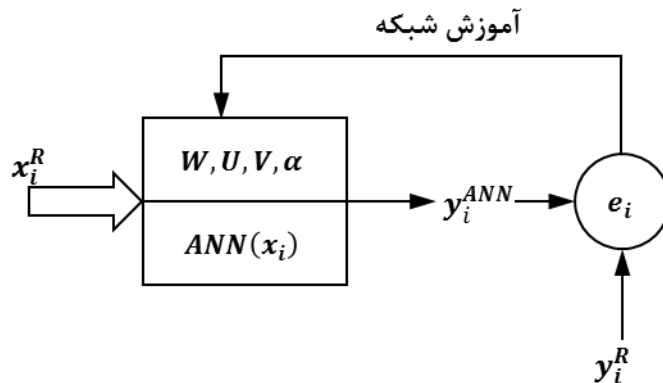
خروجی مورد نظر را محاسبه می‌کند. مفهوم این تابع در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است. حاصل ضرب بردار \bar{x} در ماتریس‌های وزن مربوط به هر لایه (W, U, V) وارد تابع $ANN(\bar{x})$ شده و خروجی مورد نظر محاسبه می‌شود. α پارامتر توابع انتقال لایه‌ها است.



شکل ۲-۱۳: بیان شبکه‌ی عصبی به صورت تابع.

۲-۶-۳ آموزش شبکه‌ی عصبی

چنانچه وزن هر ورودی در اختیار باشد، خروجی مورد نظر به دست خواهد آمد. هنگامی که داده‌های ورودی و هدف معلوم به شبکه داده می‌شود، وزن مربوط به ورودی‌ها مجهول بوده و در واقع با آموزش شبکه برای هر ورودی وزنی تخمین زده می‌شود. هر بار آموزش شبکه منجر به خروجی شبکه خواهد شد. اساس کار آموزش در این مرحله نمود پیدا می‌کند، شبکه خروجی‌های حاصل از خود را با خروجی‌های معلومی که پیش‌تر گرفته مقایسه کرده و میزان تفاوت این دو را محاسبه می‌کند. این میزان خطا برای تنظیم مجدد و بهبود وزن ورودی‌ها در آموزش دوباره‌ی شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. آموزش شبکه تا زمانی که میزان خطا حداقل‌ترین ممکن شود ادامه خواهد یافت. از این رو از منظر بهینه‌سازی تابع هدف در این فرایند حداقل شدن مجموع میزان خطاها و یافتن بهترین حالت وزن ورودی‌ها خواهد بود. شکل ۲-۱۴ نشانگر مفهوم آموزش شبکه است.



شکل ۲-۱۴: طرح‌واره آموزش شبکه‌ی عصبی.

تابع هدف به صورت رابطه‌ی (۲-۴۸) بیان می‌شود.

$$J = \sum_{i=1}^n (e_i)^2 \quad (۲-۴۸)$$

J تابع هدف، e_i میزان اختلاف خروجی حاصل از شبکه با مقدار واقعی هدف و n تعداد ورودی‌های شبکه است.

بهترین حالت‌های W, U, V منجر به مقدار حداقل J شده و با W^*, U^*, V^* نشان داده می‌شوند.

به این مفهوم که شبکه، خروجی حاصل از خود را با هدف مقایسه کرده و با استفاده از میزان تفاوت آنها برای بهبود وزن ورودی‌ها سعی بر آموزش درست خود دارد، الگوریتم پس انتشار^۱ گفته می‌شود. همانطور که گفته شد این الگوریتم تا به دست آمدن بهترین وزن ممکن برای ورودی‌ها آموزش را تکرار می‌کند. مفاهیمی که بیان شدند اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی بودند. در این بخش به روشی نوین اشاره خواهد شد که به کمک یک آزمون ساده‌ی تک‌محوری و شبکه‌ی عصبی مصنوعی پارامترهای مدل رفتاری MDPC برای پودرهای مشابه با پودر مورد استفاده برای آزمون تراکم تک‌محوری با قالب تجهیز شده به دست آیند.

۲-۷- رویکرد تعیین پارامترهای مدل MDPC با شبکه‌های عصبی

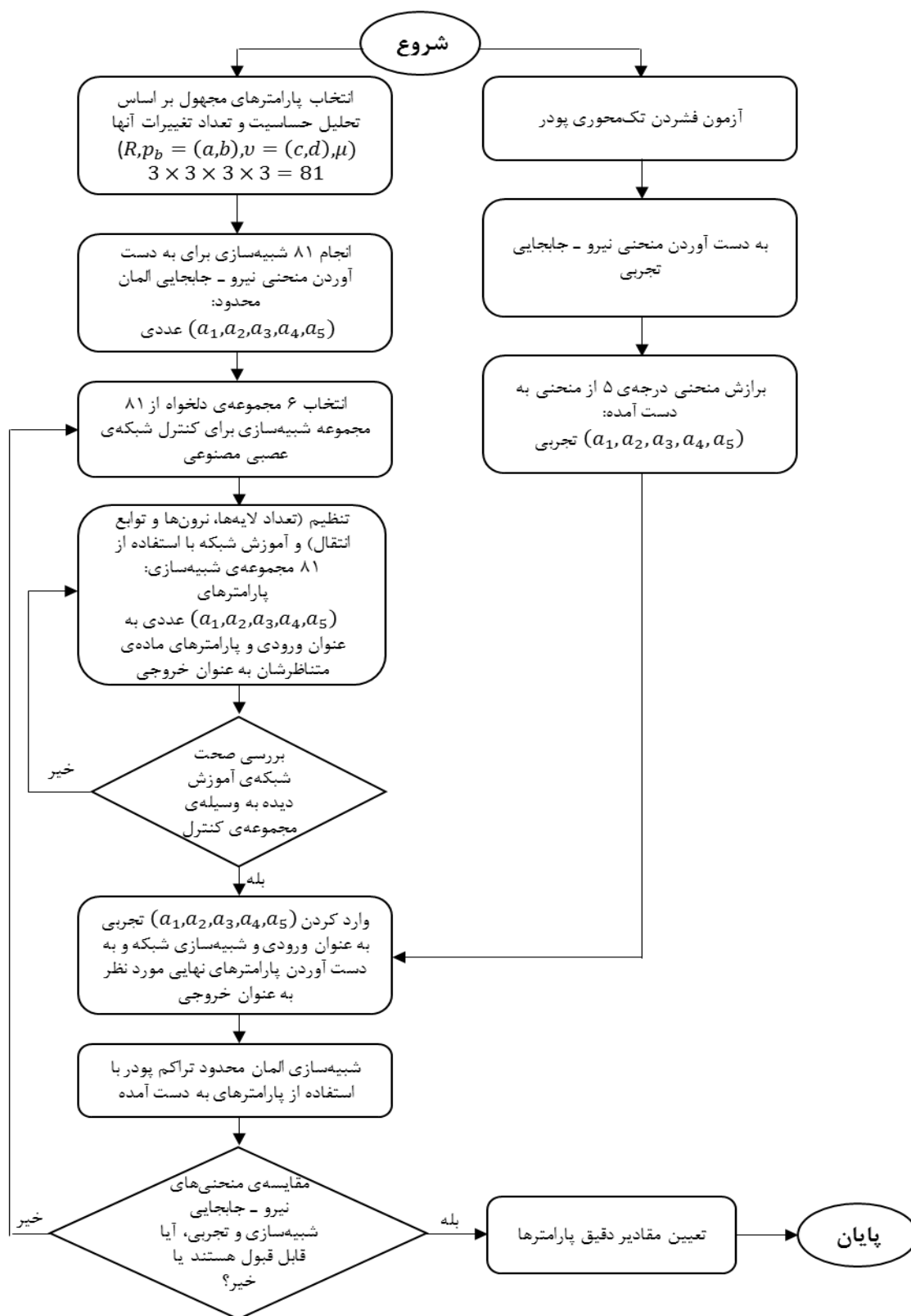
منحنی نیرو - جابجایی به دست آمده از آزمون تراکم تک‌محوری پودر به رفتار اصطکاکی و کشسان - مومسان پودر بستگی دارد. این ارتباط با استفاده از روش شبکه عصبی قابل دستیابی است [۲۳].

پارامترهای مدل MDPC، نسبت پواسون و ضریب اصطکاک با روشی جدید برای پودرهای مشابه با پودر مورد استفاده در آزمون تراکم تک‌محوری با قالب تجهیز شده تعیین شدند. بنا بر تحلیل حساسیت پارامترهای کپ تنش تسلیم هیدرواستاتیک و خروج از مرکز کپ، نسبت پواسون و ضریب اصطکاک به عنوان پارامترهای مجهول انتخاب شدند. در پژوهشی که پیش‌تر با استفاده از همین روش انجام شده بود مدول یانگ خطی و

^۱ Backpropagation

وابسته به تغییرات چگالی و سایر پارامترها مستقل از چگالی در نظر گرفته شده بودند [۲۳]، حال آنکه در واقع اغلب پارامترهای مدل MDPC با تغییر چگالی، تغییرات قابل توجهی دارند. برای این منظور پارامترهای سطح خرابی برشی یعنی چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک و نیز مدول یانگ به دلیل پیچیدگی رفتاری که از خود نشان داده معلوم و تابع چگالی نسبی در نظر گرفته شده‌اند و از آزمون‌های انجام شده برای پودر KMS-92 که در فصل بعد اشاره شده به دست آمده‌اند. پارامتر کرنش مومسان اولیه $\varepsilon_{pl}|_0$ دارای مقدار بسیار کوچک دلخواه بوده و ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. تغییرات پارامترهای گذار α و نرخ تنش جریان K_{flow} تاثیر چندانی بر نیروی حداکثر نداشته و به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۱ در نظر گرفته می‌شوند [۲۳]. برای به دست آوردن سایر پارامترها محدوده‌ای پیرامون مقادیر به دست آمده از آزمون قالب تجهیز شده برای هر پارامتر تعریف شد.

تنش تسلیم هیدرواستاتیک به صورت تابعی از کرنش حجمی مومسان که با رابطه‌ی $p_b = a \cdot \exp(b\varepsilon_v^p)$ و نسبت پواسون به صورت تابع توانی از چگالی نسبی با رابطه‌ی $\nu = c \cdot \rho_{rel}^d$ با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون قالب تجهیز شده بیان شدند. خروج از مرکز R و ضریب اصطکاک μ مستقل از چگالی نسبی و به صورت محدوده‌ای از اعداد بیان شدند. شبیه‌سازی‌های المان محدود با استفاده از مقادیر مختلف این چهار دسته پارامتر برای دستیابی به منحنی‌های نیرو - جابجایی انجام شدند (a و b تنش تسلیم هیدرواستاتیک و c و d نسبت پواسون هر کدام به صورت یک دسته بیان شدند). از منحنی‌های به دست آمده یک منحنی درجه‌ی ۵ گذرانده شده $(y = a_1x^5 + a_2x^4 + a_3x^3 + a_4x^2 + a_5x)$ و ۵ ثابت a_1, a_2, a_3, a_4 و a_5 به دست آمدند. این ثوابت به عنوان ورودی و چهار پارامتر مربوط به مدل MDPC به عنوان سیگنال خروجی به شبکه‌ی عصبی معرفی شدند. سپس شبکه برای یافتن جواب بهینه آموزش دید. شکل ۲-۱۵ فلوچارت مربوط به روش شناسایی پارامترهای مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۵: فلوجارت روند شناسایی پارامترهای مجهول.

مقادیر ورودی و هدف مورد نظر با استفاده از جعبه‌ابزار شبکه‌ی عصبی مصنوعی در نرم‌افزار MATLAB

R2015b به شبکه‌ی عصبی وارد شدند. الگوریتم پس انتشار برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفت. این

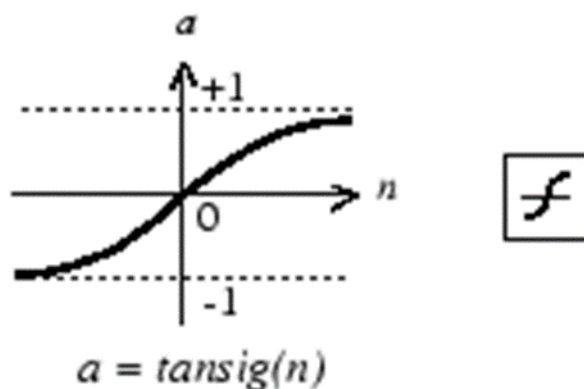
الگوریتم با تنظیم وزن ورودی‌ها شبکه‌ی مورد نظر را آموزش می‌دهد [۲۳]. برای آموزش درست شبکه، تعیین دقیق محدوده‌ی پارامترها برای شبیه‌سازی‌های المان محدود ضروری است. این کار با تحلیل حساسیت بر روی پارامترها انجام شد. در نهایت پس از آموزش درست شبکه، ثوابت به دست آمده از منحنی نیرو - جابجایی آزمون تجربی به عنوان ورودی به شبکه داده شده و خروجی متناظر با آن درخواست شد. خروجی‌های به دست آمده تحت عنوان پارامترهای ماده به شبیه‌سازی المان محدود اعمال شده و منحنی نیرو - جابجایی حاصل از آن با منحنی تجربی مقایسه شد. آموزش شبکه و دستیابی به پارامترهای خروجی جدید تا زمانی که اختلاف منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی به میزانی قابل قبول برسد ادامه خواهد یافت.

۲-۷-۱ ساختار شبکه‌ی عصبی مورد استفاده

شبکه‌ی عصبی مورد استفاده دارای دو لایه بوده که لایه‌ی مخفی آن ۱۹ نرون در لایه‌ی مخفی دارد. هر دو لایه‌ی مخفی و خروجی از تابع انتقال Tansig که یک تابع تانژانت هیپربولیک S شکل^۱ است برای فعال‌سازی نرون‌هایشان استفاده می‌کنند. شکل ۲-۱۶ گراف این تابع را همراه با نمادش نشان می‌دهد. برای آموزش شبکه از تابع پس انتشار لونبرگ - مارکوارت^۲ trainlm استفاده شده است. این تابع مقادیر وزن و انحراف را مطابق بهینه‌سازی لونبرگ - مارکوارت به‌روز می‌کند و غالباً از آن به عنوان سریع‌ترین الگوریتم در جعبه‌ابزار متلب یاد می‌شود [۳۷].

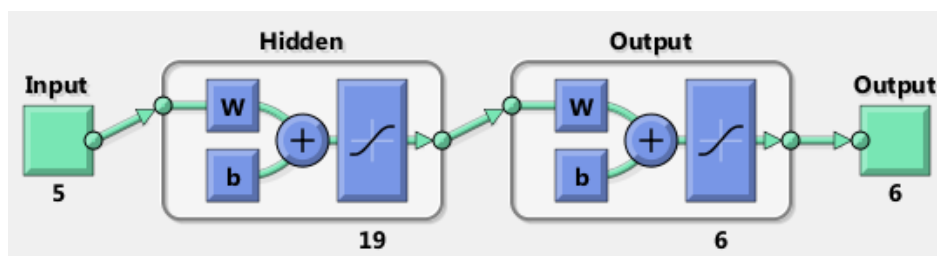
^۱ Hyperbolic tangent sigmoid transfer function

^۲ Levenberg-Marquardt backpropagation



شکل ۲-۱۶: گراف و نماد تابع tansig [۳۷].

شکل ۲-۱۷ ساختار شبکه‌ی عصبی مورد استفاده در نرم‌افزار متلب را نمایش می‌دهد. مجموعه‌ی ثوابت منحنی نیرو - جابجایی به دست آمده از شبیه‌سازی‌های مورد نظر به عنوان ورودی شبکه به لایه‌ی مخفی با ۱۹ نرون ارسال می‌شوند. در این لایه به هر داده‌ی ورودی وزنی تخصیص داده شده و مجموع حاصل ضرب وزن‌ها در ورودی‌های متناظر در یک بخش از نرون‌های لایه ذخیره می‌شوند. سپس تابع انتقال غیر خطی خروجی لایه را به صورت تابعی از این مجموع به لایه‌ی بعدی خود ارسال می‌کند. این داده‌های ارسالی به عنوان ورودی برای لایه‌ی دوم یعنی لایه‌ی خروجی وارد شده و دوباره به هر ورودی وزنی تخصیص داده شده و مجموع حاصل ضرب ورودی‌ها با وزن‌های متناظرشان در این لایه ذخیره و باز با تابع انتقال غیر خطی به خروجی ارسال می‌شوند. در نهایت، شبکه خروجی حاصل را با هدف نهایی مقایسه کرده و اگر اختلاف این دو قابل قبول نباشد به کمک الگوریتم پس انتشار به بازآموزی دوباره‌ی خود تا زمان حصول نتیجه‌ی مطلوب خواهد پرداخت.



شکل ۲-۱۷: ساختار شبکه‌ی عصبی پیش‌خور پس انتشار مورد استفاده در نرم‌افزار متلب.

فصل ۳ آزمون‌های تجربی برای کالیبراسیون

مدل رفتاری

شبیه‌سازی عددی یک آزمون نیازمند تعیین دقیق پارامترهای مدل رفتاری مورد استفاده برای ماده‌ی مورد نظر است. پارامترهای مدل ساختاری دراکر - پراگر با انجام چند آزمون قابل دستیابی هستند. در این فصل ابتدا به معرفی پودر مورد نظر و خواص و ویژگی‌های آن پرداخته شده و سپس روند انجام آزمون‌ها تشریح خواهد شد. برخی از آزمون‌های تعیین پارامترهای مدل MDPC مستلزم تجهیزات پیچیده و صرف هزینه‌ی قابل توجه برای تامین آنها هستند. پژوهشگران و جوامع صنعتی همواره در پی آزمون‌ها و روش‌های ساده و مقرون به صرفه‌تر و در عین حال دقیق برای پیشبرد اهداف پژوهش خود بوده‌اند. پارامترهای این مدل را می‌توان با انجام آزمون فشردن سه‌محوری به دست آورد اما تجهیزات مورد نیاز برای انجام چنین آزمونی به راحتی قابل دسترسی نبوده و گران‌قیمت هستند [۲، ۱۸، ۲۱]. پارامترهای سطح خرابی برشی با ترکیب دو آزمون ساده به دست آمدند. تنش شعاعی وارد بر پودر حین تراکم به صورت غیر مستقیم با استفاده از یک قالب تجهیز شده تعیین و در نتیجه پارامترهای سطح کپ و خصوصیات کشسانی ماده و ضریب اصطکاک بین دیواره‌ی قالب و پودر، به دست آمده و در نهایت مدل ساختاری برای ماده‌ی مورد نظر کالیبره خواهد شد. ضمن اینکه روشی برای تعیین پارامترهای مدل MDPC برای پودر مشابه با پودر آزمایش شده با استفاده از آزمون ساده‌ی تک‌محوری و شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شد.

۳-۱- خواص پودر KMS-92

در این پایان‌نامه کالیبراسیون مدل رفتاری برای پودر آماده‌ی پرس^۱ KMS-92 انجام شده است. ماده‌ی غالب این پودر آلومینا^۲ است که ۹۲ درصد آن را شامل می‌شود. از جمله خواص آن می‌توان به کارایی بالا، قابلیت فشردن خوب تک‌محوری و ایزواستاتیک، قابلیت پخت و خصوصیات سرامیکی عالی و استحکام مکانیکی و مقاومت بالا در برابر سایش اشاره کرد که برای تولید در زمینه‌های سرامیک‌های مهندسی، الکترونیک و قطعات ضد سایش بسیار مناسب است. جدول ۳-۱ نسبت ترکیبات تشکیل دهنده‌ی این پودر سرامیکی را

^۱ ready to press

^۲ Al₂O₃

نشان می‌دهد. ترکیب اساسی این پودر آلومینا بوده و در تمامی مجموعه‌ی KMS، عدد همراه با این نام بیانگر نسبت آلومینای موجود در پودر است. به عنوان مثال KMS-92 حاوی ۹۲ درصد آلومینا در ترکیب خود است.

