

## تحلیل اجزای محدود رفتار برشی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از فک ابداعی

مقاله علمی - پژوهشی

مرتضی مدرس، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

\*حسن دیوانداری (نویسنده مسئول اول)، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*محسن عموزاده عمرانی (نویسنده مسئول دوم)، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

مجتبی اسماعیل نیا امیری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول اول: [ha.divandari@iau.ac.ir](mailto:ha.divandari@iau.ac.ir)

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول دوم: [Mo.Omrani@iau.ac.ir](mailto:Mo.Omrani@iau.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

صفحه ۶۰-۳۹

### چکیده

مقاومت برشی آسفالت یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی در دوام و عملکرد روسازی‌های جاده‌ای است که ضعف در آن منجر به ترک، شیارشدگی و خرابی زودهنگام می‌شود. روش‌های مرسوم مانند آزمایش جعبه برش مستقیم و آزمون مارشال، به دلیل توزیع غیر یکنواخت تنش و عدم توانایی در بازنمایی شرایط واقعی بارگذاری، دارای محدودیت‌های جدی هستند و همین امر خلأ تحقیقاتی قابل توجهی در ارزیابی دقیق مقاومت برشی ایجاد کرده است. نوآوری این مطالعه، طراحی یک فک ابداعی برای دستگاه مارشال است که با اصلاح هندسه و ایجاد شرایط قیچی‌مانند، امکان اعمال نیروی برشی واقعی‌تر را فراهم می‌سازد. هدف تحقیق، بررسی این فک جدید و اعتبارسنجی عملکرد آن با استفاده از تحلیل اجزای محدود غیرخطی در نرم‌افزار SolidWorks بود. روش‌شناسی شامل طراحی سه‌بعدی فک و نمونه آسفالت، تعریف خواص مصالح بر اساس استانداردهای ASTM اعمال بارگذاری نرمال ۳۵,۰۰۰ نیوتن، تعریف تماس سطح-به-سطح با ضریب اصطکاک ۰,۳ و مش‌بندی با کیفیت بالا بود. نتایج نشان داد که فک ابداعی توانست شرایط برشی نزدیک‌تر به واقعیت ایجاد کند؛ متوسط تنش معادل ون‌مایز حدود  $1.0 \times 3.08$  نیوتون بر متر مربع، جابجایی ۱,۸۴۳ میلی‌متر و کرنش معادل ۰,۰۲۲۷ ثبت شد که بیانگر تغییر شکل غیرخطی و آغاز نواحی پلاستیک در آسفالت است. جمع‌بندی کلی نشان می‌دهد که ترکیب طراحی مکانیکی نوآورانه و شبیه‌سازی عددی می‌تواند روشی کارآمد برای ارتقای ارزیابی مقاومت برشی آسفالت باشد و مسیر توسعه دستگاه‌های آزمایشگاهی جدید و استانداردهای دقیق‌تر را هموار سازد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت، مقاومت برشی، فک ابداعی، دستگاه مارشال، تحلیل اجزای محدود

### ۱- مقدمه

فراهم می‌کند و ستون فقرات اقتصاد مدرن به شمار می‌رود (دیوانداری و اکراقنبری، ۱۴۰۳، طهمورسی و همکاران، ۱۴۰۲).

روسازی آسفالتی با ایجاد سطوح مقاوم و یکنواخت، امکان جابه‌جایی سریع و ایمن کالا و انسان را در مقیاس ملی و بین‌المللی

از آنالیز غیرخطی در SolidWorks است تا کارایی فک در ایجاد شرایط برش واقع‌بینانه و قابلیت آن در تولید نتایج آزمایشگاهی قابل اطمینان بررسی گردد.

مطالعات پیشین مرتبط با اندازه‌گیری مقاومت برشی آسفالت، طراحی دستگاه‌های آزمایشگاهی و کاربرد تحلیل اجزای محدود در شبیه‌سازی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در ادامه ارائه شده‌اند. هدف از این بررسی، شناسایی نقاط قوت و ضعف روش‌های موجود، تبیین ضرورت طراحی فک ابداعی و نشان دادن جایگاه پژوهش حاضر در پیوند میان نوآوری مکانیکی و اعتبارسنجی عددی است. در مطالعات مربوط به روش‌های تجربی اندازه‌گیری مقاومت برشی، آزمایش جعبه برش مستقیم به‌عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌ها شناخته شده است؛ این روش در تحقیقات متعددی برای تعیین مقاومت برشی و رفتار چسبندگی مصالح به‌کار رفته است، اما نویسندگان متعددی به محدودیت‌های آن اشاره کرده‌اند. کرونچوا و همکاران نشان دادند که توزیع تنش در آزمایش جعبه برش غیر یکنواخت بوده و مرزهای تکیه‌گاهی و هندسه دستگاه می‌تواند نتایج را به‌شکل قابل‌توجهی متأثر سازد؛ این موضوع باعث می‌شود نتایج آزمایش تحت شرایط میدانی به‌طور مستقیم قابلیت تعمیم نداشته باشند و نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تر و یا طراحی ابزارهایی که توزیع تنش را کنترل‌تر کنند احساس شود (Kruncheva et al., 2001). دی بونت نیز در کار خود به کاستی‌هایی در طراحی آزمایش‌ها برای بررسی ترک‌خوردگی و مقاومت لایه‌های آسفالتی اشاره نموده و ضرورت روش‌هایی که بتوانند بارگذاری ترکیبی (قائم و برشی) را به‌طور همزمان و کنترل‌شده اعمال کنند، برجسته کرده است (De Bondt, 2000).

مطالعاتی که رابطه میان مقاومت فشاری و رفتار برشی را بررسی کرده‌اند نشان می‌دهند که استفاده از آزمون‌های صرفاً فشاری یا فرمول‌های برشی مبتنی بر مقاومت فشاری می‌تواند دقت پیش‌بینی مقاومت برشی مخلوط آسفالت را محدود کند. هوانگ و همکاران در تحلیل خواص برشی مخلوط آسفالت تحت بارگذاری سه محوره نشان دادند که رفتار برشی مخلوط‌ها به‌طور قابل‌توجهی به شرایط مرزی، فشارهای محوری و نرخ بارگذاری وابسته است و بنابراین استفاده از پارامترهای فشاری به‌تنهایی برای پیش‌بینی مقاومت برشی کافی نیست و روش‌های آزمایشی و عددی باید به فرایندهای چند محوری و وابستگی‌های غیرخطی توجه کنند