جدول ۳-۱- ترکیب پودر KMS-92 [۳۸].

ترکیب	درصد وزنی
Al ₂ O ₃	≈ ۹۲
CaO	≈ ۲/۵
Na ₂ O	≤ ۰/۱
SiO ₂	≈ ۳/۶
Fe ₂ O ₃	≤ ۰/۲
MgO	≈ ۱/۵

به برخی ویژگی‌های فیزیکی پودر در جدول ۳-۲ اشاره شده است.

جدول ۳-۲- خصوصیات پودر KMS-92 [۳۸, ۳۹].

چگالی پس از پخت (1600 °C, 2 hours) (g/cm ³)	چگالی خام (g/cm ³) (100 MPa)	اندازه‌ی گرانول متوسط (μm)	رطوبت (%)	چگالی اولیه‌ی پودر (kg/m ³)	کاهش وزن پس از پخت (%)
۳/۷	۲/۴	۲۰۰	۰/۵	۱۱۰۰	۴/۳

شکل ۳-۱ پودر KMS-92 را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱: پودر KMS-92.

۲-۳-۲- آزمون‌های تعیین پارامترهای سطح خرابی برشی

آزمون فشردن قطری منجر به دست آمدن استحکام کششی پودر شده و آزمون فشردن محوری نمونه‌ها استحکام فشاری آن را در اختیار قرار می‌دهد. ترکیب این دو آزمون منجر به دستیابی به پارامترهای سطح خرابی برشی مدل MDPC برای ماده‌ی مورد نظر خواهد شد.

۱-۲-۳-۲ ساخت نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمون

برای ساخت هر کدام از نمونه‌ها ۱/۰۰۰ g پودر KMS-92 درون قالب با قطر ۱۰ mm پر شده و با کنترل جابجایی به صورت تک‌محوری فشرده شد. با توجه به یکسان بودن جرم پودر پر شده درون قالب و ثابت بودن قطر قالب به خاطر صلب بودن آن، نمونه‌های تولید شده در یک ارتفاع خاص، دارای چگالی نسبی یکسانی نیز خواهند بود. نمونه‌های آزمون برای چگالی‌های نسبی دیگر نیز به همین صورت تولید شدند. پس از خروج قرص‌های ساخته شده از قالب، قطر و ارتفاع آن‌ها در سه نقطه اندازه‌گیری شده و مقادیر میانگین برای هر کدام از آن‌ها محاسبه و ثبت شد.

۲-۲-۳-۲ آزمون فشردن قطری و فشردن محوری

آزمون فشردن قطری و فشردن محوری به ترتیب استحکام کششی و فشاری پودر متراکم را که از نیروی شکست نمونه‌ها به دست می‌آیند، تعیین می‌کنند.

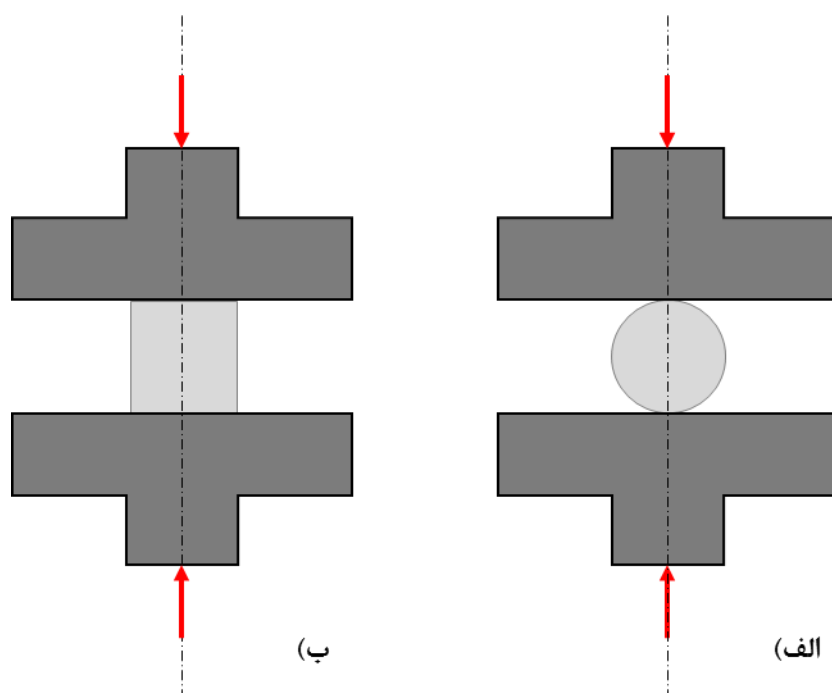
این آزمون‌ها با استفاده از دستگاه اینسترون^۱ و یک نیروسنج و دو سطح صلب کاملاً صاف انجام شد. یکی از سطوح صلب به یک نیروسنج بسته شده روی کنگی بالا متصل بوده و سطح صلب دیگر در پایین قرار گرفته و نمونه‌ها روی آن قرار می‌گیرند. با شروع فرآیند آزمون کنگی بالا به سمت پایین حرکت کرده و نمونه را تحت فشار قرار داده و نیروی اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج تا زمان وقوع شکست در نمونه، در حال افزایش خواهد بود. در نهایت داده‌های اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج به حافظه‌ی رایانه ارسال و ثبت شده و استحکام

^۱ INSTRON

کششی و فشاری به ترتیب از نیروهای شکست آزمون فشردن قطری و فشردن محوری با استفاده از روابط (۲) و (۱۵) و (۲۱-۲) برای متراکم در چگالی مورد نظر محاسبه شدند.

اساس انجام این دو آزمون نشانه‌گذاری و موقعیت‌دهی درست نمونه، اعمال بار و انجام محاسبات است. نشانه‌گذاری روی نمونه به موقعیت‌دهی دقیق نمونه در مرکز صفحه‌ی زیرین نمونه و پرس کمک شایانی کرده و نیز خط مرجعی را برای اندازه‌گیری‌های ضخامت و قطر ارائه می‌کند [۲].

در آزمون فشردن قطری، نمونه دقیقاً در مرکز بارگذاری روی سطح جانبی خود بر صفحه‌ی مسطح پایین نشسته و با حرکت کَلگی بالا به سمت پایین به نمونه نیرو وارد شده و در نهایت می‌شکند. در آزمون فشردن محوری نیز سطح مقطع دایره‌ای نمونه‌ی استوانه‌ای با صفحات مسطح در تماس خواهد بود. شکل ۲-۳ نحوه‌ی موقعیت‌دهی قرص‌های استوانه‌ای برای انجام آزمون‌های فشردن قطری و محوری را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: موقعیت‌دهی و بارگذاری در آزمون الف) فشردن قطری، ب) فشردن محوری قرص‌های استوانه‌ای.

در آزمون فشردن قطری برای اطمینان از اینکه نیروی کششی خرابی دقیقاً در مرکز وارد می‌شود، نمونه‌ی مورد نظر باید در راستای خط مرکزی خود به دو نیم تبدیل شود. شکل ۳-۳ تجهیز مورد استفاده برای انجام آزمون فشردن قطری و فشردن محوری را نشان می‌دهد.

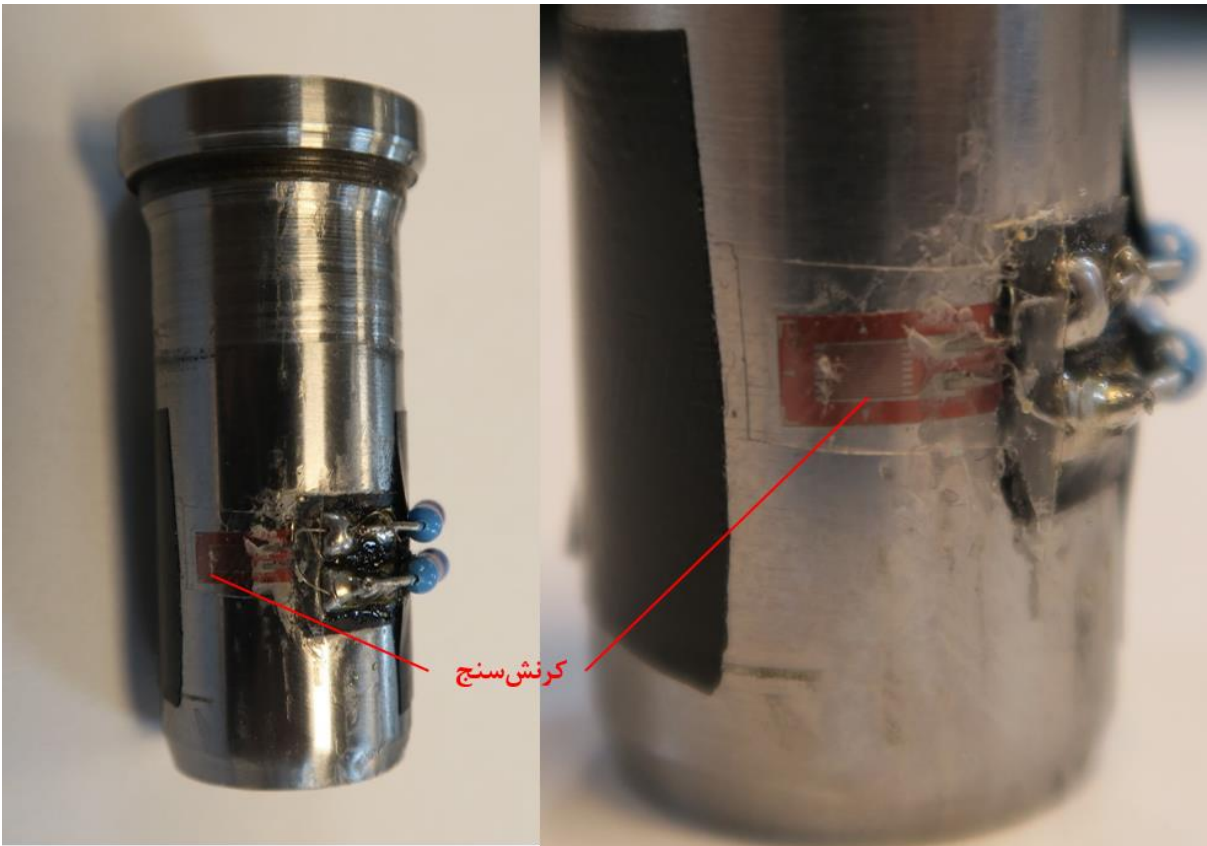


شکل ۳-۳: تجهیز مورد استفاده برای آزمون فشردن قطری و محوری.

چند نمونه برای یک چگالی خاص ساخته شده و مورد آزمایش فشردن قطری و محوری قرار گرفتند. برای محاسبه پارامترهای سطح خرابی برشی، مقادیر میانگین استحکام‌های کششی و فشاری مد نظر قرار گرفتند. پارامترهای سطح خرابی برشی برای سایر چگالی‌های به دست آمده نیز به همین ترتیب تعیین شدند.

۳-۳- تعیین پارامترهای سطح کپ

کالیبره کردن پارامترهای سطح کپ مدل MDPC نیازمند اطلاع از وضعیت تنش شعاعی در حین تراکم است. برای انجام چنین کاری آزمون فشردن سه‌محوری پیشنهاد شده است. چنانچه پیش‌تر بیان شد، تجهیزات این آزمون هزینه‌های زیادی را به خود اختصاص می‌دهند. از این رو با کمک قالب تجهیز شده می‌توان تنش شعاعی حاصل از نیروی اعمالی از سنبه‌ی تراکم تک‌محوری را اندازه‌گیری کرد. راه‌حل‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری تنش شعاعی موجود است. یکی از این راه‌حل‌ها اندازه‌گیری غیر مستقیم آن به کمک کرنش‌سنج نصب شده روی دیواره‌ی خارجی قالب است. در این پایان‌نامه، اندازه‌گیری تنش شعاعی به صورت غیرمستقیم، با استفاده از یک کرنش‌سنج انجام شده است. حسگر کرنش‌سنج مورد نظر روی سطح خارجی قالب به صورت یک‌چهارم نصب شده است. همانند آزمون فشردن قطری و فشردن شعاعی آزمون فشردن تک‌محوری با استفاده از این قالب به کمک دستگاه اینسترون انجام شده است. شکل ۳-۴ قالب مجهز به کرنش‌سنج را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: قالب تجهیز شده با حسگر کرنش سنج.

ابتدا به مدار کرنش سنج مورد استفاده در قالب و سپس نحوه‌ی انجام آزمون فشردن تک‌محوری با قالب تجهیز شده و کالیبره کردن مدل پرداخته خواهد شد.

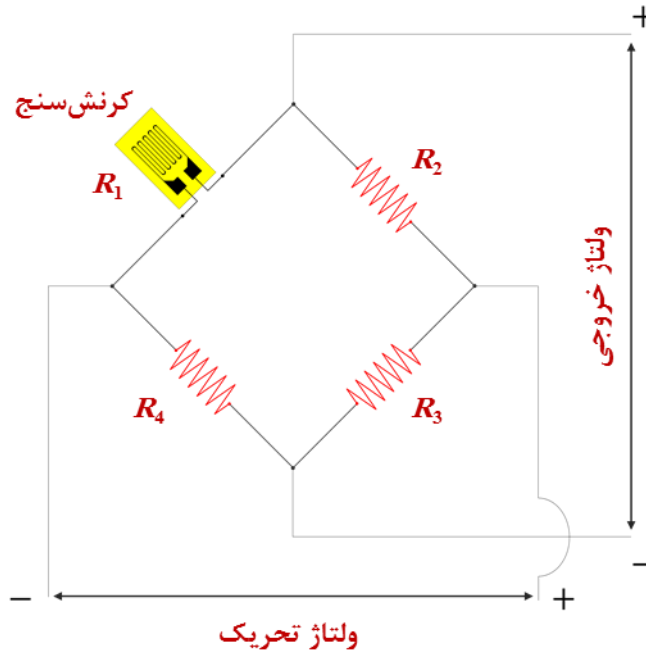
۳-۳-۱ مدار کرنش سنج

اساس کار کرنش‌سنج‌های مقاومت الکتریکی، تغییر طول است. درون ساختمان کرنش‌سنج‌ها اغلب از مواد رسانا استفاده می‌شود. واضح است که با تغییر طول رسانا، مقاومت الکتریکی آن تغییر می‌کند، بنابراین می‌توان کرنش را به صورت زیر بیان کرد:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{k} \quad (1-3)$$

k فاکتور گیج، ΔL تغییر طول، L طول اولیه و ΔR تغییرات مقاومت و R مقاومت الکتریکی هستند.

عموما این تغییر مقاومت بسیار کوچک بوده و نیازمند مدار پل وتستون^۱ برای تبدیل تغییرات مقاومت به تغییرات ولتاژ که بسیار ساده‌تر اندازه‌گیری می‌شود است. شکل ۳-۵ مدار پل وتستون را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵: مدار یک چهارم پل وتستون.

ولتاژ خروجی برای مدار بالا به صورت معادله‌ی (۳-۲) خواهد بود:

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E_v \quad (2-3)$$

E_v ولتاژ تحریک و e ولتاژ خروجی از کرنش سنج است.

اگر هر چهار مقاومت یکسان و برابر R باشند، تغییر مقاومت به علت اعمال کرنش به صورت $R + \Delta R$ در خواهد آمد. برای تغییرات ولتاژ خروجی می‌توان نوشت:

$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} E_v \quad (3-3)$$

برای $\Delta R \ll R$:

^۱ Wheatstone bridge

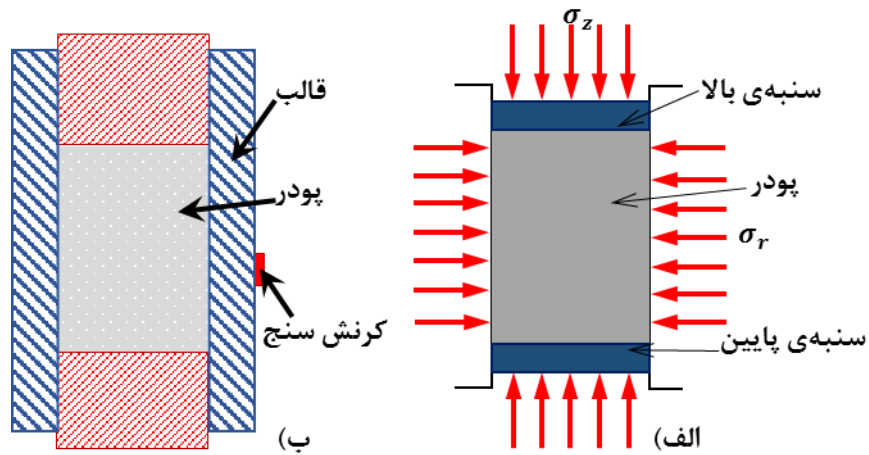
$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R} E_v = \frac{E_v}{4} k \varepsilon \quad (4-3)$$

در آزمون فشردن تک‌محوری پودر با قالب تجهیز شده کرنش‌سنج مورد نظر به یک دستگاه کالیبراتور متصل شده و نمایشگر دستگاه میزان تغییر ولتاژ را نشان می‌دهد، در نتیجه می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۳-۳) کرنش را به دست آورد.

۳-۲ فشردن تک‌محوری پودر درون قالب تجهیز شده

حین تراکم، مقدار کرنش شعاعی با صرف نظر از تغییر شکل کشسان قالب صفر است [۳]. کرنش‌سنج مورد نظر تغییرات کرنش را اندازه‌گیری خواهد کرد. با اعمال فشار محوری به پودر و متراکم‌تر شدن آن، تنش فشاری از دیواره‌ی قالب به پودر اعمال و افزایش خواهد یافت. شکل ۳-۶ حالت‌های بارگذاری بر روی پودر را حین تراکم تک‌محوری درون قالب صلب فلزی نشان می‌دهد.

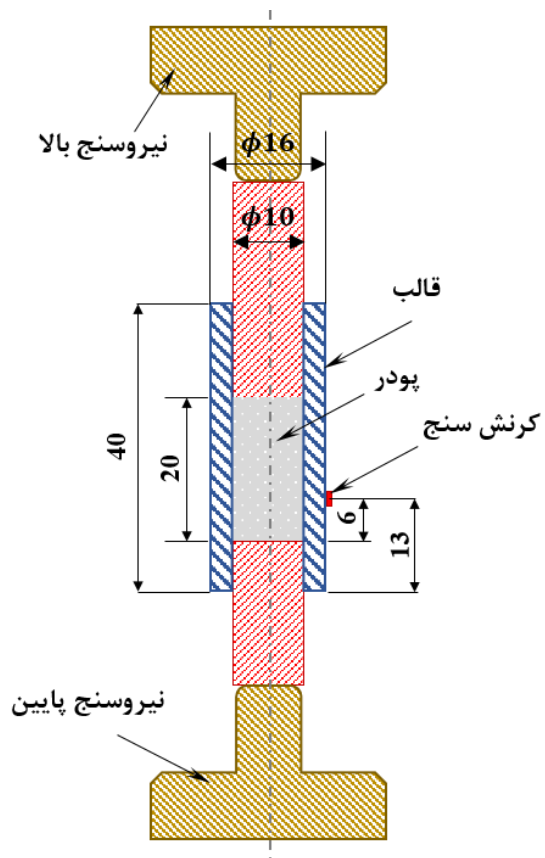
قالب با قطر داخلی ۱۰ و قطر خارجی ۱۶ mm برای ساخت قرص‌های سرامیکی استفاده شد. سنبه‌ی بالا و پایین به ترتیب دارای ارتفاع ۳۰ و ۲۰ mm هستند. کرنش‌سنج مورد نظر در فاصله‌ی ۱۳ میلی‌متری از انتهای قالب روی سطح خارجی قالب چسبانده شده است. برای ساخت نمونه ۲/۰۰۰ g پودر KMS-92 درون قالب پر شده است. ولتاژ تحریک ۲ V و ثابت بوده و مقدار تغییرات ولتاژ خروجی در نمایشگر به میلی‌ولت در معرض نمایش قرار گرفته و ثبت شدند.



شکل ۳-۶: تراکم قالب الف) حالت‌های تنش، ب) قالب مجهز به حسگر کرنش سنج.

سایر ابعاد قالب در شکل ۳-۷ نمایش داده شده است. با افزایش فشار محوری و تراکم پودر، کرنش سنج تحریک شده و مقدار عدد روی نمایشگر تغییر پیدا می‌کند. این تغییر مقدار بیانگر تغییر کرنش محیطی^۱ است که به وسیله‌ی آن می‌توان توسط آن تنش شعاعی را به دست آورد.

^۱ Hoop strain



شکل ۳-۷: ابعاد قالب مجهز به حسگر کرنش سنج در ابتدای فرآیند فشردن پودر (واحد‌ها به mm هستند).

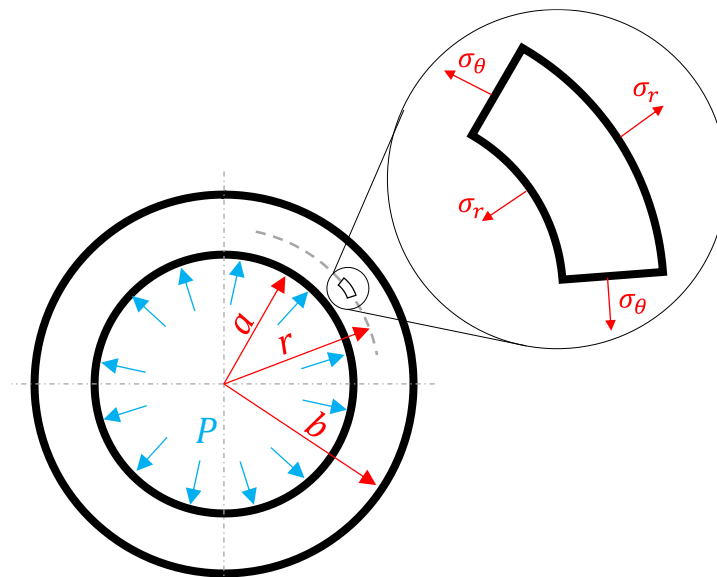
جرم پودر مورد استفاده برای انجام این آزمون و آزمون‌های تعیین سطح خرابی برشی با استفاده از یک ترازوی RADWAG PS 510/C/1 با دقت 0.001 g اندازه‌گیری شده است، شکل ۳-۸ ترازوی مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸: ترازوی با دقت اندازه‌گیری 0.001 g.

مقاومت‌های به کار رفته یکسان بوده و دارای $R = 120 \Omega$ هستند. کرنش سنج نیز ۱۲۰ اهمی با فاکتور گنج $K = 2.12$ است. از این رو برای محاسبه تغییرات ولتاژ از رابطه‌ی (۳-۴) استفاده شده است. در این آزمون ارتفاع اولیه‌ی ۲ g پودر درون قالب حدوداً ۲۰ mm بوده و سنبه‌ی بالایی به میزان مشخصی جابجا شده و پودر را تا ارتفاعی مشخص فشرده و سپس فشار برداشته می‌شود. این بارگذاری و باربرداری طی چند مرحله انجام شده تا نیروی اعمالی به حدود ۲۵ kN برسد. طی انجام آزمون مقادیر نیرو و جابجایی سنبه‌ی بالا و نیروی منتقل شده به سنبه‌ی پایین و میزان تغییرات ولتاژ در دو فاز بارگذاری و باربرداری برای انجام محاسبات مورد نیاز ثبت شدند.

چنانچه بیان شد، استفاده از کرنش‌سنج برای تعیین تنش شعاعی روشی غیر مستقیم بوده و با انجام یک سری محاسبات می‌توان به آن دست پیدا کرد. قالب مورد نظر یک استوانه‌ی جدار ضخیم تلقی می‌شود. بنابراین برای بیان حالت‌های تنش باید از روابط حاکم بر استوانه‌های جدار ضخیم استفاده نمود. شکل ۳-۹ مقطع قالب استوانه‌ای را نشان می‌دهد که در معرض فشار داخلی P قرار گرفته است. با اعمال فشار داخلی به ترتیب در راستای شعاعی و محیطی مقطع دایره‌ای، تنش شعاعی و تنش محیطی به وجود می‌آیند.



شکل ۳-۹: مقطع استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار داخلی.

روابط (۳-۵) و (۳-۶) محاسبات تنش در استوانه‌های جدار ضخیم را بیان می‌کنند.

$$\sigma_r = \frac{Pa^2}{b^2 - a^2} \left[1 - \frac{b^2}{r^2} \right] \quad (۵-۳)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Pa^2}{b^2 - a^2} \left[1 + \frac{b^2}{r^2} \right] \quad (۶-۳)$$

P فشار داخلی، a و b شعاع داخلی و خارجی قالب هستند.

کرنش‌ها نیز با روابط (۷-۳) و (۸-۳) به دست می‌آیند.

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu\sigma_r) \quad (۷-۳)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu\sigma_\theta) \quad (۸-۳)$$

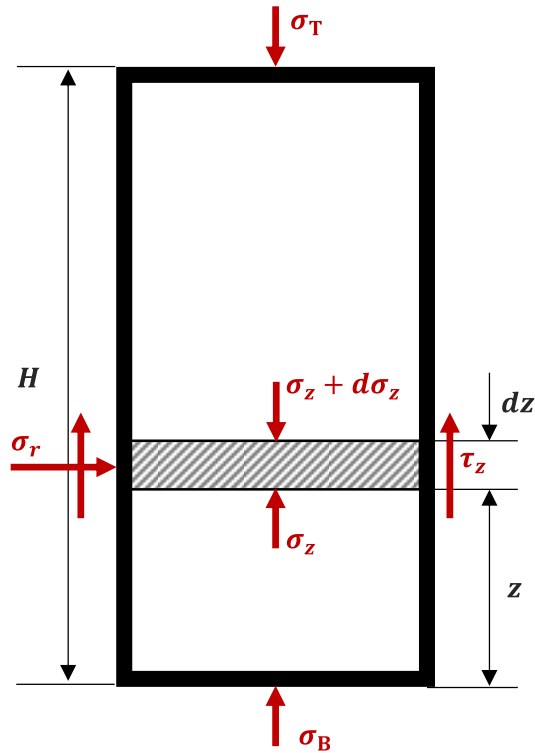
با توجه به اینکه کرنش‌سنج در سطح خارجی قالب نصب شده، مقدار کرنش محاسبه شده برای سطح خارجی خواهد بود، بنابراین $r = b$. بر اساس رابطه‌ی (۵-۳)، در دیواره‌ی خارجی استوانه تنش شعاعی وجود ندارد، در نتیجه در این حالت رابطه‌ی به صورت (۹-۳) در آمده و تنش محیطی قابل محاسبه خواهد بود:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E} \quad (۹-۳)$$

سپس، با در اختیار داشتن مقدار تنش محیطی، فشار درون استوانه با استفاده از رابطه‌ی (۶-۳) محاسبه شده و در نهایت تنش شعاعی در دیواره‌ی داخلی استوانه ($r = a$) با رابطه‌ی (۵-۳) به دست خواهد آمد.

بر اساس تئوری جانسن - واکر [۳، ۳۴]، تنش محوری در محل نصب حسگر (شکل ۱۰-۳) با رابطه‌ی (۱۰-۳) قابل دستیابی است:

$$\sigma_z = \sigma_{\text{Top}}^{\frac{z}{H}} \cdot \sigma_{\text{Bot}}^{\left(1 - \frac{z}{H}\right)} \quad (۱۰-۳)$$



شکل ۳-۱۰: دیاگرام تنش‌ها درون قالب تجهیز شده در حین فشردن پودر.

با معلوم شدن تنش‌های شعاعی و محوری، مقادیر p و q از روابط (۲-۲۹) و (۲-۳۰) برای نقطه‌ی مورد نظر روی سطح کپ محاسبه شده سپس پارامترهای سطح کپ مدل MDPC با استفاده از روابط (۲-۸)، (۲-۳۳) و (۲-۳۴) به دست خواهند آمد.

۳-۴- تعیین پارامترهای کشسان ماده

پارامترهای کشسان پودر KMS-92 نیز توسط قالب مورد استفاده برای کالیبره کردن پارامترهای سطح کپ به دست آمدند. پس از محاسبه‌ی تنش شعاعی و تنش و کرنش محوری و ترسیم منحنی‌های مورد نیاز، پارامترهای مدول کشسانی و نسبت پواسون با استفاده از مسیر باربرداری منحنی‌های تنش شعاعی - تنش محوری و کرنش محوری - تنش محوری (روابط (۲-۴۲) و (۲-۴۳)) به دست آمدند.

۳-۵- تعیین ضریب اصطکاک بین دیواره‌ی قالب و پودر

اصطکاک تاثیر به سزایی بر توزیع چگالی دارد، از این رو نیازمند شناخت کافی و محاسبه‌ی دقیق است. در این پژوهش رفتار اصطکاکی با استفاده از تئوری جانسن - واکر (رابطه‌ی ۲-۴۴)) توصیف شده است. به کمک نیروسنج‌های بالا و پایین، تنش‌های محوری بالا و پایین پودر و به کمک کرنش‌سنج نصب شده روی قالب تنش شعاعی محاسبه و برای تعیین ضریب اصطکاک بین دیواره‌ی قالب و پودر استفاده شدند.

نحوه‌ی خوانش کمیت‌ها در طول آزمون به این صورت بود که مقادیر خوانده شده توسط نیروسنج‌ها و جابجایی سنبه‌ی بالا توسط خود دستگاه اینسترون ثبت و مقدار تغییرات ولتاژ کرنش‌سنج به وسیله‌ی نمایشگر کالیبراتور قابل مشاهده بود. از نمایشگرها به صورت همزمان با سرعت ۳۰ فریم بر ثانیه تصویربرداری شده و تصاویر به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. کالیبراتور مورد استفاده برای خوانش کرنش‌سنج در شکل ۳-۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۱: کالیبراتور مورد استفاده برای خوانش تغییرات ولتاژ کرنش‌سنج.

شکل ۳-۱۲ قالب تجهیز شده‌ی نصب شده روی دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲: تجهیز آزمون فشردن تک‌محوری با قابلیت اندازه‌گیری کرنش محیطی.

۳-۶- آزمون تک‌محوری ساده

در این پژوهش روشی برای دستیابی به پارامترهای مدل MDPC به کمک یک آزمون ساده و شبکه‌های عصبی ارائه شده است، یک آزمون تک‌محوری ساده نیز انجام شد. در این آزمون مقدار جابجایی و نیروی سنبه‌ی بالا ثبت شدند و منحنی نیرو بر حسب جابجایی به دست آمد. ابعاد قالب و میزان پودر به کار رفته مانند آزمون چند مرحله‌ای بوده است..

فصل ۴ نتایج و بحث

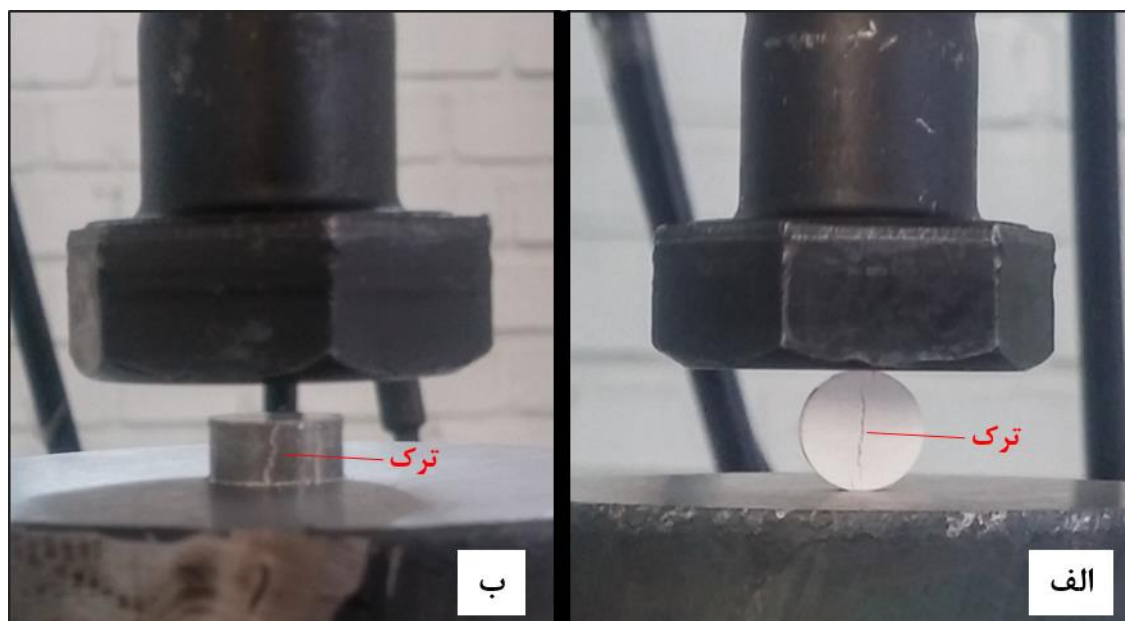
پارامترهای ماده‌ی پودر KMS-92 با روش‌های اشاره شده در فصل ۳ تعیین شدند. پودر درون قالب به قطر ۱۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه پرس اینسترون به صورت تک‌محوری فشرده شد. جرم پودر مورد استفاده برای ساخت قرص‌های مورد نیاز آزمون‌های فشردن قطری و محوری $1/000$ g و برای فشردن تک‌محوری به کمک قالب مجهز به حسگر کرنش سنج $2/000$ g بوده است. نمونه‌ها پس از اتمام فرآیند تراکم، از قالب خارج شده و ابعاد و جرمشان دوباره مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. مشاهده شد که قطر نمونه‌ها پس از خارج کردن از قالب به اندازه‌ی $0/06$ mm افزایش یافته است، انبساط رخ داده در قطر نمونه احتمالاً به خاطر تنش پسماند موجود در نمونه درون قالب صلب بوده و پس از رها شدن از قالب خود را نمایان می‌سازد.

۴-۱- پارامترهای ماده‌ی پودر KMS-92

مدل MDPC، مدلی همسانگرد فرض شده که سطح تسلیم آن متشکل از دو سطح خرابی برشی و سطح کپ و یک سطح گذار بین آنها است. پارامترهای ماده برای مدل رفتاری مورد نظر باید به وسیله‌ی انجام آزمون‌های کالیبره شوند. در این بخش به ارائه‌ی نتایج به دست آمده از طریق آزمون‌های انجام شده پرداخته می‌شود. به روند انجام آزمون‌ها در فصل پیش اشاره شده است، نتایج به دست آمده را می‌توان به صورتی که در ادامه اشاره شده است دسته‌بندی کرد.

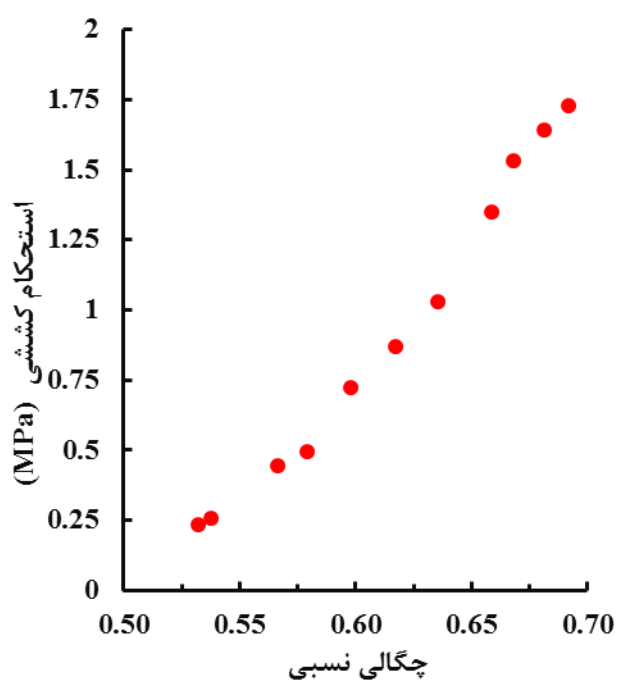
۴-۱-۱ پارامترهای سطح خرابی برشی (دراگر – پراگر)

نیروهای شکست نمونه‌ها برای آزمون‌های فشردن قطری و محوری ثبت و استحکام کششی و فشاری با استفاده از روابط (۲-۱۵) و (۲-۲۱) محاسبه شدند. شکل ۴-۱ شکست نمونه‌ها تحت اثر نیروی اعمالی را نشان می‌دهد، در آزمون فشردن قطری نمونه دقیقاً از مرکز خود ترک برداشته که حاکی از موقعیت‌دهی دقیق آن روی صفحه‌ی مسطح و مرکز اعمال نیرو است.



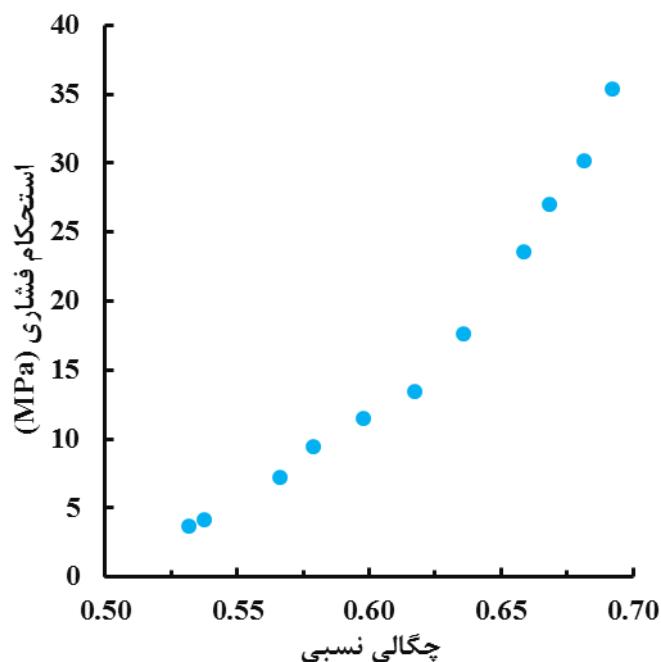
شکل ۴-۱: شکست نمونه‌ها در آزمون الف) فشردن قطری، ب) فشردن محوری.