درواقع، روسازی آسفالتی نقش حیاتی در شبکه حمل‌ونقل دارد و کیفیت آن تعیین‌کننده ایمنی، راحتی و هزینه‌های نگهداری راه‌هاست (Divandari et al., 2025; Tahmouresi et al., 2025). مقاومت برشی آسفالت یکی از شاخص‌های اساسی در مهندسی روسازی است که تعیین‌کننده توانایی مخلوط آسفالتی در برابر نیروهای افقی ناشی از بارگذاری ترافیکی محسوب می‌شود (Fakhri & Mahmoodinia, 2012; Raab & Arraigada, 2025). ضعف در این خاصیت منجر به بروز شیارشدگی، تغییرشکل‌های پلاستیک، ترک‌های ناشی از برش و در نهایت کاهش طول عمر سازه راه می‌شود (Shi et al., 2021; Yu et al., 2025). با وجود اهمیت این پارامتر، روش‌های آزمایشگاهی مرسوم دارای محدودیت‌هایی هستند که می‌تواند منجر به خطا در برآورد واقعی مقاومت برشی شود. دستگاه‌های مانند جعبه برش مستقیم (Hosseini, 2017; Nezhad, 2025)، اگرچه گستردگی کاربرد دارند، در بسیاری از شرایط توزیع تنش را یکنواخت ایجاد نمی‌کنند و اعمال ترکیبی نیروی قائم و برشی را به‌صورت کنترل‌شده و واقع‌گرایانه دشوار می‌سازند. از سوی دیگر، روش‌های طراحی شده برای آزمایش مارشال که در بسیاری از استانداردهای ملی مورد استفاده قرار می‌گیرند، عمدتاً بر معیارهای مقاومت فشاری و روانی مبتنی‌اند و ارتباط مستقیم آن‌ها با الگوهای نیرویی و کرنشی که در میدان واقعی ترافیک رخ می‌دهد، محدود است (Huang et al., 2019; Said et al., 2013). به‌دلیل این شکاف‌ها، نیاز به توسعه ابزار و روش‌های جدید که بتوانند شرایط برش واقعی‌تر و داده‌های معنادارتری برای تحلیل عملکرد مخلوط آسفالت فراهم کنند، به‌شدت احساس می‌شود. در این راستا، طراحی فک‌های آزمایشگاهی که قابلیت اعمال برش کنترل‌شده و توزیع تنش نزدیک به رفتار میدانی را داشته باشند، می‌تواند نقش محوری در ارتقای روش‌های اندازه‌گیری مقاومت برشی ایفا کند. با پیشرفت ظرفیت‌های شبیه‌سازی عددی و دسترسی به نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود، امکان ترکیب طراحی مکانیکی با اعتبارسنجی عددی فراهم شده است؛ بدین‌وسیله نه‌تنها می‌توان عملکرد اولیه یک ابزار را پیش‌بینی کرد، بلکه نقاط ضعف و حساسیت‌های طراحی را نیز پیش از ساخت فیزیکی مشخص نمود. هدف این مطالعه ارائه یک فک ابداعی متناسب با دستگاه مارشال و ارزیابی عددی آن با استفاده

برقرار کنند، (۲) تعیین و اندازه‌گیری پارامترهای ماده و تماس (از جمله ضریب اصطکاک) به صورت تجربی برای ورود به مدل‌های عددی، و (۳) استفاده از تحلیل‌های غیرخطی و چند محوری در نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود برای اعتبارسنجی و بهینه‌سازی طراحی‌های جدید. خلأ موجود در پیوند میان طراحی فیزیکی فک‌های نمونه‌گیر و اعتبارسنجی عددی جامع، انگیزه اصلی این مطالعه برای ارائه یک فک ابداعی و تحلیل FEA غیرخطی آن بوده است.

## ۲- روش‌شناسی

### ۲-۱- طراحی فک ابداعی

طراحی فک از یک بازنگری هندسی بر فک مرسوم مارشال آغاز شد. تغییرات اصلی شامل تراش ۲ میلی‌متری در هر طرف فک معمولی و ایجاد دو شیار موازی در کناره‌های فک بود تا رفتار قیچی‌مانند در تماس با نمونه تولید گردد. در این طرح یک نیم‌فک ثابت و یک نیم‌فک متحرک تعبیه شد؛ نیم‌فک‌ها به صورت هم‌محور و با پیچ‌های تنظیم در بخش بالایی یک استوانه توخالی قرار می‌گیرند که از یک‌سو نمونه استوانه‌ای آسفالت را نگه می‌دارد و از سوی دیگر فضای آزاد برش برای جدا کردن جزئی نمونه مهیا است. ارتفاع فک افزایش یافته تا قابلیت اعمال نیروی کافی برای برش نمونه تحت عمل فشاری مارشال فراهم گردد. هدف طراحی، تمرکز نیروی برشی در ناحیه مشخص شده با حداقل خردایش تصادفی دانه‌ها و فراهم آوردن شرایطی بود که بار برشی عمدتاً در جهت تماسی محوری نمونه اعمال شود.

در طراحی جزئیات مکانیکی مانند محل پیچ‌های تثبیت نمونه، سوراخ‌های تنظیم محور حرکت نیم‌فک متحرک و محل قرارگیری المکانیسم انتقال نیرو در نظر گرفته شد. پروفیل شیارها و زاویه کنارگیری به گونه‌ای انتخاب شد که ضمن هدایت نیروی برشی، از گیرپاژ نمونه جلوگیری شود و ناحیه تماس قابل تکرار بین آزمایش‌ها باشد. پس از مرحله ایده‌پردازی، نمونه اولیه دیجیتال در محیط CAD مدل شد تا برای آنالیز المان محدود آماده‌سازی گردد. در شکل ۱ فک ابداعی طراحی شده نشان داده شده است.

(Huang et al., 2019). پژوهش‌های دیگر نیز بر اهمیت اندازه‌گیری دقیق ضریب اصطکاک، هندسه تماس و شرایط مرزی برای شبیه‌سازی صحیح پاسخ برشی تأکید کرده‌اند.

تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که ترکیب شبیه‌سازی المان محدود با آزمایش‌های تجربی، راهکار مؤثری برای تحلیل رفتار پیچیده مخلوط‌های آسفالتی است. کازرانی و همکاران با استفاده از مدل‌های گسسته و پیوند آن‌ها با داده‌های تنش-کرنش تجربی، نشان دادند که مدل‌های عددی می‌توانند روند تغییر خصوصیات برشی و تخریب مصالح سنگی را پیش‌بینی کنند مشروط بر آنکه پارامترهای ماده از روش‌های تجربی معتبر استخراج شده باشند (Kazerani et al., 2012). جی و همکاران نیز در کاربرد تحلیل خواص برشی مخلوط آسفالت برای ارزیابی شیارشدگی با بهره‌گیری از نتایج بارگذاری شتاب‌یافته، تأکید کردند که پارامترهای برشی استخراج‌شده باید در مدل‌های تحلیلی و عددی جهت پیش‌بینی عملکرد لایه‌ها تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای به کار روند تا پیوند میان آزمایشگاه و میدان برقرار گردد (Ji et al., 2013).