در هر چگالی نسبی چهار نمونه موجود بوده که برای هر کدام از آزمون‌های فشردن قطری و محوری دو نمونه انتخاب شدند. مقادیر میانگین استحکام و چگالی نسبی محاسبه و برای ترسیم نمودارهای چگالی نسبی - استحکام مورد نظر استفاده شدند. شکل ۴-۲ استحکام کششی شعاعی محاسبه شده را بر حسب چگالی نسبی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با متراکم‌تر شدن پودر، استحکام کششی آن نیز افزایش یافته است.



شکل ۴-۲: استحکام کششی شعاعی نمونه‌ها بر حسب چگالی نسبی.

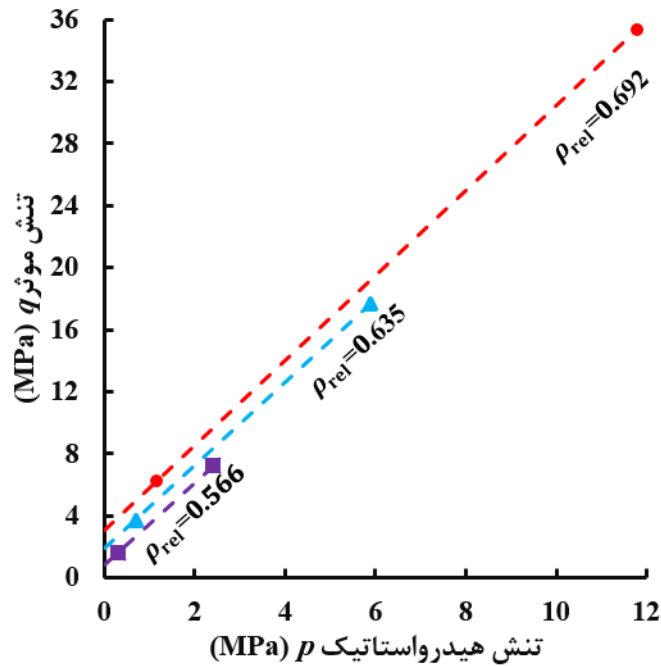
شکل ۳-۴ نیز نمایانگر استحکام فشاری محوری نمونه‌ها بر حسب چگالی‌های نسبی مختلف است. می‌توان دریافت که افزایش چگالی نسبی پودر موجب افزایش استحکام فشاری آن می‌شود.



شکل ۳-۴: استحکام فشاری محوری نمونه‌ها بر حسب چگالی نسبی.

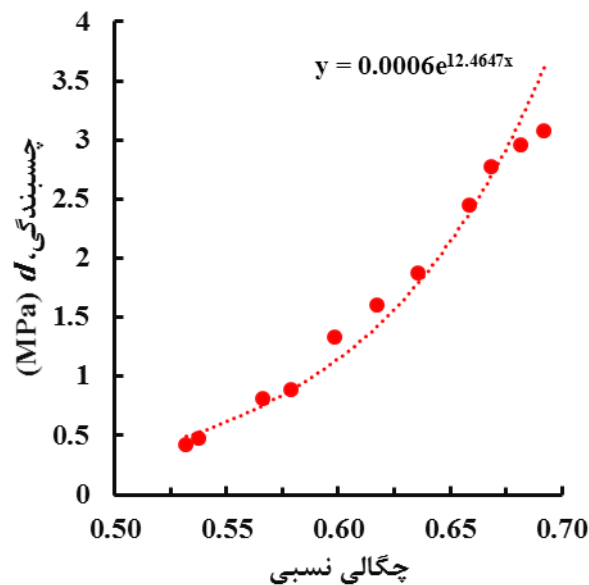
بررسی دو شکل صفحه‌ی قبل نشان می‌دهد در یک چگالی خاص استحکام فشاری پودر نسبت به استحکام کششی آن در سطح بالاتری قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان گفت که نمونه در حالت فشار، نیروی بیشتری را نسبت به کشش تحمل کرده و دیرتر به خرابی خواهد رسید.

مقادیر استحکام محاسبه شده با استفاده از روابط (۲-۲۲) تا (۲-۲۵) برای تعیین تنش‌های فشاری هیدرواستاتیک و موثر به کار رفتند. شکل ۴-۴ تغییرات این دو تنش به دست آمده از آزمون‌های فشردن قطری و محوری قرص‌های استوانه‌ای را در چند چگالی نسبی نشان می‌دهد. در یک چگالی نسبی نقطه‌ای که در تنش‌های بالاتر قرار گرفته، حاصل استحکام فشاری و نقطه‌ی موجود در تنش‌های پایین مربوط به استحکام کششی بوده‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش تراکم پودر، سطح تنش‌های هیدرواستاتیک و موثر نیز بالاتر می‌رود. شیب خط گذرنده از نقاط موجود در یک چگالی نسبی، بیانگر زاویه‌ی اصطکاک و تقاطع آن با محور تنش موثر، چسبندگی پودر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: خط خرابی برشی در صفحه‌ی p - q برای چگالی‌های نسبی مختلف.

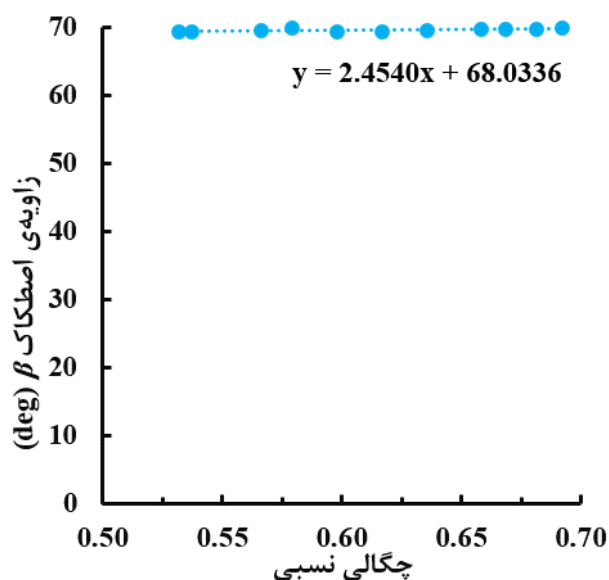
پارامترهای زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی پودر به کمک روابط (۲-۲۶) تا (۲-۲۸) محاسبه و به صورت تابعی از چگالی نسبی بیان شدند. شکل ۴-۵ تغییرات چسبندگی ماده را با چگالی نسبی نشان می‌دهد. در مورد چسبندگی نیز افزایش تراکم پودر منجر به افزایش چسبندگی آن می‌شود. این نوع رفتار صعودی برای چسبندگی توسط محققان مختلف برای پودرهای مختلف گزارش شده است [۲۰، ۳۰، ۴۰-۴۲].



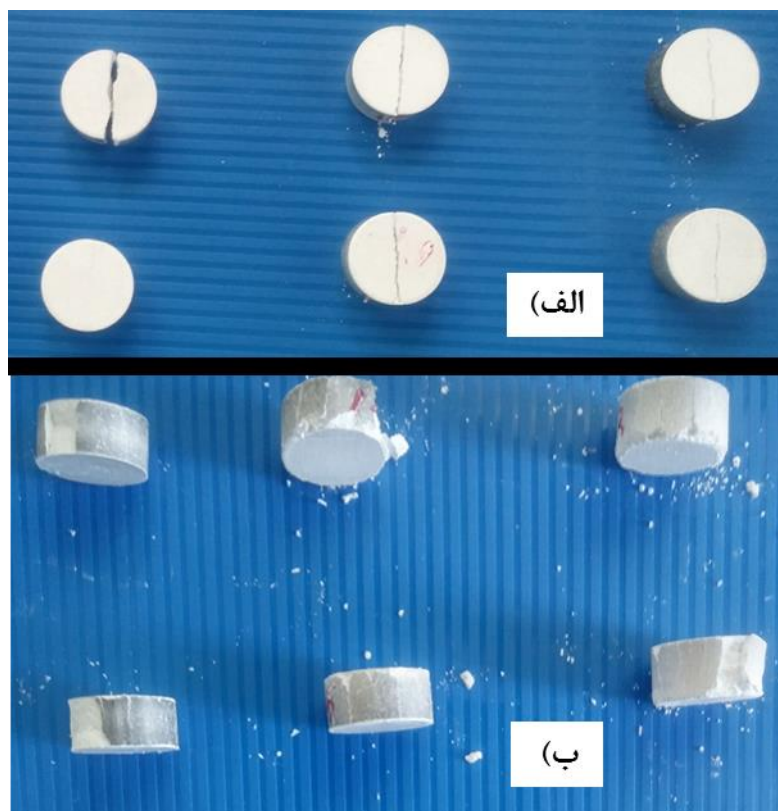
شکل ۴-۵: چسبندگی پودر بر حسب چگالی نسبی.

دیگر پارامتر سطح خرابی برشی یعنی زاویه‌ی اصطکاک نیز بر حسب چگالی نسبی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که متراکم‌تر شدن پودر تاثیر چندانی روی زاویه‌ی اصطکاک آن نداشته و زاویه‌ی اصطکاک تقریباً به صورت خطی و ثابت باقی مانده است. پژوهشگران متعددی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک را به صورت خطی گزارش کرده‌اند [۲۰, ۲۸, ۴۱, ۴۳].

نمونه قرص‌های شکسته شده در آزمون‌های فشردن قطری و فشردن محوری در شکل ۴-۷ قابل مشاهده هستند. نمونه‌های مورد استفاده برای آزمون فشردن قطری از خط مرکزی خود شکسته‌اند که دلالت بر موقعیت‌دهی صحیح قرص‌ها بر روی سطح جانبی خود در حین انجام آزمون دارد.



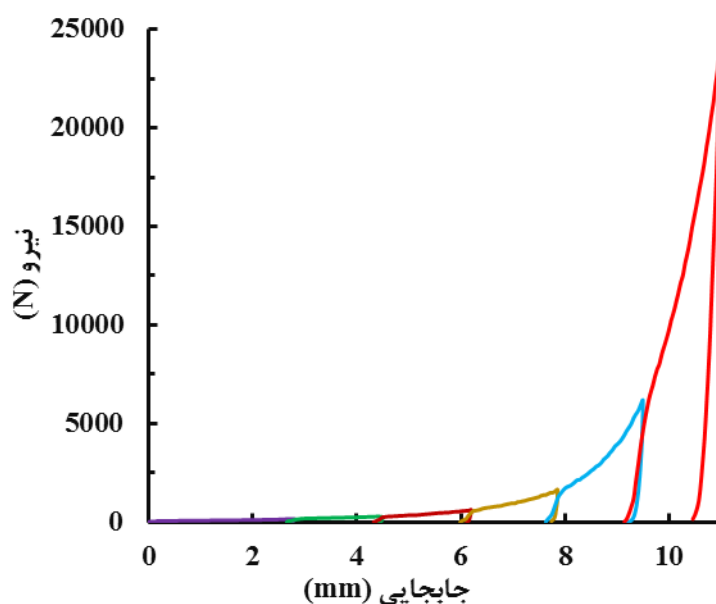
شکل ۴-۶: زاویه‌ی اصطکاک پودر بر حسب چگالی نسبی.



شکل ۴-۷ قرص‌های شکسته شده در آزمون الف) فشردن قطری، ب) فشردن محوری.

۴-۱-۲ پارامترهای سطح کپ

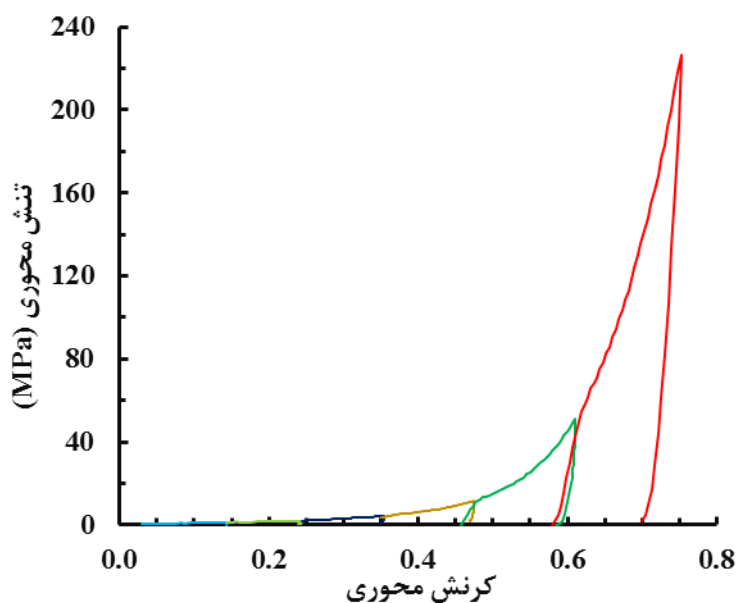
آزمون تراکم تک‌محوری قالب تجهیز شده برای $g \ 2/000$ پودر KMS-92 انجام شد. در طول آزمون نیروهای اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج‌های بالا و پایین، جابجایی و تغییرات ولتاژ کرنش‌سنج ثبت شدند. شکل ۴-۸ تغییرات نیرو بر حسب جابجایی سنبه‌ی بالا را برای سطح بالای پودر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸: نیروی اندازه‌گیری شده در سطح بالای پودر بر حسب جابجایی.

کرنش محیطی به وجود آمده در دیواره‌ی قالب به کمک کرنش سنج مقاومت الکتریکی محاسبه شد، مقدار این کرنش با افزایش تراکم پودر و نیروی اعمالی در حال افزایش است. به کمک کرنش محیطی، تنش محیطی در سطح خارجی قالب با استفاده از روابط حاکم بر استوانه‌های جدار ضخیم و پس از آن فشار داخلی استوانه و در نهایت تنش شعاعی محاسبه شدند (روابط (۳-۵) تا (۳-۹)). تنش‌های محوری بالا و پایین با تقسیم نیروهای مربوط به خود به سطح مقطع پودر به دست آمده و تنش محوری ایجاد شده در موقعیت نصب حسگر با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱۰) به دست آمد.

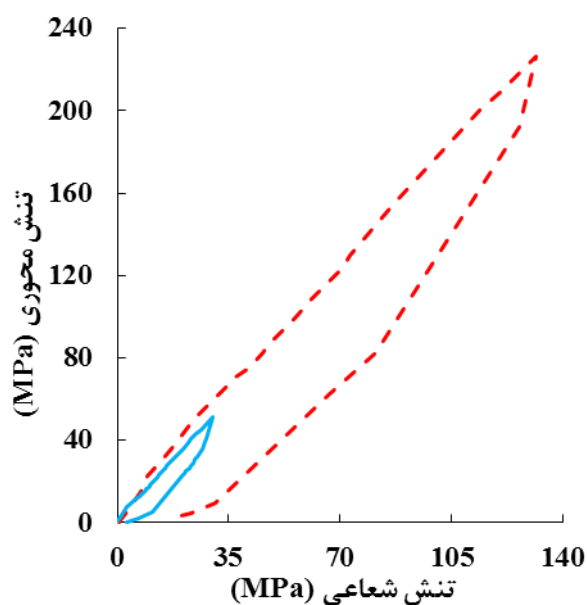
کرنش محوری را می‌توان از جابجایی سنبه‌ی بالایی به دست آورد. پس از انجام محاسبات برای یافتن مولفه‌های شعاعی و محوری تنش و نیز کرنش محوری، تنش محوری بر حسب تنش شعاعی و کرنش محوری بیان شدند. شکل ۴-۹ ارتباط تنش محوری را با کرنش محوری در چند مرحله فشردن نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹: منحنی تنش محوری بر حسب کرنش محوری در مراحل مختلف فشردن.

شکل ۴-۱۰ نیز تنش محوری را بر حسب تنش شعاعی در مراحل آخر فشردن پودر KMS-92 نشان

می‌دهد.

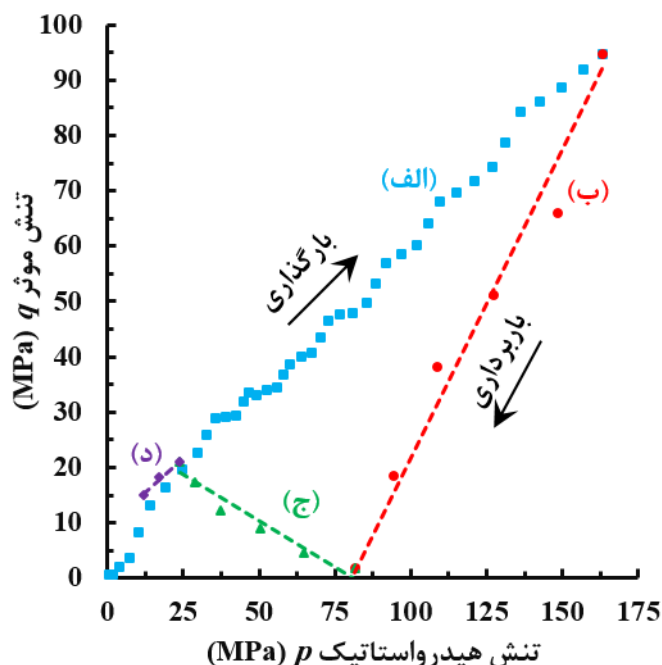


شکل ۴-۱۰: منحنی تنش محوری بر حسب تنش شعاعی.

سطح کپ به کمک مقادیر تنش محوری و تنش شعاعی قابل تعریف خواهد بود. در حین تراکم پودر به

ازای هر مقدار از این تنش‌ها در صفحه‌ی $p-q$ با استفاده از روابط (۲-۲۹) و (۲-۳۰) نقاطی به دست می‌آیند.

نقطه‌ی انتهایی بارگذاری روی سطح کپ قرار گرفته است. به کمک مقادیر مولفه‌های این نقطه پارامترهای سطح کپ قابل شناسایی هستند. شکل ۴-۱۱ مرحله‌ی آخر فشردن پودر را در صفحه‌ی p - q را نشان می‌دهد.



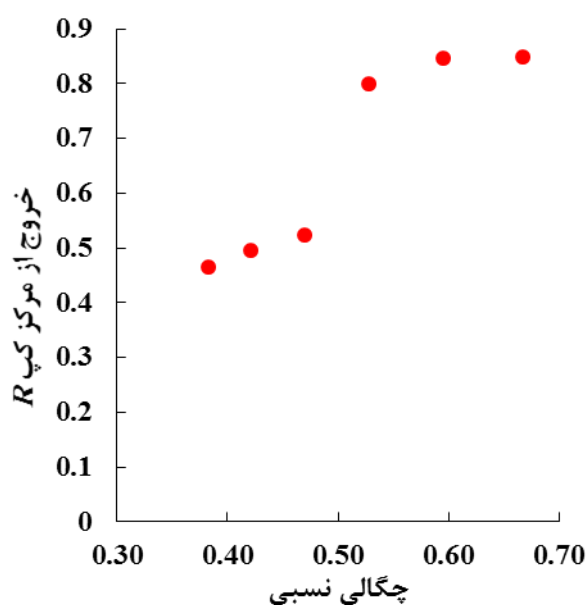
شکل ۴-۱۱: رفتار تراکمی پودر در صفحه‌ی p q حین بارگذاری و باربرداری.

با افزایش تراکم پودر سطح تنش‌های هیدرواستاتیک و موثر افزایش پیدا می‌کند، نقطه‌ی انتهایی بارگذاری که دارای بیشترین مقدار تنش‌ها نیز است روی سطح کپ قرار خواهد گرفت (انتهای مسیر (الف)). با شروع باربرداری ناحیه‌ای در صفحه‌ی مورد نظر نمایان می‌شود که در آن پودر به صورت کشسان تغییرشکل خواهد داد، در این ناحیه با کاهش تنش هیدرواستاتیک، تنش موثر نیز کاهش می‌یابد (مسیر (ب)). این کاهش تا زمانی ادامه می‌یابد که تنش موثر به صفر میل کند، در این وضعیت تنها تنش موثر صفر خواهد شد و تنش فشاری همچنان پا برجاست. پس از گذر از این حالت مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار تنش هیدرواستاتیک، تنش موثر سیر صعودی در پیش گرفته است (مسیر (ج)). پس از این مرحله دوباره مقادیر تنش‌ها کاهش می‌یابند (مسیر (د))، از این ناحیه نیز می‌توان برای تعیین سطح خرابی برشی استفاده کرد، اما روشی دشوار و با احتمال خطای بسیار است [۱۸].

نقاط انتهایی بارگذاری روی سطح کپ قرار گرفته‌اند، در نتیجه در هر مرحله نقطه‌ی $B(p_B, q_B)$ در شکل ۲-۷ به دست خواهند آمد. با داشتن مختصات این نقاط که همان تنش‌های فشاری هیدرواستاتیک و موثر روی

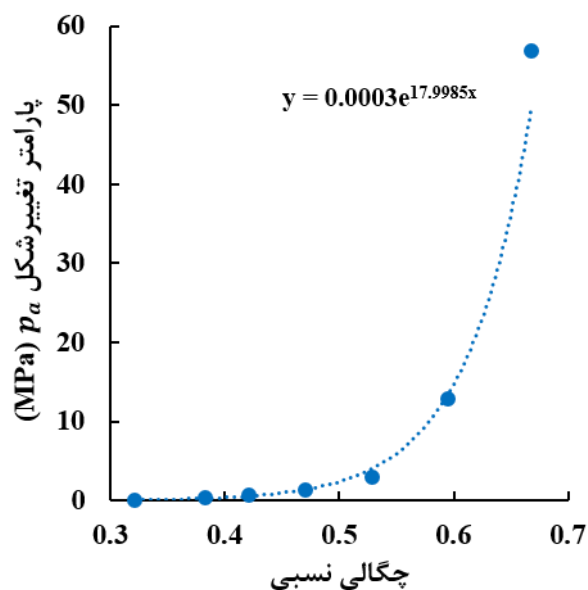
کپ هستند. پارامترهای سطح کپ قابل دستیابی خواهند بود. با در نظر گرفتن پارامتر سطح گذار α برابر 0.1 ، خروج از مرکز کپ R و پارامتر تغییرشکل p_a به ترتیب از روابط (۲-۳۳) و (۲-۳۴) و در نهایت تنش تسلیم فشاری هیدرواستاتیک p_b با جاگذاری مقادیر این دو پارامتر در رابطه‌ی (۲-۸) برای هر مرحله به دست آمدند.

شکل ۴-۱۲ خروج از مرکز کپ را بر حسب چگالی نسبی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که تغییرات خروج از مرکز با چگالی نسبی نا منظم است. اما بر اساس تجربه‌ی کار با این ماده می‌توان گفت عملاً در چگالی‌های نسبی زیر 50% نمی‌توان در قالب قرصی فشرده کرد. به همین دلیل داده‌های چگالی‌های بالاتر از 50% برگزیده شده‌اند. برای خروج از مرکز رفتارهای متفاوتی برای پودرهای مختلف گزارش شده‌اند [۱۹، ۳۰، ۴۳].



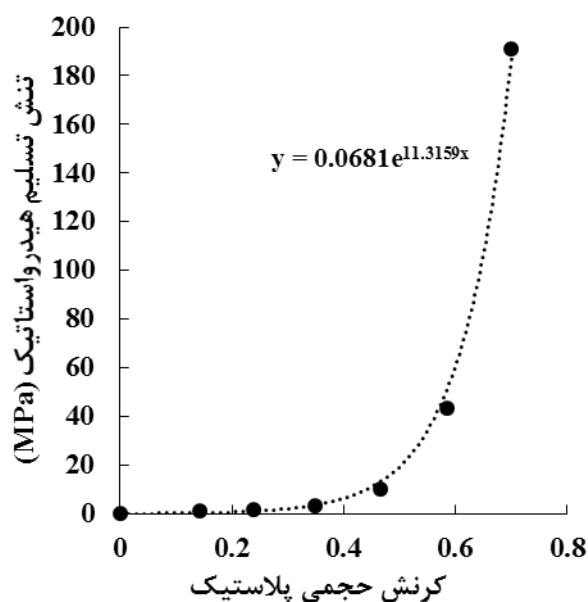
شکل ۴-۱۲: خروج از مرکز کپ بر حسب چگالی نسبی.

شکل ۴-۱۳ تغییرات پارامتر تغییرشکل بر حسب چگالی نسبی را نشان می‌دهد و مشخص است که با تراکم پودر این پارامتر در حال افزایش است [۱۸، ۲۰].



شکل ۴-۱۳: پارامتر تغییر شکل بر حسب چگالی نسبی.

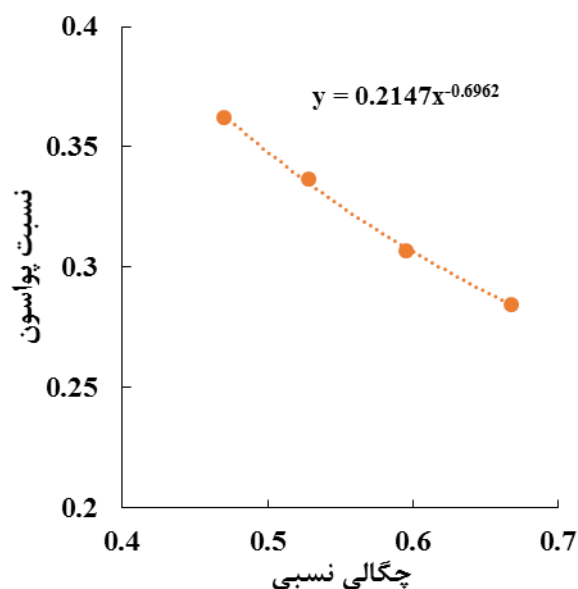
در نهایت با استفاده از مقادیر به دست آمده برای خروج از مرکز و پارامتر تغییر شکل، تنش تسلیم هیدرواستاتیک محاسبه شد. بر خلاف دو پارامتر قبلی، این پارامتر تابعی از کرنش حجمی مومسان بوده و با افزایش مقدار این کرنش این تنش نیز افزایش می‌یابد (شکل ۴-۱۴) [۱۹, ۲۰, ۲۵, ۲۷, ۴۲].



شکل ۴-۱۴: تنش تسلیم هیدرواستاتیک بر حسب کرنش حجمی مومسان.

۳-۱-۴ پارامترهای کشسان ماده

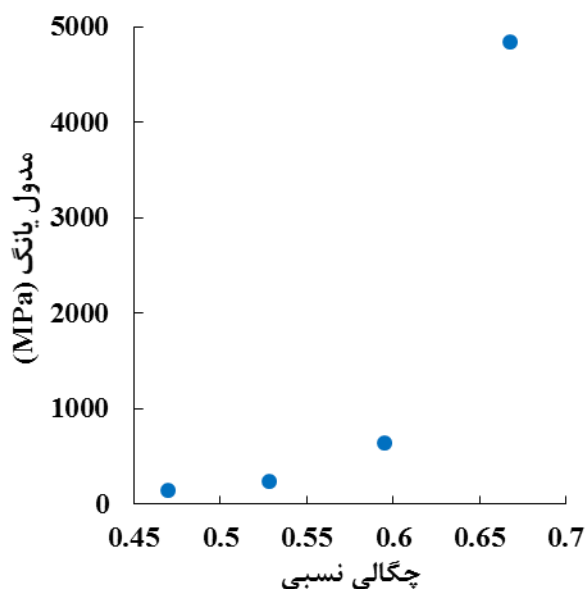
خصوصیات کشسان از مهم‌ترین ویژگی‌های ماده هستند که از منحنی‌های باربرداری در هر مرحله به دست آمده‌اند. با توجه به رابطه‌ی (۲-۴۲) از منحنی‌های باربرداری تنش محوری بر حسب تنش شعاعی، نسبت پواسون، سپس با در اختیار داشتن نسبت پواسون بنا به رابطه‌ی (۲-۴۳) از منحنی‌های باربرداری تنش محوری بر حسب کرنش محوری مدول یانگ ماده به دست آمدند. شکل ۴-۱۵ تغییرات نسبت پواسون را با تراکم پودر نشان می‌دهد. با متراکم‌تر شدن پودر نسبت پواسون روند کاهشی به خود می‌گیرد. در چگالی‌های پایین و نزدیک به چگالی اولیه استخراج خواص کشسانی بسیار دشوار بوده و عملاً امکان‌پذیر نیست. بنابراین داده‌های چهار مرحله‌ی آخر فشردن چند مرحله‌ای در معرض نمایش قرار گرفته است. آرگانی و همکاران [۴۴] برای پودر KMS-96 به کمک آزمون التراسونیک رفتار مدول یانگ و نسبت پواسون را در فشارهای بالا به صورت تابعی خطی از چگالی و با مقادیری به مراتب پایین‌تر از مقادیر به دست آمده برای مدول یانگ در این پژوهش گزارش کرده‌اند.



شکل ۴-۱۵ نمودار نسبت پواسون بر حسب چگالی نسبی.

شکل ۴-۱۶ تغییرات دیگر ویژگی کشسانی ماده یعنی مدول یانگ را نمایش می‌دهد. این ویژگی با متراکم‌تر شدن پودر سیر صعودی به خود گرفته به طوری که در چگالی‌های بین ۴۰٪ تا ۶۰٪ به طور ملایم و بعد از آن این سیر صعودی شدت می‌یابد. این سیر صعودی قابل توجه در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است [۱۹, ۳۱, ۳۳, ۴۲, ۴۳] این ویژگی نیز به دلیل عدم امکان استخراج خواص از باربرداری‌های چگالی‌های پایین تنها

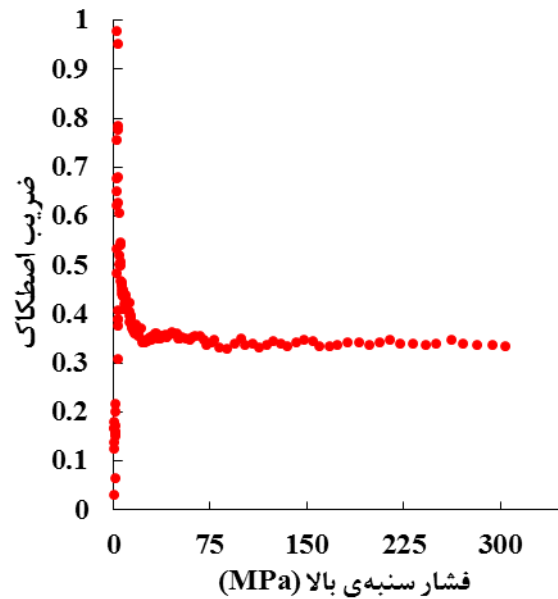
در ۴ مرحله‌ی آخر فرآیند گزارش شده است. برخی محققان نیز برای پودر آلومینا مقادیر مدول یانگ و ضریب اصطکاک را ثابت گزارش کرده‌اند [۱۶, ۴۵]. زئوچ و همکاران [۷] مدول یانگ و نسبت پواسون را به صورت تابعی خطی از فشار شکل‌دهی برای پودرهای با ترکیب متفاوت آلومینا بیان کردند.



شکل ۴-۱۶: نمودار مدول یانگ بر حسب چگالی نسبی.

۴-۱-۴ شرایط اصطکاک

اصطکاک از مهم‌ترین ویژگی‌های اثرگذار بر تراکم پودرها درون قالب است. این ویژگی می‌تواند به ناهمگونی در ساختار قطعه‌ی نهایی تولید شده و در نتیجه عدم کارایی آن شود. از این رو تعیین درست آن غیر قابل چشم‌پوشی است. ضریب اصطکاک با اندازه‌گیری تنش‌های بالا و پایین و نیز تنش شعاعی وارد به دیواره‌ی قالب به کمک رابطه‌ی (۲-۴۴) محاسبه و در شکل ۴-۱۷ بر حسب فشار تراکم نمایش داده شده است. در مراحل ابتدایی تراکم احتمالاً به خاطر خطای نیروسنج‌ها ضریب اصطکاک محاسبه شده به طور بسیار نامنظم در حال تغییر است اما از فشار حدوداً ۱۵ MPa به بعد ضریب اصطکاک تقریباً برابر با مقدار ثابت ۰/۳۵ باقی می‌ماند. ژو و همکاران [۲۱] نیز رفتار مشابه را برای اصطکاک در فشارهای بالا برای پودر مرکب فلزی گزارش کرده‌اند.



شکل ۴-۱۷: تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب فشار تراکم.

پس از به دست آمدن همه‌ی پارامترهای مورد نیاز مدل MDPC نوبت به کالیبره کردن آن می‌رسد. به این روند در بخش بعد پرداخته شده است.

۴-۲- مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود با نتایج آزمون تجربی

۴-۲-۱ آزمون بارگذاری - باربرداری چند مرحله‌ای

شرایط مشابه آزمون انجام شده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و مقادیر پارامترهای به دست آمده به نرم‌افزار داده شدند. شبیه‌سازی فرآیند با استفاده از مدل مومسانی MDPC به کمک یک زیر برنامه‌ی USDFLD وابسته به تغییرات چگالی نسبی انجام شد.

جدول ۴-۱ پارامترهای داده شده به مدل مومسانی MDPC نرم‌افزار آباکوس را بر حسب تغییرات چگالی نشان می‌دهد. کرنش مومسان اولیه $\epsilon_{pl}|_0$ دارای مقدار بسیار کوچک دلخواه است [۲۳، ۲۵]، در این پژوهش مقدار آن ۰/۰۱ انتخاب شده است. بنا به تجربه‌ای که در هنگام کار با این ماده به دست آمده است، حین فشردن پودر عملاً در چگالی‌های کمتر از ۵۰٪ قرصی تشکیل نشده و گرانول‌ها هنوز به یکدیگر متصل نشده‌اند و در واقع اگر قرصی تشکیل شده باشد دارای ساختار بسیار سست بوده و حین خروج از قالب این ساختار از

هم پاشیده و از قالب بیرون می‌ریزد. چنانچه از شکل ۴-۱۲ مشخص است از چگالی حدود ۵۰٪ به بالا مقدار خروج از مرکز کپ R تقریباً ثابت باقی مانده است، به همین جهت مقدار ثابت ۰/۸۵ برای این پارامتر انتخاب شده است. پارامتر سطح گذار α دارای مقداری بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ است [۲۵] که برای شبیه‌سازی فرایند مورد نظر مقدار ۰/۰۱ انتخاب شده است. پارامتر نرخ تنش جریان K_{flow} مقداری بین ۰/۷۷۸ تا ۱ دارد [۲۵]. مقدار پیش فرض این پارامتر در آباکوس که برابر ۱ بوده [۲۳] انتخاب شده است. پارامترهای d و β از نمودارهای تجربی مربوط به خودشان بر حسب چگالی برازش شده‌اند.

جدول ۴-۱- پارامترهای مدل مومسانی MDPC.

d	β	R	$\epsilon_{pl} _0$	α	K_{flow}	ρ_{rel}
۰/۰۱۲۹	۶۸/۶۴۶۰	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۳۳۱۵
۰/۰۳۸۳	۶۸/۸۵۴۰	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۳۸۲۵
۰/۰۸۲۳	۶۹/۰۰۰۲	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۴۲۲۹
۰/۱۹۱۸	۶۹/۱۶۲۳	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۴۷۲۶
۰/۴۸۰۵	۶۹/۳۳۸۷	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۵۳۳۱
۱/۳۵۲۲	۶۹/۵۳۷۹	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۶۱۰۷
۳/۹۷۵۶	۶۹/۷۴۶۲	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۷۰۳۵
۶/۴۷۳۰	۶۹/۸۴۰۵	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۷۵۰۰
۱۰/۵۸۳۸	۶۹/۹۳۵۸	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۸۰۰۰
۱۶/۷۹۶۹	۷۰/۰۲۵۵	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۸۵۰۰
۲۵/۹۶۲۵	۷۰/۱۱۰۱	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۰/۹۰۰۰

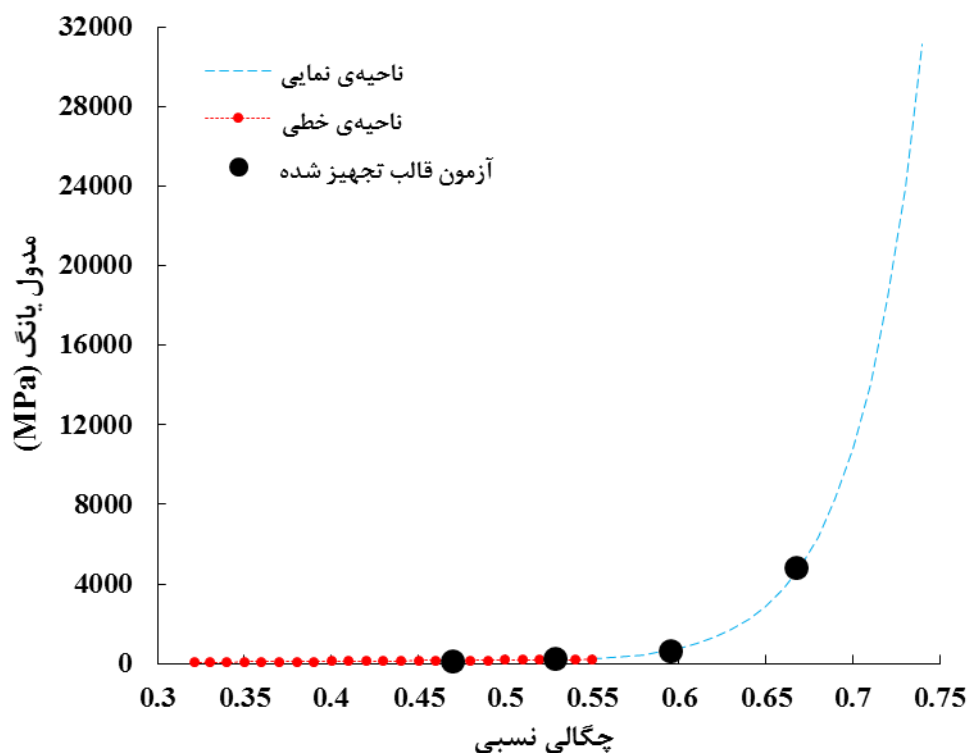
تنش تسلیم هیدرواستاتیک و کرنش حجمی مومسان پارامترهای سخت‌شوندگی کپ به حساب می‌آیند. تنش تسلیم هیدرواستاتیک یک تابع نمایی بر حسب کرنش حجمی مومسان است [۲۵]. جدول ۲-۴ پارامترهای سخت‌شوندگی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴- پارامترهای سخت‌شوندگی مدل MDPC.

p_b	ε_v^D
۰/۰۶۸۱	۰
۰/۳۴۳۱	۰/۱۴۲۹
۱/۰۱۷۰	۰/۲۳۸۹
۳/۵۱۸۴	۰/۳۴۸۶
۱۳/۲۷۸۶	۰/۴۶۶۰
۵۱/۱۶۶۷	۰/۵۸۵۲
۱۸۶/۹۷۵۷	۰/۶۹۹۷
۷۰۱/۱۰۴۳	۰/۸۱۶۵
۱۴۵۵/۲۹۵۳	۰/۸۸۱۱
۲۸۸۹/۹۴۳۹	۰/۹۴۱۷
۵۵۲۰/۵۹۵۱	۰/۹۹۸۹

مدول یانگ و نسبت پواسون نیز با تغییر چگالی نسبی پودر در حال تغییر هستند. از شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ مشخص است که تعداد نقاط به خاطر عدم دسترسی به داده‌های صحیح در چگالی‌های پایین محدود است. به همین خاطر مقادیر پارامترهای کشسانی بر حسب چگالی نسبی برون‌یابی شده‌اند. مقادیر نسبت پواسون با استفاده از رابطه‌ی منحنی برازش شده برای چگالی‌های مختلف به دست آمده است. مدول یانگ رفتاری پیچیده از خود نشان می‌دهد به طوری که منحنی‌های نمایی و توانی برازش شده بر شکل ۴-۱۶ منجر به شبیه‌سازی‌های دقیق نشده و منحنی نیرو - جابجایی آنها بر منحنی نیرو - جابجایی تجربی منطبق نمی‌شود.