در زمینه مدل‌سازی ماده آسفالت، مطالعات نشان می‌دهد که مدل‌سازی دقیق رفتار غیرخطی، وابسته به نرخ و دما، برای پیش‌بینی مناسب پاسخ برشی ضروری است. برخی پژوهش‌ها از مدل‌های الاستیک غیرخطی برای بازنمایی رفتار موضعی در محدوده قبل از شکست استفاده نموده‌اند و برخی دیگر مدل‌های ویسکوپلاستیک یا الاستوویسکوپلاستیک را برای پوشش رفتار وابسته به زمان و نرخ ترجیح داده‌اند. این مطالعات نشان دادند که روش‌های مرسوم مارشال و معیارهای ساده شکست قادر به مشخص کردن انتقال‌های پیچیده کرنش و شروع نواحی شکست نیستند و مدل‌های پیشرفته‌تر عددی که خصوصیات وابسته به نرخ و تاریخچه بار را در نظر بگیرند، دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهند (Dong, Hao, et al., 2020; Li et al., 2021; Wang & Wang, 2024). با توجه به مطالعات پیشین، خلأ تحقیقاتی ناشی از فقدان دستگاهی که بتواند مقاومت برشی آسفالت را با دقت بالا و شرایط نزدیک به واقعیت اندازه‌گیری کند، احساس می‌شود.

در مجموع مرور ادبیات نشان می‌دهد که سه حوزه اصلی نیازمند همگرایی هستند: (۱) طراحی مکانیکی ابزارهای آزمایشگاهی که بتوانند شرایط تماس و توزیع تنش را نزدیک به واقعیات میدان

## ۲-۲- مدل عددی در شبیه‌سازی SolidWorks

برای بررسی عملکرد فک ابداعی، یک مدل سه‌بعدی شامل سه بخش اصلی ساخته شد: (۱) نمونه استوانه‌ای آسفالت، (۲) پیستون / صفحه فشاری متحرک که بار را اعمال می‌کند، و (۳) اجزای فولادی فک شامل نیم‌فک‌های ثابت و متحرک. مدل‌های جامد برای هر قطعه ساخته شده و خواص حجمی (جرم، حجم، چگالی) محاسبه شد تا یکنواختی بین مدل CAD و آنالیز المان محدود برقرار شود. فرضیات اصلی مدل‌سازی شامل موارد زیر است:

-آسفالت به صورت ماده غیرخطی با منحنی تنش-کرنش اختصاصی مدل‌سازی شده و رفتار پلاستیک موضعی مجاز است.

-اجزای فک از فولاد با مدل ماده پلاستیک-ون‌مایز با سخت شدن جزئی در نظر گرفته شدند.

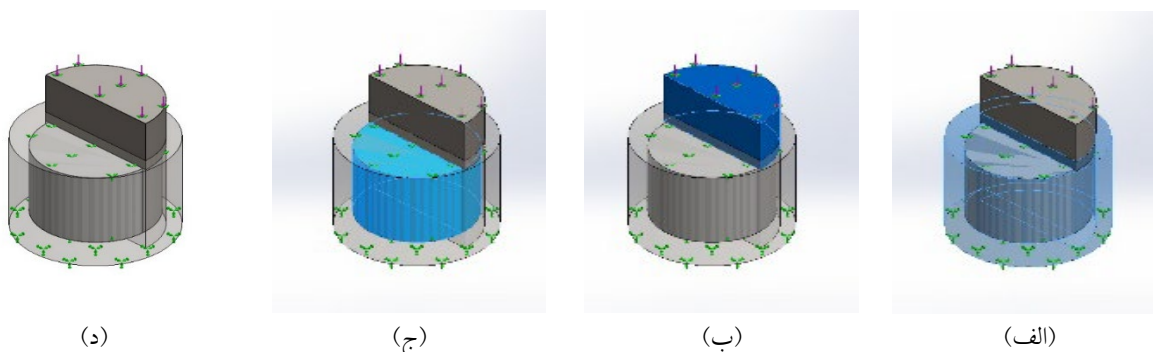
-تماس بین سطح فک و نمونه سطحی به صورت سطح-به-سطح تعریف شده و ضریب اصطکاک بین سطوح برابر ۰٫۳ انتخاب گردید.

-تحلیل به صورت شبه‌استاتیکی

-و در بازه زمانی معادل یک گام بارگذاری شبیه‌سازی شد تا تغییر مکان‌های بزرگ و اثرات غیرخطی هندسی لحاظ گردد.



شکل ۱. فک برش طراحی شده و نحوه قرارگیری نمونه آسفالت در فک ابداعی



شکل ۲. بدنه‌های جامد قطعات در شبیه‌سازی SolidWorks برای: (الف) سیلندر، (ب) پیستون برشی، (ج) نمونه آسفالت، (د) کل مجموعه

### ۳- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از طراحی فک ابداعی و تحلیل اجزای محدود غیرخطی در نرم افزار SolidWorks ارائه می شود. تمرکز اصلی بر بررسی اطلاعات مدل، مشخصات هندسی و حجمی، خواص مصالح و منحنی های تنش- کرنش، شرایط بارگذاری و تکیه گاه ها، ویژگی های تماس و اصطکاک، کیفیت مش بندی، نیروهای واکنشی و در نهایت نتایج کلی مدل است. این ساختار به گونه ای تنظیم شده که ابتدا داده های پایه و فرضیات مدل معرفی شوند و سپس به تحلیل های عددی و نتایج مکانیکی پرداخته شود.

### ۳-۱- اطلاعات مدل

در مدل سه بعدی آنالیز (شکل ۲)، هر جزء به صورت جسم صلب / جامد تعریف شده و خواص حجمی شامل جرم، حجم، چگالی و وزن برای هر قطعه محاسبه شده است. این پارامترها مبنای محاسبات اینرسی، تعادل قوای حجمی و بارهای ناشی از وزن خود قطعات در تحلیل را تشکیل می دهند. همچنین مقادیر استخراج شده از اطلاعات مدل در شبیه سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات حجمی مولفه های مدل

مولفه	جرم (کیلوگرم)	حجم (متر مکعب)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	وزن (نیوتون)
سیلندر	۴,۴۵۱۲۸	۰,۰۰۰۵۶۶۴۶۶	۷۸۵۸	۴۳,۶۲۲۵
پیستون برشی	۱,۷۳۱۱۵	۰,۰۰۰۲۲۰۳۰۴	۷۸۵۸	۱۶,۹۶۵۳
نمونه آسفالت	۱,۲۰۹۵۱	۰,۰۰۰۵۴۹۷۷۹	۲۲۰۰	۱۱,۸۵۳۲

نتایج نشان می دهد که چگالی های اختصاص یافته منطبق با مصالح واقعی اند: فولاد  $\approx 7858$  کیلوگرم بر متر مکعب و آسفالت / مخلوط  $\approx 2200$  کیلوگرم بر متر مکعب. این تمایز در چگالی، تأثیر مستقیم بر خواص جرم شناختی، واکنش های اینرسی و نحوه انتقال بار میان فک و نمونه دارد. همچنین، مقادیر وزن نسبتاً کوچک هستند؛ بنابراین اثر وزن خود جسم روی نتایج بارگذاری  $35,000$  نیوتون که به عنوان بار اعمالی اصلی انتخاب شده، ناچیز است؛ اما محاسبه آن ها برای تعادل کلی و محاسبات تماس ضروری است.