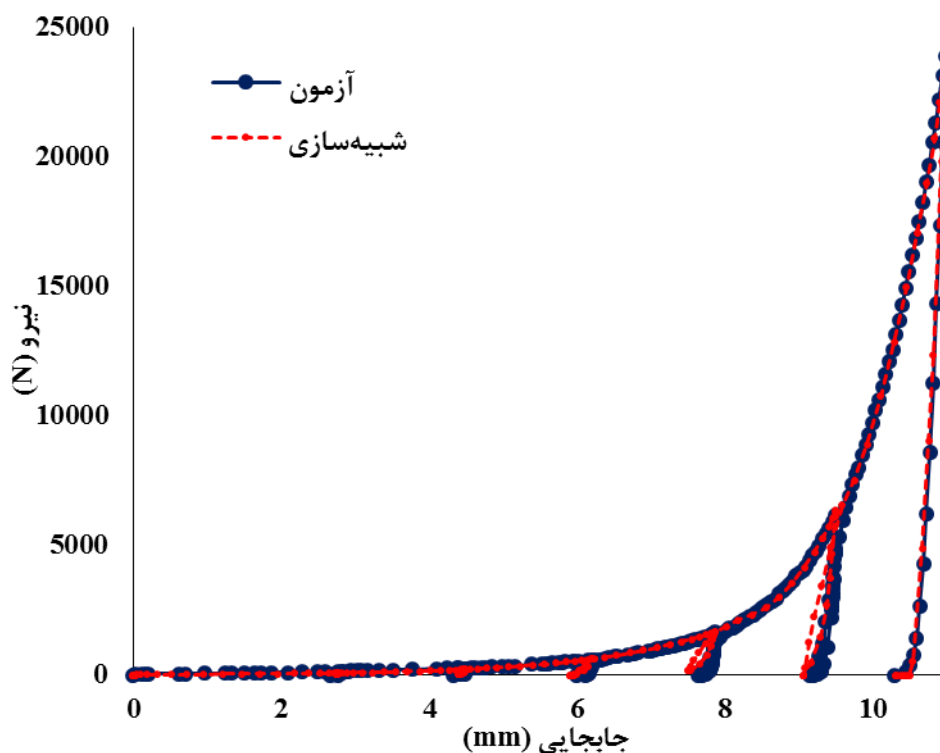
با سعی و خطا برای تغییرات مدول یانگ با چگالی نسبی رفتاری به دست آمد که متشکل از یک رفتار خطی در چگالی‌های پایین و رفتار نمایی در چگالی‌های بالاتر است. شکل ۴-۱۸ مقادیر به دست آمده برای مدول یانگ را بر حسب چگالی نسبی نشان می‌دهد. انطباق بسیار خوب نقاط به دست آمده از آزمون تراکم تک‌محوری با قالب تجهیز شده مشهود است.



شکل ۴-۱۸: مقادیر برون‌یابی و تصحیح شده برای مدول یانگ بر حسب چگالی نسبی.

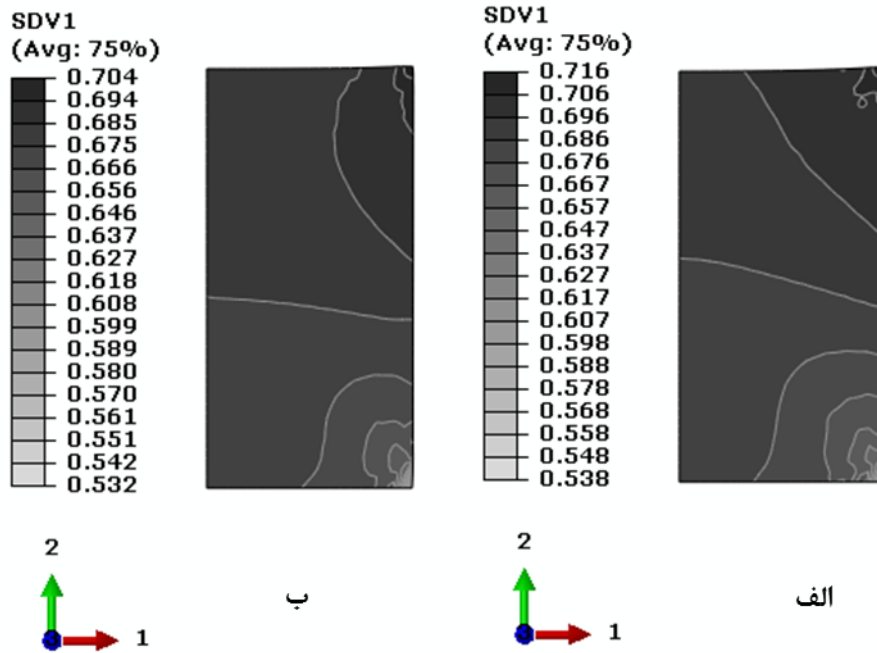
برای انجام شبیه‌سازی رفتار تماسی، ضریب اصطکاک در راستای مماسی برابر با ۰/۳۵ انتخاب شد.

در حین انجام شبیه‌سازی زیربرنامه‌ی USDFLD مقدار چگالی نسبی را در انتهای هر نمو زمانی محاسبه می‌کند. خروجی نیرو و جابجایی در راستای محور بارگذاری برای سنبه‌ی بالایی از نرم‌افزار درخواست شده و با استفاده از آنها منحنی نیرو - جابجایی شبیه‌سازی به دست آمد. شکل ۴-۱۹ منحنی‌های نیرو - جابجایی تجربی و آزمون را نشان می‌دهد. انطباق بسیار خوب این دو منحنی حاکی از پارامترهای به دست آمده‌ی صحیح برای مدل رفتاری MDPC است.



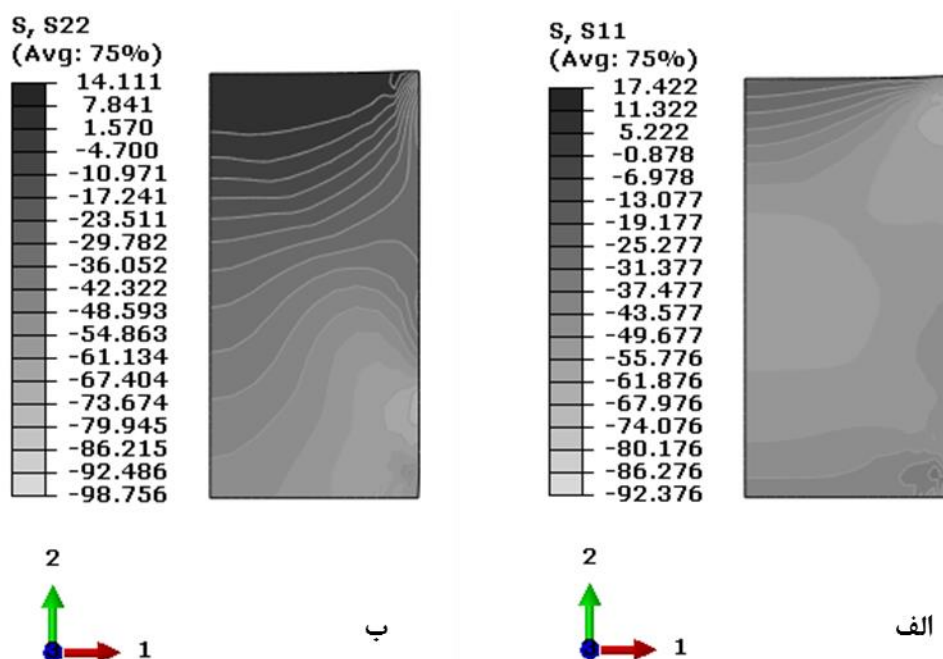
شکل ۴-۱۹: منحنی نیرو - جابجایی تجربی و شبیه‌سازی.

اصطکاک بین دیواره‌ی قالب و پودر باعث به وجود آمدن گرادیان‌های تنش و در نتیجه گرادیان‌های چگالی می‌شود، از این رو در فرآیندهای فشردن پودر خصوصاً درون قالب‌های تراکم تک‌محوری توزیع چگالی در لایه‌های مختلف قطعه‌ی به دست آمده دارای مقادیر مختلف خواهد بود. خروجی SDV1 برای چگالی نسبی در شبیه‌سازی درخواست شد، شکل ۴-۲۰ توزیع چگالی نسبی به دست آمده از شبیه‌سازی را در قطعه در انتهای مرحله‌ی آخر بارگذاری و پس از باربرداری نشان می‌دهد. بیشترین تراکم در بالاترین بخش قطعه، در مرز پودر و دیواره‌ی قالب (بالاترین ناحیه در سمت راست قطعه) اتفاق می‌افتد. کمترین میزان فشردگی نیز در مرز بین پودر و دیواره‌ی قالب اما در پایین‌ترین نقطه به وقوع می‌پیوندد (پایین‌ترین ناحیه در سمت راست قطعه). به خاطر حضور اصطکاک در تراکم تک‌محوری، تنشی که به لایه‌های پایین‌تر پودر خصوصاً نزدیک به دیواره‌ی قالب انتقال می‌یابد کمتر از تنش اعمالی به لایه‌های بالایی پودر است در نتیجه بخش‌های پایین قطعه چگالی نسبی پایین‌تری دارند. ناحیه‌ی میانی قطعه که شامل بخش وسیعی است دارای چگالی یکنواخت‌تری نسبت به سایر قسمت‌های پودر است.



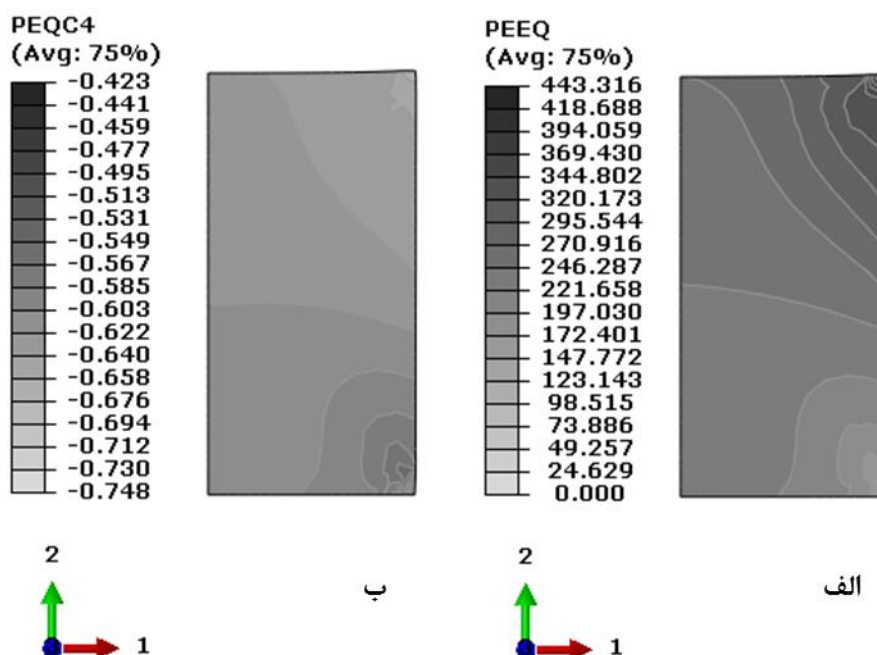
شکل ۴-۲۰: توزیع چگالی نسبی الف) در انتهای بارگذاری مرحله‌ی آخر، ب) پس از باربرداری.

شکل ۴-۲۱ توزیع تنش را در راستای شعاعی و محور بارگذاری در انتهای فرآیند پس از اتمام باربرداری نشان می‌دهد. در این حالت تنها قسمت بالای قالب آزاد شده ولی دیگر نواحی همچنان تحت تنش وارد شده از دیواره‌ی قالب قرار دارند. به خاطر وجود همین تنش‌های پسماند ارتفاع و قطر قطعه پس از خروج از قالب افزایش پیدا می‌کنند.



شکل ۴-۲۱: توزیع تنش در راستای محور بارگذاری و محور شعاعی پس از اتمام فرآیند (واحدها به MPa هستند).

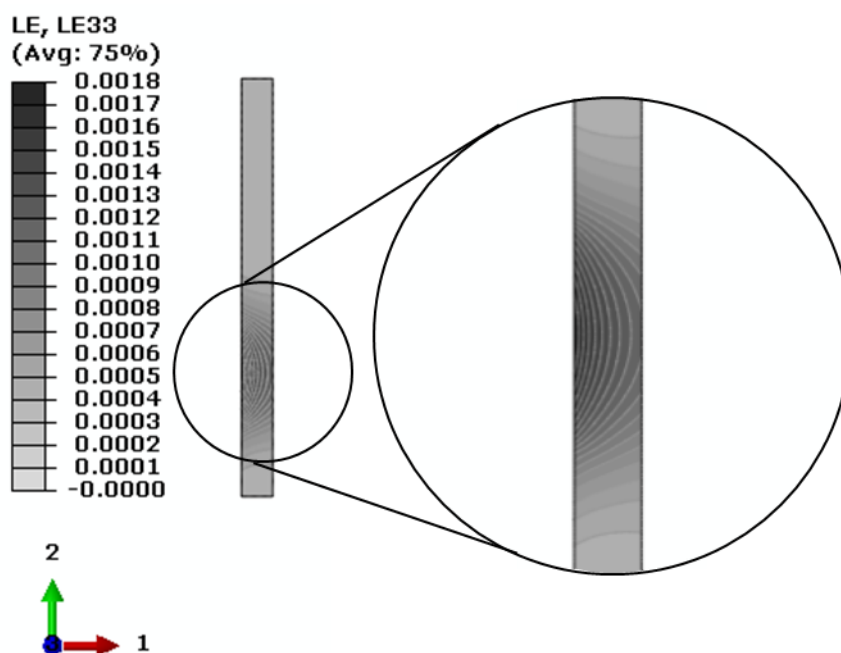
نرم‌افزار آباکوس در مدل MDPC تنش تسلیم هیدرواستاتیک را با خروجی PEEQ و کرنش‌های مومسان را با خروجی‌های PEQC1, PEQC2, PEQC3, PEQC4 را ارائه می‌کند که به ترتیب کرنش مومسان معادل در سطح خرابی دراکر - پراگر، سطح کپ، سطح گذار و کرنش حجمی مومسان کل هستند [۲۵]. شکل ۴-۲۲ - الف توزیع تنش تسلیم هیدرواستاتیک (موقعیت کپ) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ناحیه‌ی پایین پودر نزدیک به دیواره‌ی قالب به سطح تسلیم کپ نرسیده است. شکل ۴-۲۲-ب نیز نشانگر کرنش حجمی مومسان کل در قطعه است. طبق این شکل نواحی پایین پودر کمتر دچار تغییرشکل مومسان شده‌اند.



شکل ۴-۲۲ الف) توزیع تنش تسلیم هیدرواستاتیک (واحد به MPa)، ب) توزیع کرنش حجمی مومسان کل.

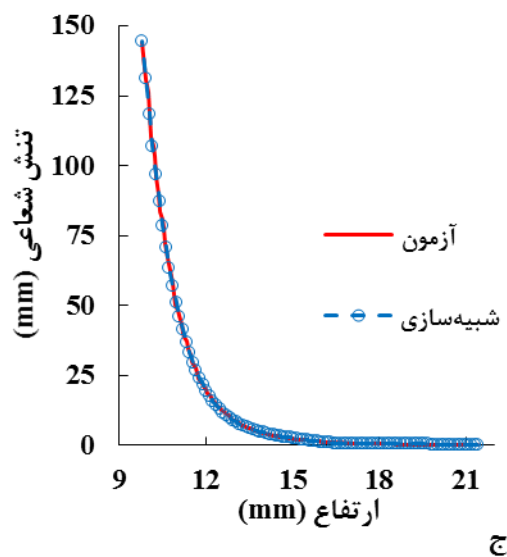
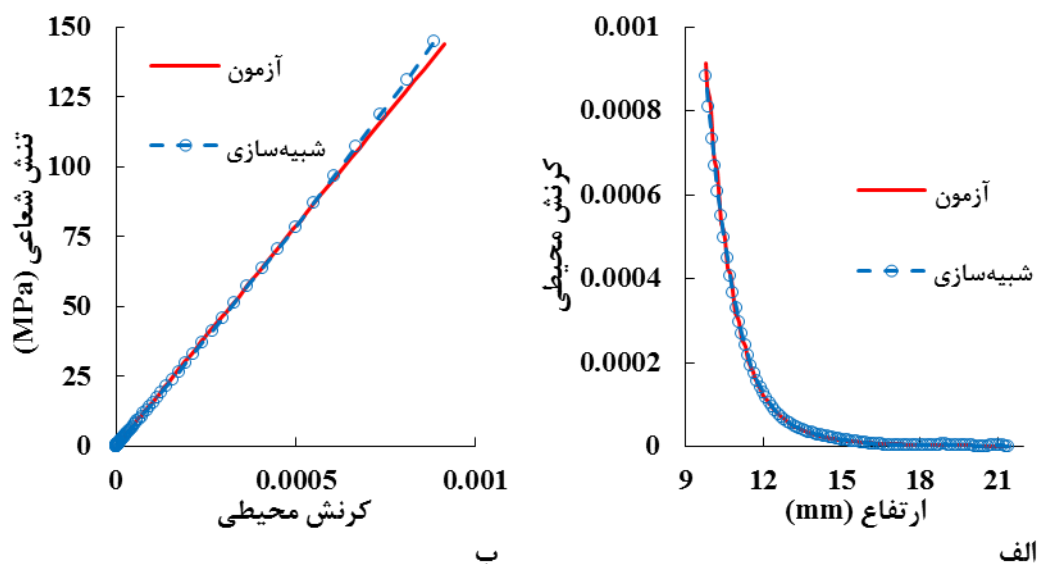
۴-۲-۲ کالیبراسیون اندازه‌گیری کرنش محیطی

یکی از عوامل مهم برای کالیبره کردن مدل MDPC با استفاده از قالب تجهیز شده اطلاع دقیق از تنش شعاعی است. در این پژوهش تنش شعاعی به صورت غیر مستقیم از کرنش محیطی با استفاده از کرنش‌سنج نصب شده روی دیواره‌ی خارجی قالب استوانه‌ای به دست می‌آید. با تغییر ارتفاع پودر درون قالب فشار وارد بر دیواره‌ی قالب در حال تغییر است. برای شبیه‌سازی مورد نظر از داده‌های تنش شعاعی به دست آمده از تراکم تک‌محوری یک مرحله‌ای برای بیان فشار وارد بر دیواره به صورت تابعی از جابجایی استفاده شد، تابع فشار مورد نظر به کمک زیر برنامه‌ی DLOAD به نرم‌افزار آباکوس اعمال شد و در نهایت خروجی کرنش محیطی برای المانی که دقیقاً در موقعیت حسگر نصب شده روی قالب قرار داشت درخواست شد. شکل ۴-۲۳ توزیع کرنش محیطی بر دیواره‌ی قالب را در ارتفاع نهایی پودر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۳: توزیع کرنش محیطی در دیواره‌ی قالب در حداکثر فشار.