-محاسبه خودکار نیروهای برآیند بدنه غیرفعال تنظیم شده است (نتایج جداگانه محاسبه شده اند).

-ضریب مقیاس سختی خطای تماس؛ عدد ۱ نشان دهنده استفاده از مقادیر پیش فرض برای رفتار تماسی است.

-فعال بودن فرموله تغییر مکان های بزرگ برای ثبت تغییر شکل های هندسی معنادار.

-کرنش های بزرگ غیرفعال؛ مدل فرض می کند تغییر مکان بزرگ مهم تر از کرنش های بزرگ است یا کرنش ها در محدوده ای قرار دارند که نیازی به فرمولاسیون ویژه نیست.

-جهت بار اعمالی با تغییر شکل مدل به روزرسانی نمی شود؛ بار ثابت جهت دار اعمال شده است.

-اثرات حرارتی فعال است و دمای مرجع  $298$  کلوین در نظر گرفته شده؛ این گزینه می تواند برای مدل سازی حساسیت ماده به دما یا انقباض حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

-استفاده از حل گر مستقیم برای مسائل بزرگ؛ مناسب برای مسائل غیرخطی با تعداد درجات آزادی بالا.

-تنظیمات اتصالات ناسازگار برای کاهش پیچیدگی محاسبات تماس یا اجزای مرتبط.

-حل کننده بر مبنای کنترل نیرو با روش نیوتن-رافسون برای همگرایی در مسائل غیرخطی.

### ۳-۲- مشخصات مدل

در این شبیه سازی از یک مطالعه غیرخطی استاتیکی استفاده شده است (جدول ۲). پارامترهای کلیدی و تفسیر آن ها عبارت اند از: نوع تحلیل غیرخطی استاتیکی برای ثبت اثرات هندسی بزرگ و رفتار ماده غیرخطی.

-مش کوب (حجمی) مناسب برای قطعات جامد و برای ثبت توزیع تنش-کرنش سه بعدی.

-بازه زمانی ۱ ثانیه برای گام بارگذاری شبه استاتیکی (یک گام بارگذاری به صورت زمانی مدل شده است).

-گام زمانی خودکار برای حفظ همگرایی در معادلات غیرخطی.

به صورت پیوسته وارد و پاسخ غیرخطی محاسبه شود. در نهایت وجود گزینه‌های حرارتی تا حدی نشان می‌دهد که تأثیرات دما (یا شرایط کارخانه‌ای) امکان‌پذیر دیده شده، هرچند در گزارش فعلی بار حرارتی مشخصی تعریف نشده است.

در بررسی پارامترها، فعال بودن فرموله تغییرمکان بزرگ و روش حل نیوتن-رافسون نشان می‌دهد شبیه‌سازی برای ثبت غیرخطی‌های هندسی و ماده تنظیم شده است؛ این ضروری است وقتی جابه‌جایی‌ها و تماس‌ها قابل توجه باشند. همچنین ترکیب کنترل نیرو و زمان‌بندی خودکار موجب می‌شود بار ۳۵،۰۰۰ نیوتون

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود

پارامتر	مقدار
نوع تحلیل	غیرخطی - استاتیک
نوع مش	مش جامد
فرمولاسیون کرنش بزرگ	خاموش
به‌روزرسانی جهت بار با تغییر شکل	خاموش
فرمولاسیون جابه‌جایی بزرگ	روشن
ضریب مقیاس سختی جریمه تماس	۱
محاسبه نیروهای جسم آزاد	خاموش
گام زمانی	گام‌بندی خودکار
زمان شروع	۰ ثانیه
زمان پایان	۱ ثانیه
روش انتگرال‌گیری	نیومارک
تکنیک تکراری	NR (نیوتن-رافسون)
تکنیک کنترل	نیرو
گزینه‌های پیوند ناسازگار	ساده‌شده
نوع حل‌کننده	مستقیم پراکنده مسئله بزرگ
دمای کرنش صفر	۲۹۸ کلوین
گزینه حرارتی	شامل بارهای دمایی
اثر حرارتی	روشن

### ۳-۳- خواص و منحنی تنش-کرنش

در مدل دو گروه ماده تعریف شده‌اند: فولاد (اجزای فک و پیستون) و آسفالت (نمونه) که نتایج بررسی خواص آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. مشخصات مدل فولاد به صورت زیر است:

-مدل پلاستیسیته با معیار ون‌مایز برای تسلیم و جریان پلاستیک. -مقاومت تسلیم برابر ۲۸۲,۷ مگاپاسکال که نشان دهنده مقدار تسلیم مناسب برای فولاد ساختاری است. همچنین مدول الاستیک برابر ۲۰۵ گیگا پاسکال، ضریب پواسون برابر ۰,۲۹ و چگالی برابر ۷۸۵۸ کیلوگرم بر متر مکعب است.

-ضریب سخت شوندگی برابر ۰,۸۵ است که نشان‌دهنده ترکیبی از سخت‌شدن ایزوتروپ / کینماتیک (مقدار بین ۰ و ۱) می‌باشد. همچنین مشخصات مدل آسفالت به کار رفته به صورت زیر است:

-نوع مدل به کار رفته، مدل الاستیک غیر خطی با منحنی تنش-کرنش اختصاصی است؛ ضریب پواسون برابر ۰,۳۵ و چگالی برابر ۲۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

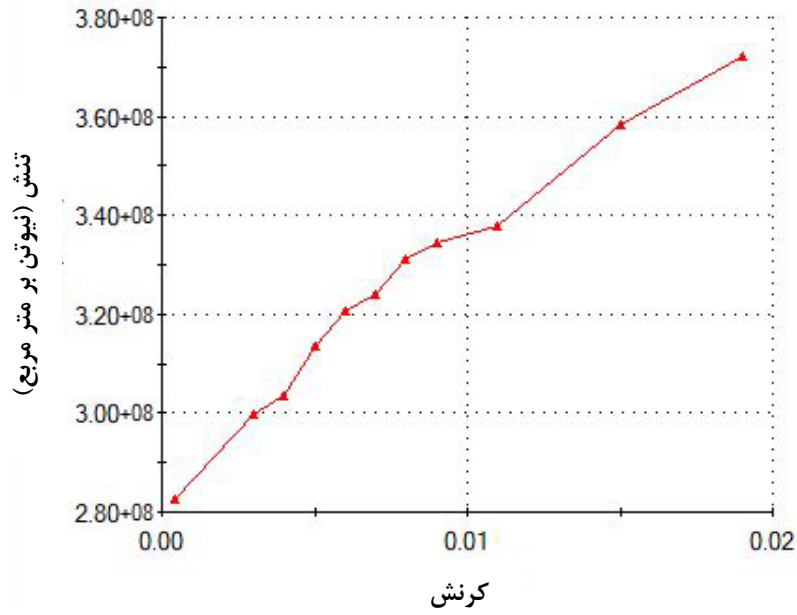
-منحنی تنش-کرنش غیرخطی وارد مدل شده است تا رفتار الاستیک غیرخطی و محدوده‌های پیش-خستگی/پلاستیک موضعی را شبیه‌سازی کند.