شکل ۴-۲۴ ارتباط بین تنش شعاعی و کرنش محیطی را با ارتفاع پودر در حال تراکم نشان می‌دهد. انطباق بسیار خوب منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی حاکی از درستی عملکرد کرنش‌سنج نصب شده روی دیواره‌ی خارجی قالب است.

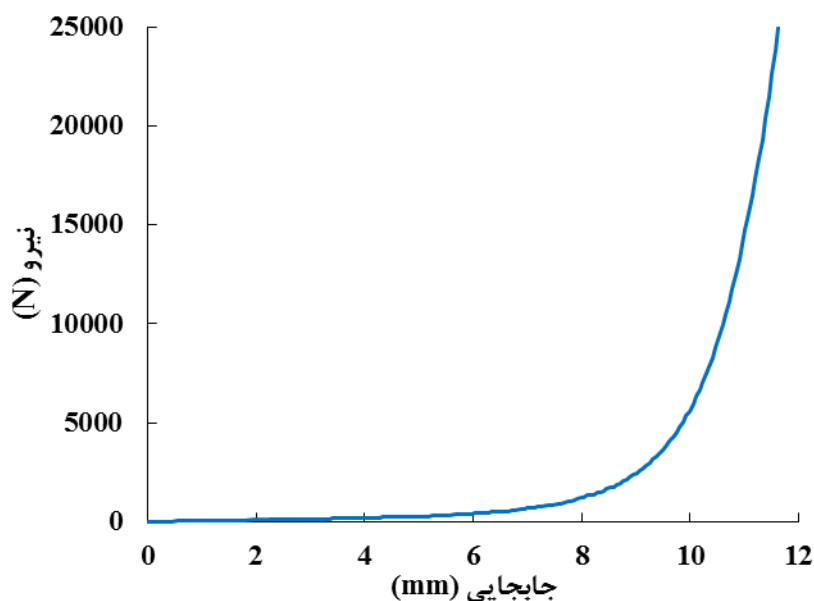


شکل ۴-۲۴: منحنی‌های الف) کرنش محیطی - ارتفاع، ب) تنش شعاعی - کرنش محیطی و ج) تنش شعاعی بر حسب ارتفاع پودر.

۴-۳- تعیین پارامترهای مدل MDPC به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی

آزمون فشردن تک‌محوری برای پودر مشابه با پودر KMS-92 انجام شده و منحنی - نیرو جابجایی آن به

دست آمد (شکل ۴-۲۵).



شکل ۴-۲۵: منحنی نیرو بر حسب جابجایی آزمون تک محوری.

۴-۳-۱ تحلیل حساسیت

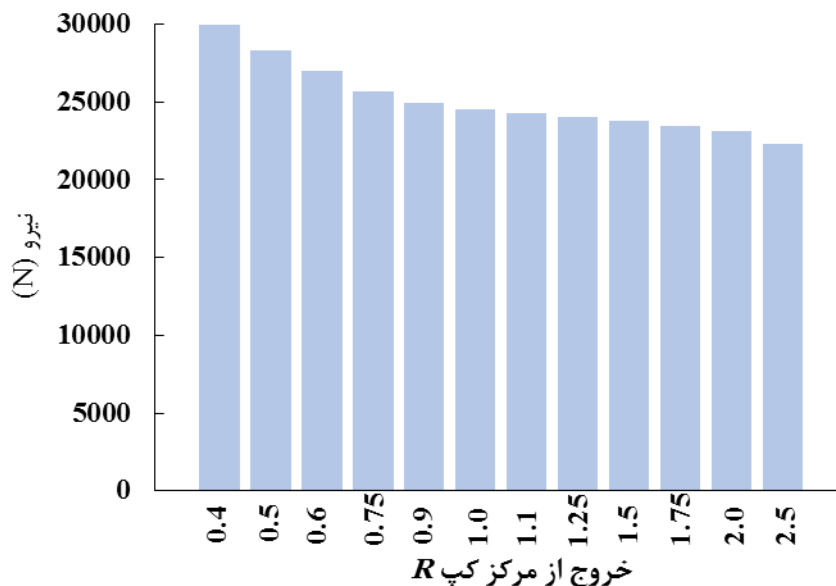
پارامترهای سطح خرابی برشی d و β از آزمون‌های فشردن قطری و محوری به دست آمدند (۳-۲-۲ و شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶). مدول یانگ ماده نیز به خاطر ماهیت پیچیده‌ای که داشت، معلوم و مطابق شکل ۴-۱۸ در نظر گرفته شد. نیروی حداکثر به دست آمده به عنوان واکنش تحلیل به تغییر پارامترها در نظر گرفته شد. پارامترهای مدل MDPC نظیر α ، ε_V^p و K_{flow} تاثیر چندانی بر حداکثر نیروی ندارند [۲۳]. به همین خاطر مقادیر آنها نیز معلوم فرض شد. α پارامتر سطح گذار مقدار کوچک 0.01 ، ε_V^p مقدار دلخواه 0.01 و K_{flow} برابر با ۱ در نظر گرفته شد. این مقدار برای K_{flow} توسط برخی پژوهشگران نیز به کار رفته است [۲۳، ۲۷، ۴۶].

شبیه‌سازی‌هایی با مقادیر مختلف برای پارامتر خروج از مرکز کپ R ، تنش تسلیم هیدرواستاتیک p_b ، نسبت پواسون و ضریب اصطکاک بدون تغییر سایر پارامترها انجام شده و نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفتند.

شکل ۴-۲۶ اثر خروج از مرکز کپ را بر حداکثر نیروی سنبه نشان می‌دهد. این پارامتر می‌تواند مقداری در بازه‌ی وسیع از 0.0001 تا 1000 داشته باشد [۲۳، ۲۵]. از می‌توان دریافت که خروج از مرکز بر شبیه‌سازی عددی اثرگذار بوده و باید به دقت تعیین شود.

بازه‌ی $0.75 < R < 1/25$ نیروی حداکثر سنبه را نزدیک به آزمون و از سوی دیگر نزدیک به مقدار به

دست آمده برای خروج از مرکز در آزمون تراکم تک‌محوری درون قالب تجهیز شده پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۴-۲۶: اثر خروج از مرکز کپ R بر حداکثر نیروی سنبه.

دیگر پارامتر اثرگذار بر تراکم پودر اصطکاک است. این پارامتر بر رفتار تراکمی و توزیع چگالی در قطعه‌ی

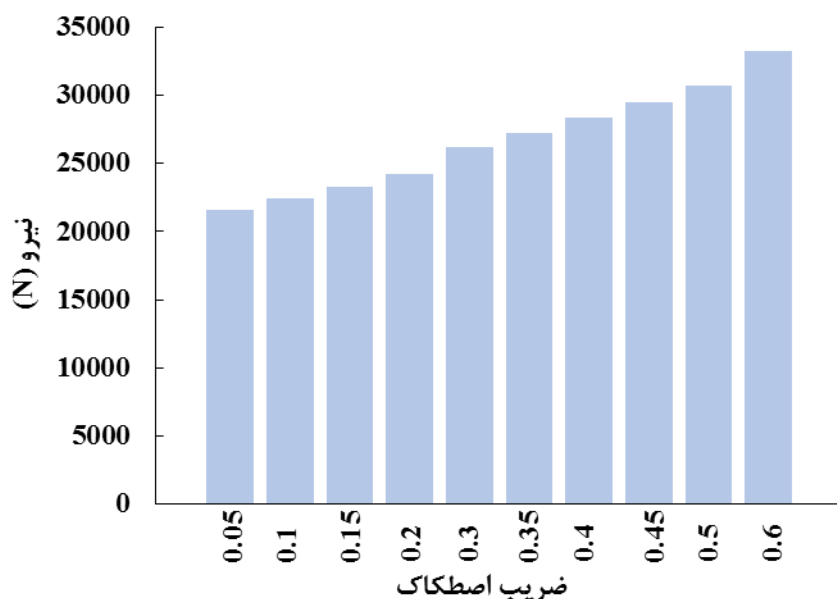
نهایی اثر بسیار مشهودی دارد. ضریب اصطکاک با استفاده از قالب تجهیز شده به دست آمده است اما فرض بر

این است که دسترسی به تجهیزات انجام این آزمون میسر نبوده و بر اساس محدوده‌ای که از تحلیل حساسیت

انجام شده برای این پارامتر مقدار صحیح آن پیدا خواهد شد. شکل ۴-۲۷ تاثیر ضریب اصطکاک بر نیروی

حداکثر سنبه را نشان می‌دهد. از ضریب اصطکاک 0.35 به بعد، نیروی حداکثر به دست آمده اختلاف زیادی

با نیروی به دست آمده از آزمون پیدا کرده است.



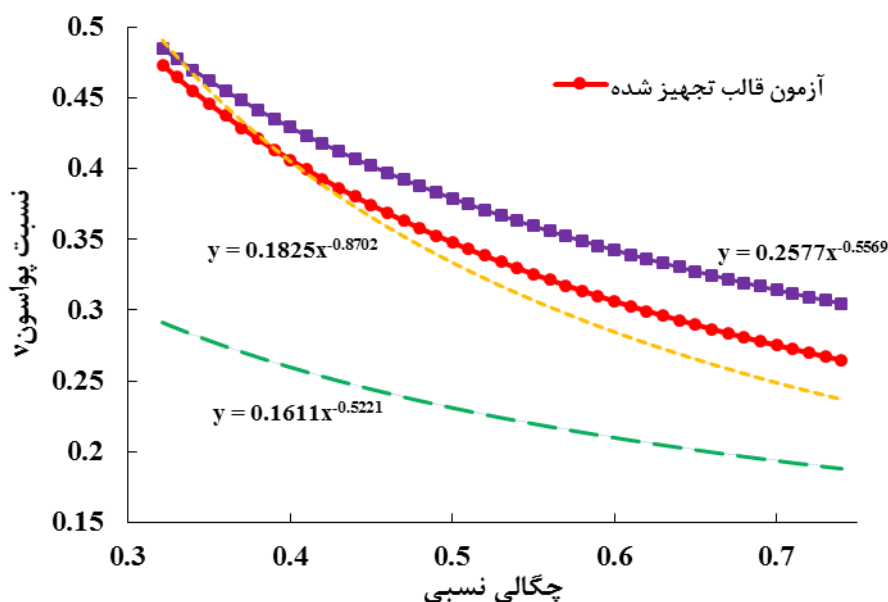
شکل ۴-۲۷: اثر ضریب اصطکاک بر حداکثر نیروی سنبه.

پارامتر بعدی نسبت پواسون است که بر خلاف دو پارامتر قبلی که مستقل از چگالی بوده‌اند در طول فرایند با تغییر چگالی، متغیر است. عطریان و همکاران [۲۳] این پارامتر را ثابت فرض کرده‌اند حال آنکه در واقع این پارامتر در حین فرایند همواره در حال تغییر است. با استفاده از آزمون قالب تجهیز شده برای KMS-92 رفتار نسبت پواسون به صورت توانی پیش‌بینی شد در این بخش برای اینکه نشان داده شود این رویکرد برای پیش‌بینی خصوصیات پودرهای مشابه کارایی دارد، رفتار نسبت پواسون با چگالی نسبی معلوم اما در یک بازه‌ی خاص در نظر گرفته شد. به این صورت که ضرایب منحنی گذرنده از نمودار نسبت پواسون - چگالی نسبی به دست آمده از تراکم در قالب تجهیز شده هر کدام در بازه‌ی $\pm 2.5\%$ از مقدار خود تغییر داده شده و برای هر کدام ۱۳ مقدار در این بازه تعریف شد که در مجموع ۱۶۹ ترکیب منحصر به فرد می‌شوند. رابطه‌ی (۴-۱) این به بیان ریاضی این تابع می‌پردازد.

$$v = c \cdot \rho_{rel}^d \quad (۴-۱)$$

این ۱۶۹ ترکیب برای انجام شبیه‌سازی به نرم‌افزار آباکوس داده شدند. از مجموع شبیه‌سازی‌های قابل قبول در نهایت سه مجموعه از پارامترهای (c, d) به عنوان ضرایب نسبت پواسون برای شبیه‌سازی‌های عددی شبکه‌ی عصبی انتخاب شدند. شکل ۴-۲۸ تعدادی از منحنی‌های به دست آمده برای نسبت‌های پواسون

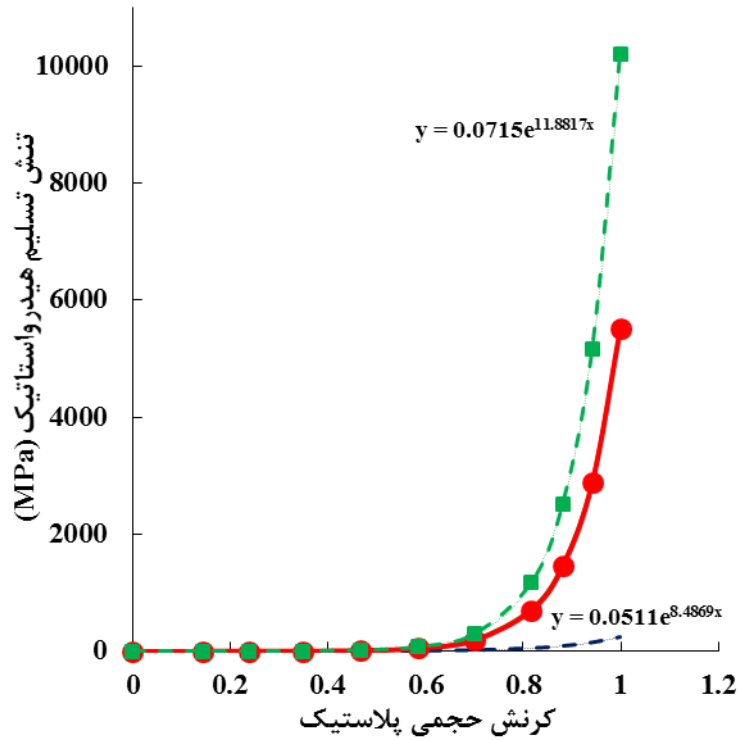
مختلف پیرامون منحنی به دست آمده از قالب تجهیز شده را نشان می‌دهد. با تغییر اندک مولفه‌های c و d رفتار بسیار پیچیده‌ای در تغییرات نسبت پواسون اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۲۸: منحنی نسبت پواسون - چگالی نسبی با مولفه‌های متفاوت تابع توانی.

تنش تسلیم هیدرواستاتیک تابعی نمایی از کرنش حجمی مومسان است و طبق رابطه‌ی (۴-۲) بیان شد. همانند انتخاب بازه برای نسبت پواسون برای a و b نیز در بازه‌ی $\pm 2.5\%$ از مقادیر هرکدام ۱۳ مقدار در نظر گرفته شده و با تنش تسلیم هیدرواستاتیک متفاوت نیز ۱۶۹ شبیه‌سازی انجام شد. نیروی حداکثر در شبیه‌سازی‌هایی که کامل به اتمام رسیدند بررسی شده و در نهایت برای پارامتر تنش تسلیم هیدرواستاتیک سه دسته پارامتر به صورت مجموعه‌ی (a, b) جهت استفاده در شبیه‌سازی‌های المان محدود مورد نیاز شبکه‌های عصبی انتخاب شدند. شکل ۴-۲۹ منحنی تنش تسلیم هیدرواستاتیک - کرنش حجمی مومسان به دست آمده از تعدادی a و b مختلف را نشان می‌دهد.

$$p_b = a \cdot \exp(b \cdot \varepsilon_v^p) \quad (۴-۲)$$



شکل ۴-۲۹: منحنی تنش تسلیم هیدرواستاتیک - کرنش حجمی مومسان با مولفه‌های متفاوت تابع نمایی.

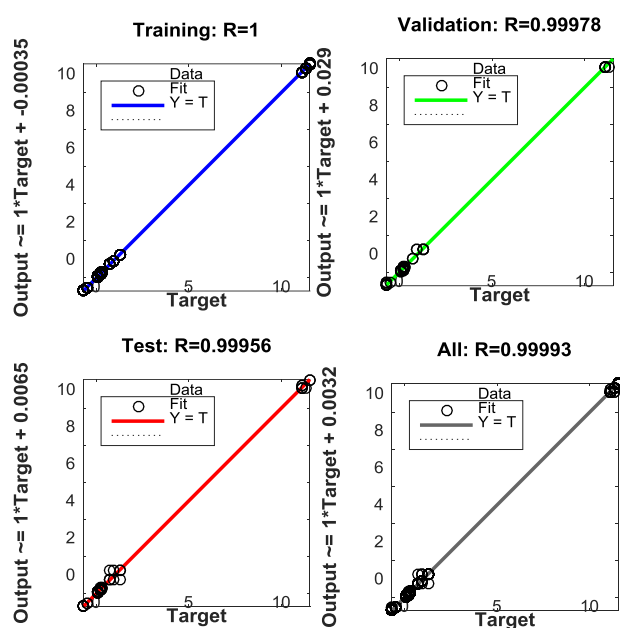
جدول ۴-۳ نشانگر محدوده‌ی مناسب به دست آمده از تحلیل حساسیت برای خروجی‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی است.

جدول ۴-۳- محدوده‌ی مناسب برای خروجی‌های شبکه‌ی عصبی.

رفتار ماده	کشسانی	پارامتر کپ	پارامتر سخت‌شوندگی	اصطکاک
مقادیر	ν به صورت:	R	p_b به صورت:	μ
	(c, d)		(a, b)	
	$(-0.2104, -0.7101)$	0.75	$(0.0579, 11/5422)$	
	$(-0.2577, -0.5221)$	0.9	$(0.0613, 11/3160)$	0.1, 0.2, 0.3
	$(-0.2190, -0.6822)$	1/25	$(0.0749, 11/0.896)$	

در کل چهار دسته پارامتر که دو تا از آنها به صورت سه زوج مرتب و دو پارامتر دیگر هر کدام سه مقدار داشتند برای شبیه‌سازی‌های عددی به دست آمدند. تعداد ۸۱ ($3 \times 3 \times 3 \times 3$) شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار آباکوس برای تامین داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه‌ی عصبی انجام شدند.

برای منحنی نیرو - جابجایی هر کدام از ۸۱ شبیه‌سازی، یک منحنی درجه‌ی ۵ برازش شده و ضرایب آن (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) به عنوان ورودی و مقادیر پارامترها نیز به عنوان هدف جهت آموزش به شبکه وارد شدند. شبکه‌ی عصبی دو لایه با ۱۹ نرون در لایه‌ی مخفی با تابع انتقال tansig در هر دو لایه به آموزش شبکه پرداخت. شبکه‌ی مورد نظر با کارایی^۱ ۰/۰۰۸۲ در مبدأ^۲ ۳۳۲ ایجاد شد. شکل ۴-۳۰ مقادیر رگرسیون را برای شبکه‌ی مورد نظر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۰: مقادیر رگرسیون به دست آمده برای آموزش، صحت‌سنجی و آزمون شبکه.

مقادیر نهایی به دست آمده برای پارامترهای مدل MDPC با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در

جدول ۴-۴ به نمایش گذاشته شده‌اند.

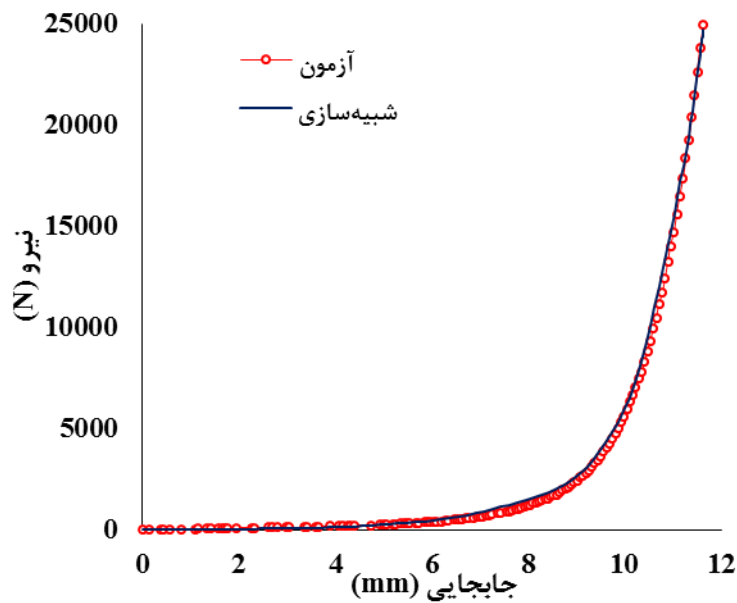
^۱ Performance

^۲ Epoch

جدول ۴-۴- مقادیر نهایی پارامترهای به دست آمده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای مدل MDPC.

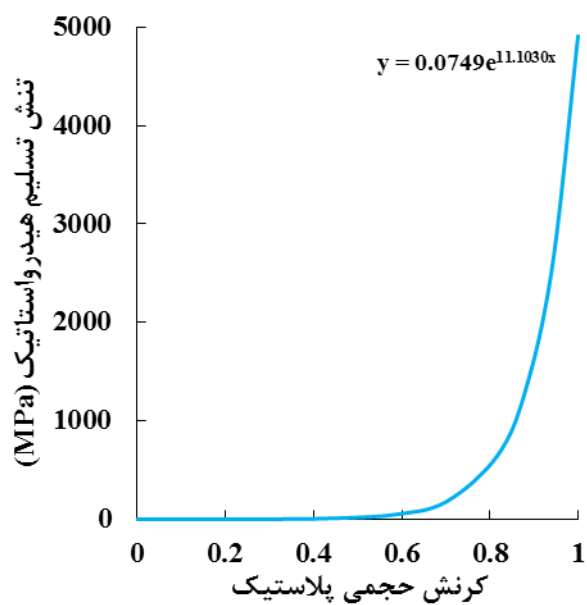
رفتار ماده	کشسانی		پارامتر کپ	پارامتر سخت‌شوندگی		اصطکاک
پارامتر	ν		R	p_b		μ
مقدار	c	d		a	b	
	۰/۲۵۷۷	-۰/۵۲۲۱	۰/۷۵	۱۱/۱۰۳	۰/۰۷۴۹	۰/۳

شکل ۴-۳۱ منحنی نیرو - جابجایی آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی با پارامترهای تخمین زده شده توسط شبکه‌ی عصبی را نشان می‌دهد.

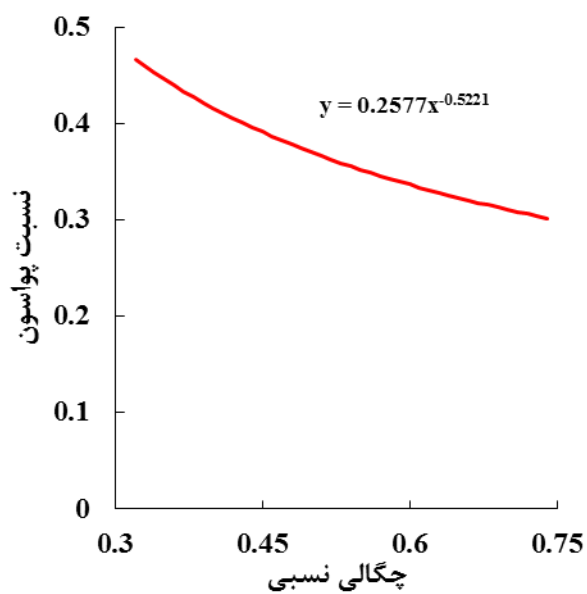


شکل ۴-۳۱: مقایسه‌ی منحنی نیرو - جابجایی آزمون تجربی و شبیه‌سازی به کمک شبکه‌ی عصبی.

به کمک روابط (۴-۱) و (۴-۲) و جدول ۴-۴ منحنی‌های تغییرات نسبت پواسون بر حسب چگالی و تنش تسلیم هیدرواستاتیک بر حسب کرنش حجمی مومسان به دست آمدند (شکل ۴-۳۲ و شکل ۴-۳۳).



شکل ۴-۳۲: منحنی سخت‌شوندگی به دست آمده از شبکه‌ی عصبی.



شکل ۴-۳۳: منحنی نسبت پواسون - چگالی نسبی به دست آمده از شبکه‌ی عصبی.

فصل ۵ نتیجه‌گیری

در این پژوهش پارامترهای مدل MDPC برای پودر آلومینای KMS-92 با استفاده از دو رویکرد به دست آمدند. آزمون‌های فشردن قطری و محوری منجر به یافتن پارامترهای سطح خرابی برشی ماده شدند. یک قالب مجهز به حسگر اندازه‌گیری کرنش برای تعیین پارامترهای سطح کپ، پارامترهای کشسان و ضریب اصطکاک استفاده شد. به کمک این قالب و بارگذاری - باربرداری چند مرحله‌ای، پارامترهای یاد شده برای چگالی نسبی‌های مختلف به دست آمدند. زیر برنامه‌ی USDFLD برای بیان رفتار ماده به صورت تابعی از چگالی نسبی در نرم‌افزار المان محدود به کار گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود با پارامترهای به دست آمده انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمون‌های تجربی داشتند. ضمن اینکه به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی و تنها با یک آزمون تک‌محوری ساده مدل دراکر - پراگر برای ماده‌ی مورد نظر کالیبره شد. با تحلیل حساسیت چند مقدار از هرکدام از پارامترهای سطح کپ، نسبت پواسون، اصطکاک و سخت‌شوندگی برای شبیه‌سازی‌های المان محدود مورد نیاز برای شبکه‌های عصبی انتخاب شدند. در این رویکرد اغلب پارامترهای مربوط به مدل‌سازی ثابت نبوده و به صورت متغیر در نظر گرفته شدند. نسبت پواسون و تنش تسلیم هیدرواستاتیک به ترتیب به صورت تابع توانی از چگالی نسبی و تابعی نمایی از کرنش حجمی مومسان بیان شدند. ضرایب آن‌ها به همراه خروج از مرکز کپ و ضریب اصطکاک به عنوان هدف و ضرایب منحنی درجه ۵ برازش شده از نیرو - جابجایی حاصل از شبیه‌سازی‌ها به عنوان ورودی به شبکه‌ی عصبی اعمال شدند. پس از آموزش شبکه‌ی عصبی ضرایب منحنی درجه ۵ برازش شده بر منحنی نیرو - جابجایی حاصل از آزمون تک‌محوری به عنوان ورودی به شبکه داده شده و خروجی درخواست شد، پارامترهای به دست آمده از خروجی به عنوان پارامترهای مجهول در مدل رفتاری به نرم‌افزار المان محدود وارد شدند. نتیجه‌ی حاصل از شبیه‌سازی تطابق بسیار خوبی با نتیجه‌ی آزمون تک‌محوری داشت.

از پیشنهادهایی که می‌توان برای توسعه‌ی این پژوهش ارائه کرد، می‌توان به یافتن ثوابت کشسانی با استفاده از روش‌هایی مانند آزمون التراسونیک و بررسی حالت استفاده از روانکار در آزمون تراکم تک‌محوری اشاره کرد.

- [1] G. S. Upadhyaya, "*Powder Metallurgy Technology*," Cambridge International Science Publishing, 1997, p. 1.
- [2] C. Lu, "Determination of cap model parameters using numerical optimization method for powder compaction," PHD, Marquette University, 2010.
- [3] C. Shang, "Modelling powder compaction and breakage of compacts," PHD, University of Leicester, 2012.
- [4] W. Wang, "Numerical modeling of compaction of particulate systems," M. Sc., State University System of Florida, 1999.
- [5] K. Kim, S. Choi, and H. Park, "Densification behavior of ceramic powder under cold compaction," *Transactions-American Society of Mechanical engineers Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 122, no. 2, pp. 238-244, 2000.
- [6] H. Park and K. Kim, "Consolidation behavior of SiC powder under cold compaction," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 299, no. 1, pp. 116-124, 2001.
- [7] D. H. Zeuch, J. Grazier, J. Argüello, and K. G. Ewsuk, "Mechanical properties and shear failure surfaces for two alumina powders in triaxial compression," *Journal of materials science*, vol. 36, no. 12, pp. 2911-2924, 2001.
- [8] R. Henderson and B. Moriarty, "Finite element modelling of decompression after isostatic pressing," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 216, no. 2, pp. 215-224, 2002.
- [9] Y. Foo, Y. Sheng, and B. Briscoe, "An experimental and numerical study of the compaction of alumina agglomerates," *International journal of solids and structures*, vol. 41, no. 21, pp. 5929-5943, 2004.
- [10] R. Furukawa, K. Kadota, T. Noguchi, A. Shimosaka, and Y. Shirakawa, "DEM Modelling of Granule Rearrangement and Fracture Behaviours During a Closed-Die Compaction," *AAPS PharmSciTech*, pp. 1-10, 2017.
- [11] G. S. Wagle, "Die compaction simulation: Simplifying the application of a complex constitutive model using numerical and physical experiments," Doctor of Philosophy, The Pennsylvania State University, 2006.

-
- [12] C. Wu, B. C. Hancock, J. A. Elliott, S. M. Best, A. C. Bentham, and W. Bonfield, "Finite Element Analysis of Capping Mechanisms during Pharmaceutical Powder Compaction," *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, vol. 1, pp. 62-73, 2005.
- [13] P. Carlone and G. Palazzo, "Computational modeling of the cold compaction of ceramic powders," *International Applied Mechanics*, vol. 42, no. 10, pp. 1195-1201, 2006.
- [14] Y. Gu, R. Henderson, and H. Chandler, "Visualizing isostatic pressing of ceramic powders using finite element analysis," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 26, no. 12, pp. 2265-2272, 2006.
- [15] H. Shin, J.-B. Kim, S.-J. Kim, and K. Y. Rhee, "A simulation-based determination of cap parameters of the modified Drucker–Prager cap model by considering specimen barreling during conventional triaxial testing," *Computational Materials Science*, vol. 100, pp. 31-38, 2015.
- [16] C. Melo, A. Moraes, F. Rocco, F. Montilha, and R. Canto, "A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 38, no. 8, pp. 2928-2936, 2018.
- [17] I. Sinka, J. Cunningham, and A. Zavaliangos, "The effect of wall friction in the compaction of pharmaceutical tablets with curved faces: a validation study of the Drucker–Prager Cap model," *Powder Technology*, vol. 133, no. 1-3, pp. 33-43, 2003.
- [18] L. Han, J. Elliott, A. Bentham, A. Mills, G. Amidon, and B. Hancock, "A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, no. 10, pp. 3088-3106, 2008.
- [19] H. Diarra *et al.*, "Finite Element Method (FEM) modeling of the powder compaction of cosmetic products: Comparison between simulated and experimental results," *Powder technology*, vol. 224, pp. 233-240, 2012.
- [20] J. Almanstötter, "A modified Drucker–Prager Cap model for finite element simulation of doped tungsten powder compaction," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 50, pp. 290-297, 2015.
- [21] M. Zhou *et al.*, "A density-dependent modified Drucker-Prager Cap model for die compaction of Ag₅₇. 6-Cu₂₂. 4-Sn₁₀-In₁₀ mixed metal powders," *Powder Technology*, vol. 305, pp. 183-196, 2017.
- [22] B. Zhang, M. Jain, C. Zhao, M. Bruhis, R. Lawcock, and K. Ly, "Experimental calibration of density-dependent modified Drucker-Prager/Cap model using an

- instrumented cubic die for powder compact," *Powder Technology*, vol. 204, no. 1, pp. 27-41, 2010.
- [23] A. Atrian, G. Majzoobi, B. Markert, and S. Nourbakhsh, "A novel approach to calibrate the Drucker–Prager Cap model for Al7075 powder," *Archive of Applied Mechanics*, pp. 1-18, 2018.
- [24] H. Kashani Zadeh, "Finite element analysis and experimental study of metal powder compaction," PHD, 2010.
- [25] D. S. Abaqus. Abaqus 6.14 Online Documentation [Online].
- [26] A. Baroutaji, K. Bryan, M. Sajjia, and S. Lenihan, "Mechanics and Computational Modeling of Pharmaceutical Tableting Process," 2014.
- [27] J. Cunningham, I. Sinka, and A. Zavaliangos, "Analysis of tablet compaction. I. Characterization of mechanical behavior of powder and powder/tooling friction," *Journal of pharmaceutical sciences*, vol. 93, no. 8, pp. 2022-2039, 2004.
- [28] O. Coube and H. Riedel, "Numerical simulation of metal powder die compaction with special consideration of cracking," *Powder Metallurgy*, vol. 43, no. 2, pp. 123-131, 2000.
- [29] M. Barrera and H. Sánchez, "Design of a Die for the Cold Compaction Calibration of Powdered Materials," *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales S*, vol. 1, pp. 223-234, 2009.
- [30] Y. B. Kim, J. S. Lee, S. M. Lee, H. J. Park, and G. A. Lee, "Calibration of a Density-dependent Modified Drucker-Prager Cap model for AZO powder," in *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 482, pp. 1249-1256: Trans Tech Publ.
- [31] Y. Hammi, T. W. Stone, B. Paliwal, M. F. Horstemeyer, and P. G. Allison, "Smooth Yield Surface Constitutive Modeling for Granular Materials," *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 139, no. 1, pp. 011010(1-10), 2017.
- [32] M. Zhou, S. Huang, W. Liu, Y. Lei, and S. Yan, "Experiment Analysis and Modelling of Compaction Behaviour of Ag60Cu30Sn10 Mixed Metal Powders," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 317, no. 1, pp. 1-7: IOP Publishing.
- [33] A. Procopio, A. Zavaliangos, and J. Cunningham, "Analysis of the diametrical compression test and the applicability to plastically deforming materials," *Journal of Materials Science*, vol. 38, no. 17, pp. 3629-3639, 2003.

-
- [34] C.-Y. Wu, O. Ruddy, A. Bentham, B. Hancock, S. Best, and J. Elliott, "Modelling the mechanical behaviour of pharmaceutical powders during compaction," *Powder Technology*, vol. 152, no. 1, pp. 107-117, 2005.
- [35] S. Bustamante and H. Sheinberg, "Determination of hoop stresses induced in a cylindrical steel die by compacting metal powders," *Powder Metallurgy*, vol. 3, no. 6, pp. 36-51, 1960.
- [36] K. L. Priddy and P. E. Keller, "*Artificial Neural Networks: An Introduction*," SPIE Press, 2005, pp. 1-12.
- [37] MathWorks. Matlab R2015 Documentation [Online].
- [38] ALBEMARLE, "MARTOXID® KMS-92," ed: ALBEMARLE, 2011.
- [39] A.-. Martinswerk, "MARTOXID KMS," ed: ALBEMARLE 2009.
- [40] O. G. Abdullah, F. A. Rasin, and T. A. Al-Dhahir, "Finite element simulation of alumina ceramic powder compaction," *International Journal of Pure and Applied Physics*, vol. 5, no. 1, pp. 15-31, 2009.
- [41] A. Baroutaji, S. Lenihan, and K. Bryan, "Combination of finite element method and Drucker - Prager Cap material model for simulation of pharmaceutical tableting process," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 48, no. 11, pp. 1133-1145, 2017.
- [42] S. Garner, J. Strong, and A. Zavaliangos, "The extrapolation of the Drucker–Prager/Cap material parameters to low and high relative densities," *Powder Technology*, vol. 283, pp. 210-226, 2015.
- [43] C. Shang, I. Sinka, and J. Pan, "Constitutive model calibration for powder compaction using instrumented die testing," vol. 52, no. 7, pp. 903-916, 2012.
- [44] L. Argani, D. Misseroni, A. Piccolroaz, Z. Vinco, D. Capuani, and D. Bigoni, "Plastically-driven variation of elastic stiffness in green bodies during powder compaction: Part I. Experiments and elastoplastic coupling," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 36, no. 9, pp. 2159-2167, 2016.
- [45] I. s. Aydin, B. J. Briscoe, and K. Y. Şanlıtürk, "The internal form of compacted ceramic components: a comparison of a finite element modelling with experiment," *Powder Technology*, vol. 89, no. 3, pp. 239-254, 1996.
- [46] G. S. Wagle, R. S. Engel, R. Bollina, R. M. J. A. i. P. M. German, and P. Materials, "Statistical Analysis of Modified Drucker-Prager Cap Model Parameters for Application to Modeling Die Compaction," no. 4, pp. 4-24, 2003.

Abstract

In this work, a modified Drucker-Prager/Cap (DPC) constitutive model was used to describe the densification behavior of alumina KMS-92 powder. The model parameters were obtained through some simple tests. For determining the parameters of shear failure surface, diametral and axial compression tests were used. An instrumented die was employed to obtain the parameters of cap surface, elastic constants and friction coefficient between powder particles and die wall. Finally, the obtained parameters were implemented in Abaqus for finite element (FE) simulation of powder densification. User-defined subroutine USDFLD was used to describe material behavior as a function of relative density. The FE results showed a very good correlation with the experimental ones. In addition, a cost effective method for obtaining the constitutive model parameters for similar powder material from a simple uniaxial compaction test and artificial neural networks (ANN) algorithm was proposed. In this approach, ANN is trained to predict a set of parameters for modified DPC model such that the differences between experimental and FE analysis curve for uniaxial powder compaction was minimized. The input parameters of ANN were parameters describing the load-displacement curves. The results obtained from this approach for load-displacement curves of uniaxial powder compaction show a very good agreement with the experimental counterparts.

Keywords: Powder compaction, Ceramic Powders, Modified Drucker-Prager/Cap model, Instrumented die, FE modeling, Artificial neural networks.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

**Determination of modified Drucker-Prager/Cap model parameters for
KMS-92 powder based on experimental and optimization methods**

M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Written by
Sohrab Salamati-Khiavi

Supervisor
Dr. Seyed Hadi Ghaderi

Advisor
Dr. Seyed Vahid Hosseini

January 2019