جدول ۳. خصوصیات مواد به کار رفته در تحلیل اجزای محدود

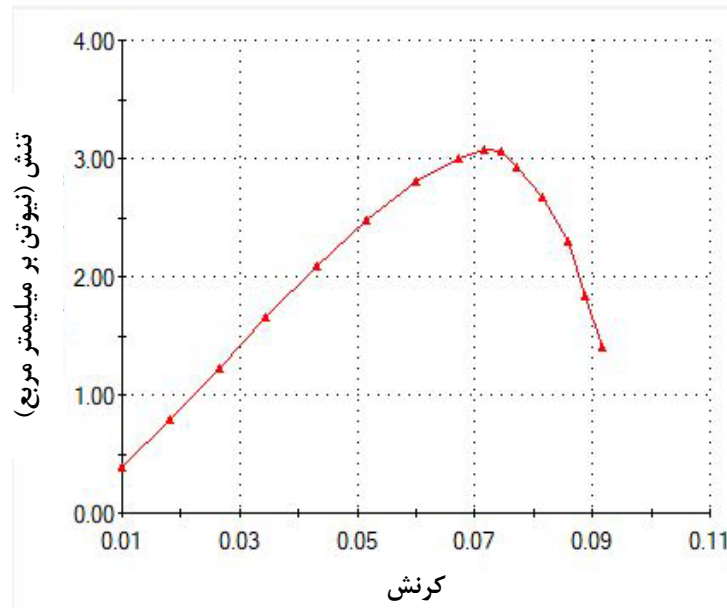
نمونه آسفالتی	فولاد	خصوصیات
الاستیک غیر خطی	پلاستیسیته - ون‌مایز	نوع مدل
-	$2,82685e+08 \text{ N/m}^2$	مقاومت تسلیم
-	$2,05e+11 \text{ N/m}^2$	مدول الاستیک
۰,۳۵	۰,۲۹	ضریب پواسون
$2,200 \text{ kg/m}^3$	$7858 \text{ kg/m}^3$	چگالی
$2,7e-05 / \text{Kelvin}$	$1,2e-05 / \text{Kelvin}$	انبساط حرارتی

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل پلاستیسیته ون‌مایز برای فولاد متداول و مناسب است؛ مقدار تسلیم و مدول الاستیک به طور منطقی با اجزا سخت فک مطابقت دارد. همچنین مدل غیرخطی الاستیک برای آسفالت مناسب است اگر منحنی دقیق تنش-کرنش مطابق داده‌های تجربی در بازه بارگذاری مورد نظر وارد شده باشد؛ در عمل بهتر است برای آسفالت مدل‌های ویسکوالاستیک / ویسکوساختار نیز مورد بررسی قرار گیرد زیرا پاسخ آسفالت به نرخ بار و دما حساس است. منحنی تنش-کرنش برای فولاد و نمونه آسفالتی در شکل ۳ ارائه شده است. نمودار تنش-کرنش فولاد نشان‌دهنده رفتاری تقریباً خطی و صعودی است که بیانگر خاصیت الاستیک-پلاستیک این ماده با مدول یانگ بالا و مقاومت تسلیم مشخص می‌باشد؛ در این نمودار، با افزایش کرنش، تنش نیز به طور یکنواخت افزایش یافته و هیچ افت یا ناپایداری قابل توجهی مشاهده نمی‌شود، که نشان‌دهنده توانایی فولاد در تحمل تغییرشکل‌های

بزرگ بدون شکست ناگهانی است. در مقابل، نمودار تنش-کرنش نمونه آسفالت رفتاری غیرخطی و وابسته به شرایط بارگذاری نشان می‌دهد؛ منحنی ابتدا با شیب مثبت افزایش یافته و تا رسیدن به تنش بیشینه (حدود ۳ مگاپاسکال) ادامه دارد، سپس با افزایش کرنش، تنش کاهش یافته و افت مقاومت رخ می‌دهد که معرف شروع شکست یا نرم‌شدگی ماده است. این رفتار بیانگر ماهیت ویسکوالاستیک و شکننده آسفالت است که پس از رسیدن به مقاومت نهایی، توان تحمل بار اضافی را از دست داده و دچار گسیختگی یا تغییرشکل دائمی می‌شود. مقایسه این دو نمودار نشان می‌دهد فولاد به‌عنوان ماده‌ای با رفتار پایدار و مقاوم در برابر بارگذاری‌های مداوم، برای اجزای سازه‌ای مناسب است، در حالی که آسفالت با رفتار غیرخطی و افت مقاومت پس از نقطه اوج، نیازمند طراحی دقیق و کنترل شرایط بارگذاری و دما برای جلوگیری از خرابی زودهنگام در روسازی‌های جاده‌ای است.



(الف)



(ب)

شکل ۳. منحنی تنش-کرنش در شبیه‌سازی SolidWorks برای: (الف) فولاد، (ب) نمونه آسفالتی

### ۳-۴- بارها و تکیه‌گاه‌ها

بررسی پارامترها و نتایج مرتبط با بارگذاری و قیدها نشان می‌دهد که:

**قیدها / تثبیت‌ها:** چند نقطه / سطح به‌عنوان قید مشخص شده‌اند که حرکت آن‌ها را محدود می‌کند. قیدها باعث انتقال بار عکس‌العمل به مرزها و حفظ پایداری مدل می‌شوند. جزئیات ثبت‌شده:

**بار:** میزان اعمال نیروی نرمال برابر ۳۵۰۰۰ نیوتون با تغییرات زمانی مشخص شده است. بدین معنا که نیروی ۳۵ کیلو نیوتن به‌صورت تابع زمان (در طول بازه ۰-۱ ثانیه) وارد شده است. همچنین تابع زمانی مشخص می‌کند بار چگونه در طول گام بارگذاری افزایش یا

ثابت می‌شود؛ با گام‌بندی خودکار حل گر، گام‌های زمانی تنظیم

می‌شوند تا هر تغییر غیرخطی به‌درستی ثبت گردد.

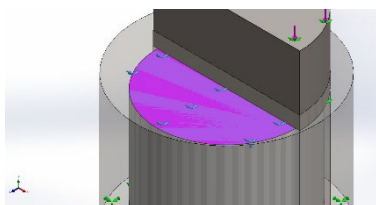
نتایج حاصل از قیدها و بارها: مقادیر نیروی عکس‌العمل گزارش شده برای چند مرجع (شکل ۴) عبارت‌اند از (مولفه‌ها نشان‌دهنده توزیع برداری واکنش هستند):

-مرجع ۱:  $[-۳۵۶,۰۱۴, ۲۵۶۷,۹۱, ۴,۱۰۳۸۸]$  نیوتون؛  
مجموع  $\approx ۲۵۹۲,۴۸$  نیوتون

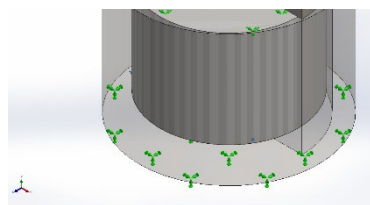
-مرجع ۲:  $[۶۱,۶۷۹۱, -۶۴,۷۳۶۲, -۰,۴۲۵۷۳۵]$  نیوتون؛  
مجموع  $\approx ۸۹,۴۱۶۲$  نیوتون

-مرجع ۳:  $[-۳۷۸,۸۱۳, ۰, -۰,۵۴۶۷۰۲]$  نیوتون؛  
مجموع  $\approx ۳۷۸,۸۱۳$  نیوتون

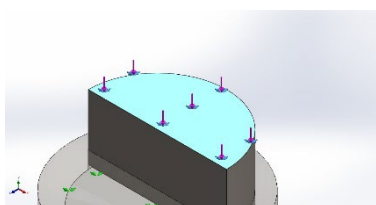
-مرجع ۴:  $[۰,۸۰۲,۵۰۹, -۰,۱۲۰۳۶۶]$  نیوتون؛  
مجموع  $\approx ۸۰۲,۵۰۹$  نیوتون



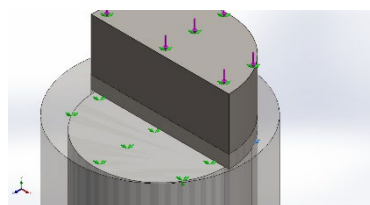
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

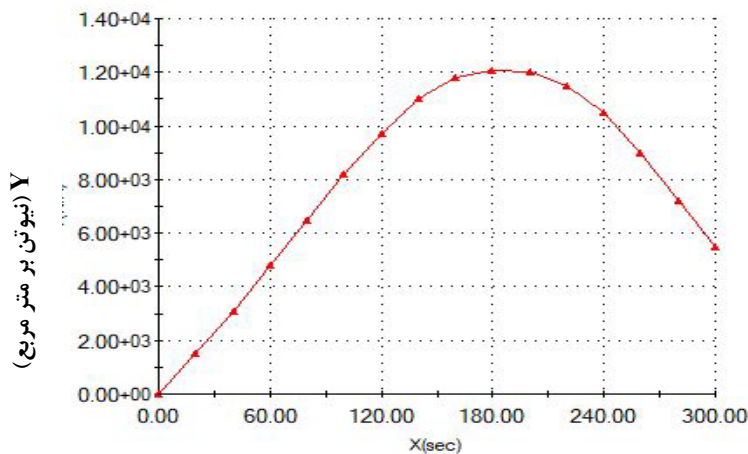
شکل ۴. هندسه مراجع در شبیه‌سازی SolidWorks برای: (الف) مرجع ۱، (ب) مرجع ۲، (ج) مرجع ۳، (د) مرجع ۴

شکل ۵ دیده می‌شود، این نمودار نشان‌دهنده تغییرات نیروی وارد بر نمونه در طول زمان بارگذاری است و در واقع رفتار بار-زمان سیستم را نمایش می‌دهد. محور افقی زمان (ثانیه) و محور عمودی مقدار نیروی اعمالی را نشان می‌دهد. منحنی قرمز ابتدا از نقطه صفر آغاز شده، با افزایش زمان به‌صورت پیوسته رشد کرده و در حدود

نتایج نشان می‌دهد که بار اعمالی ۳۵ کیلو نیوتن به‌صورت محلی و از مسیر پیستون به فک و سپس به نمونه منتقل می‌شود؛ مقادیر نیروهای عکس‌العمل در چند مرجع مختلف نشان می‌دهد که بخشی از بار به اجزای نگهدارنده منتقل شده و توزیع نیروی عکس‌العمل بین نقاط تکیه‌گاهی متغیر است. همان طور که در

نشان‌دهنده کاهش بار یا آزادسازی نیرو پس از عبور از نقطه اوج است. بنابراین نمودار علاوه بر نمایش عملکرد بارگذاری، اطلاعاتی درباره ظرفیت تحمل نمونه، واکنش تکیه‌گاه‌ها و نحوه انتقال نیرو در طول آزمایش ارائه می‌دهد و می‌تواند برای تحلیل رفتار غیرخطی و تعیین نقطه شکست یا نرم‌شدگی مصالح مورد استفاده قرار گیرد.

۱۸۰ ثانیه به بیشینه مقدار خود می‌رسد، سپس روند نزولی پیدا می‌کند. این الگو بیانگر آن است که بارگذاری به صورت تابعی از زمان اعمال شده و نمونه تحت یک سیکل بارگذاری-تخلیه قرار گرفته است. رسیدن به قله منحنی نشان‌دهنده بیشینه نیرویی است که سیستم یا فک ابداعی توانسته به نمونه منتقل کند، و بخش نزولی



شکل ۵. تابع عملکرد د.د. شسه‌سازی SolidWorks  
X (ثانیه)

برهمکنش ۲: نیروی تماسی حاصل برابر [۰,۰۰۸۸۲۰۴, -۰,۰۰۸۸۲۰۴] تا [۰,۰۰۸۸۹۶۵, -۰,۰۰۸۸۹۶۵] نیوتون؛ اندازه  $\approx 676,33$  نیوتون؛ برآیند نیروی اصطکاک برابر  $41,309$  نیوتون. برهمکنش‌های ۳ تا ۵: مقادیر تماس و اصطکاک جزئی‌تر (مثبت و منفی) ثبت شده‌اند؛ برخی تماس‌ها مقادیر تا  $\sim 102$  یا  $5,66$  نیوتون را نشان می‌دهند.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بیشترین نیروی تماس در برهمکنش ۲ است ( $\approx 676,33$  نیوتون) که نشان می‌دهد یکی از سطوح تماس بار زیادی را منتقل می‌کند؛ این ناحیه به احتمال زیاد محل تمرکز تماس فک و نمونه است. همچنین نیروی اصطکاک مربوطه تا  $\approx 41,3$  نیوتون ثبت شده که با ضریب اصطکاک  $0,3$  و نیروی نرمال متناظر، سازگار به نظر می‌رسد. به علاوه، برخی مقادیر بسیار کوچک یا منفی در مولفه‌های تماس نشان‌دهنده جهت برداری نیروها و پیچیدگی هندسه تماس است. در نهایت مقادیر تماس موضعی و تنش‌های ناشی از آن‌ها اطلاعات کلیدی برای پیش‌بینی خردایش موضعی و طراحی هندسه فک برای کاهش نقاط پیک تنش هستند.

### ۳-۵- اطلاعات تماسی و اصطکاک

پارامترهای کلی تماس و داده‌های نیروی تماس / اصطکاک گزارش شده به صورت زیر است:

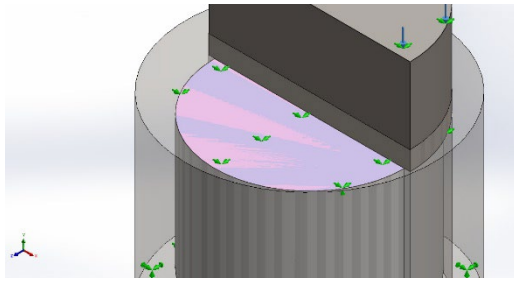
نوع برهمکنش: هر یک جفت سطوحی را نشان می‌دهد که در تماس سطح-به-سطح قرار دارند.

ضریب اصطکاک تعریف شده در همه موارد:  $0,3$ ؛ مقدار انتخابی معقول برای تماس فولاد-آسفالت در شرایط خشک / کارگاهی.

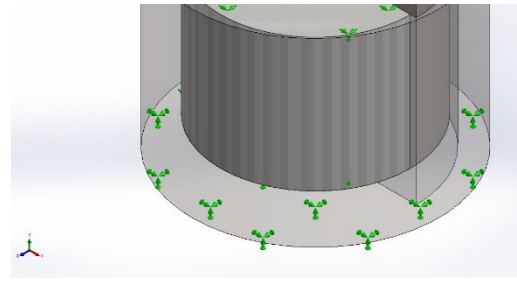
نوع تماس: سطح به سطح؛ مناسب برای شبیه‌سازی انتقال فشار موضعی و نیروی برشی بین فک‌ها و نمونه.

مقادیر گزارش شده برای برهمکنش‌های مختلف (شکل ۶) نشان می‌دهد که:

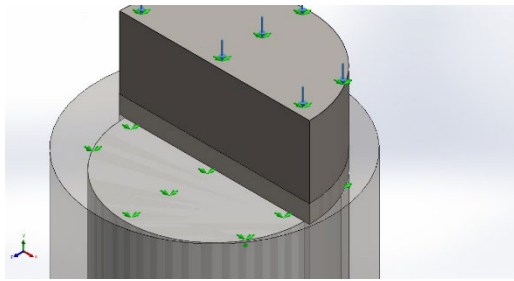
برهمکنش ۱: نیروی تماسی حاصل برابر [۰,۰۰۲۷۲۰۲, -۱,۴۷۹۵] نیوتون؛ اندازه  $\approx 6,3091$  نیوتون؛ برآیند نیروی اصطکاک برابر  $1,3768$  نیوتون.



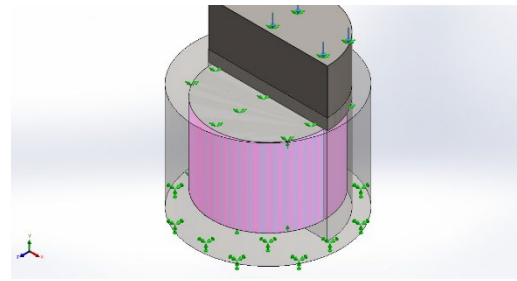
(ب)



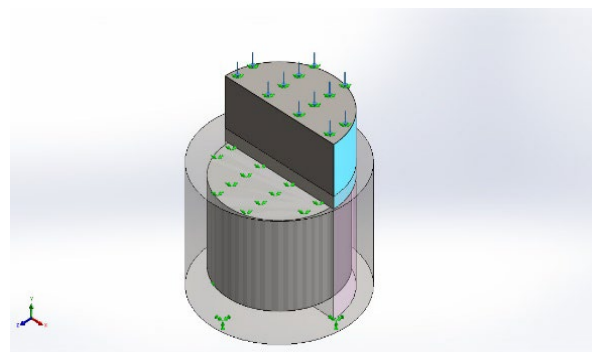
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۶. برهمکنش‌ها در شبیه‌سازی SolidWorks برای: (الف) برهمکنش ۱، (ب) برهمکنش ۲، (ج) برهمکنش ۳،

(د) برهمکنش ۴، (ه) برهمکنش ۵

(۱۴۹۲۳) و المان‌ها (۸۹۰۱) متناسب با مدل سه‌بعدی حجمی و سطح تماس چندگانه است. حداکثر نسبت وجه (ابعادی) کمتر از ۵ نشان‌دهنده المان‌های با کیفیت هندسی قابل قبول است. همچنین درصد المان‌هایی با نسبت وجه کمتر از ۳ و بیشتر از ۱۰ به ترتیب نشان دهنده بسیار خوب بودن نسبت ابعادی اکثریت المان‌ها و عدم وجود المان‌های بسیار کشیده است که باعث خطاهای عددی می‌شود. درنهایت نقاط جاکوبین یعنی معیارهای عددی برای اعتبارسنجی شکل المان‌ها؛ مقدار بالاتر معمولاً کیفیت سلول بهتر را نشان می‌دهد.

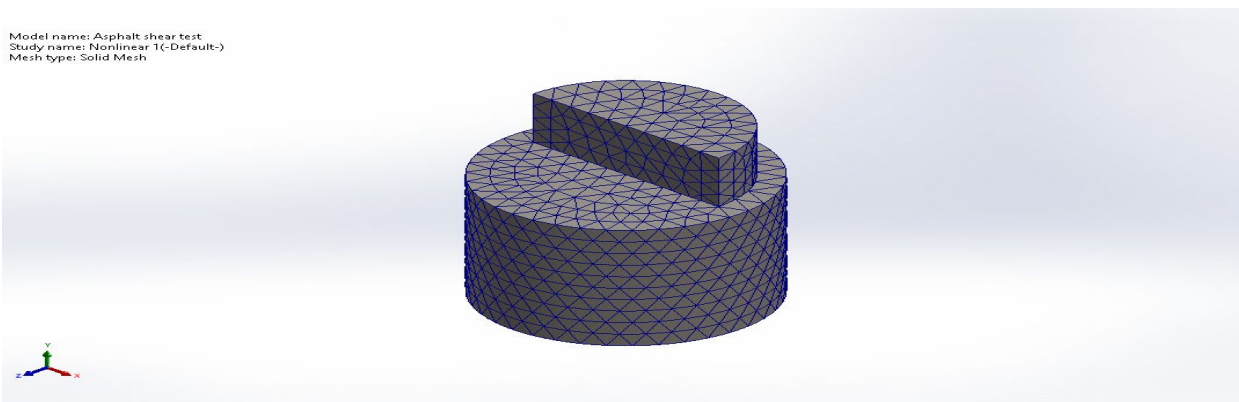
### ۳-۶-اطلاعات مش‌بندی

پارامترهای مش و کیفیت عددی اهمیت مستقیم بر دقت نتایج و پایداری همگرایی دارند. پارامترهای گزارش شده در جدول ۴ ارائه شده است. در این شبیه‌سازی، مش حجمی برای اجسام جامد استفاده شده است (شکل ۷). همچنین مش مبتنی بر انحنا ترکیبی، الگوریتمی است که با توجه به انحنا هندسه و ابعاد هدف، المان‌ها را تولید می‌کند. در این شبیه‌سازی اندازه المان‌ها یکنواخت تعیین شده است؛ استفاده از المان‌های هم‌اندازه ساده‌سازی می‌کند اما می‌تواند جزئیات محلی را کمتر نمایان کند. در این مدل، عدد گره‌ها

جدول ۴. پارامترهای مربوط به اطلاعات مش‌بندی در تحلیل اجزای محدود

پارامتر	مقدار
نوع مش	مش جامد
مش‌کننده استفاده‌شده	مش مبتنی بر انحنای ترکیبی
زمان تکمیل مش (ساعت؛ دقیقه؛ ثانیه)	۰۰:۰۰:۰۴
درصد المان‌های اعوجاج‌یافته	۰
درصد المان‌هایی با نسبت وجه $< 10$	۰
درصد المان‌هایی با نسبت وجه $> 3$	۹۹,۴
المان‌های اعوجاج‌یافته	۰ درصد
حداکثر نسبت وجه	۴,۶۸۲
تعداد کل المان‌ها	۹۲۷
تعداد کل گره‌ها	۱۴۹۲۳
کیفیت مش	زیاد
اندازه المان	۱۱,۰۱۷۷ میلی‌متر
نقاط جاکوبین برای مش با کیفیت بالا	۱۶ نقطه

Model name: Asphalt shear test  
Study name: Nonlinear 1(-Default-)  
Mesh type: Solid Mesh



شکل ۷. توزیع مش نمونه آسفالت و فک فولادی

### ۷-۳- نیروهای حاصل

خلاصه‌ای از نتایج نیروهای جمعی گزارش‌شده در جدول ۵ در ادامه تفسیر شده است. نتایج نیروهای واکنشی نشان می‌دهد که برای کل مدل مجموع بردار نیروها برابر ۲,۶۲۵ کیلو نیوتون در جهت ۷ گزارش شده است. این مقدار نشان‌دهنده تعادل نیروها در تحلیل و مسیر انتقال بار به تکیه‌گاه‌ها است. درمورد گشتاورهای واکنشی، مجموع گشتاورها برای کل مدل  $\approx 0$  نیوتون. متر است

که نشان‌دهنده این است که مدل از نظر چرخش بیرونی متوازن است و گشتاورهای ناخواسته به‌خوبی کنترل شده‌اند. درنهایت بررسی نیروها / گشتاورهای آزاد جسم نشان داده است که مقادیر جمعی برای بدنه آزاد همگی تقریباً صفر گزارش شده‌اند، که نشان‌دهنده تعادل استاتیکی در محدوده کل مدل است. عدم وجود گشتاورهای بزرگ و صفر بودن گشتاور کل نشان می‌دهد هندسه و تنظیمات مرجع به‌خوبی هم‌راستا شده‌اند.

جدول ۵. نیروهای حاصل در تحلیل اجزای محدود

نیروی حاصل	Z	Y	X	پارامتر
۲۶۲۵	۰,۰۰۰۵۵۴۵۶۲	۲۶۲۵	۷,۳۶۸۶۲e-۰۶	نیروهای واکنشی (نیوتون)
.	.	.	.	گشتاورهای واکنشی (نیوتون. متر)
.	.	.	.	نیروهای آزاد جسم (نیوتون)
.	.	.	.	گشتاورهای آزاد جسم (نیوتون. متر)

### ۳-۸- نتایج نهایی مدل

#### ۳-۸-۱- خلاصه کمی نتایج

خلاصه نتایج ارائه شده در این بخش شامل شاخص‌های تنش، جابجایی و کرنش است که در جدول ۶ و شکل ۸ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که:

تنش ون‌مایز: حداقل و حداکثر مقدار این تنش برابر  $۴,۰۷۲e-۰۲$  و  $۲,۰۹۷e-۰۶$  نیوتون بر متر مربع است. مقدار حداکثر تنش ون‌مایز حدود ۲,۱ مگاپاسکال در نواحی تماس لبه‌ای یا مناطقی با تمرکز تنش ثبت شده است. این پیک نشان‌دهنده مناطق بالقوه شروع گسیختگی موضعی یا تسلیم موضعی در ماده (به‌ویژه اگر مقادیر تنش مقایسه با مقاومت برشی ماده باشد) است. مقدار حداقل نیز نزدیک به صفر بوده و نشان‌دهنده نواحی دور از تمرکز بار است.

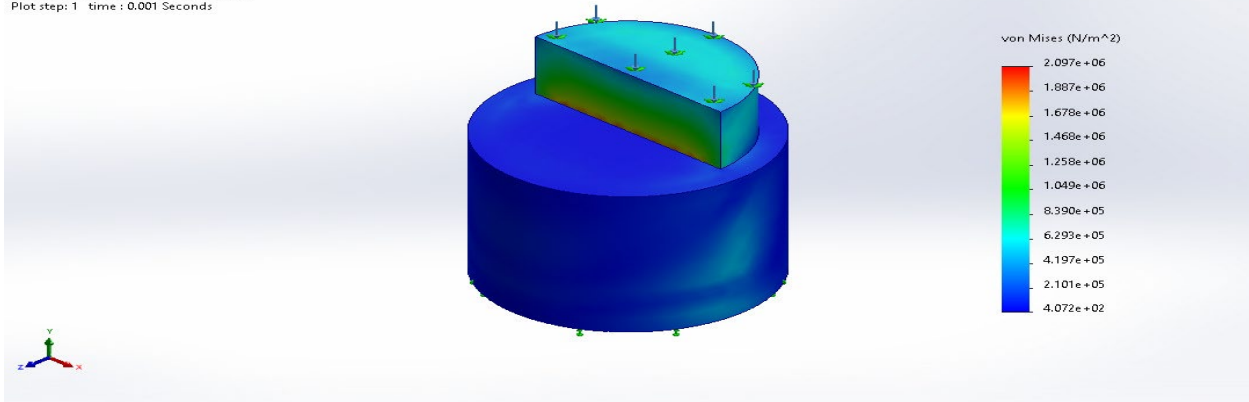
جابجایی: حداقل و حداکثر مقدار جابجایی حاصل برابر ۰ و ۱,۸۴۳ میلی‌متر است. این بیشینه جابجایی نشان‌دهنده تغییر شکل موضعی معنادار در نمونه یا اجزای نرم‌تر مجموعه (نمونه آسفالت و نواحی تماس) است.

کرنش معادل: حداقل و حداکثر مقدار کرنش معادل برابر  $۱,۵۹۰e-۰۹$  و  $۲,۲۶۸e-۰۲$  است. کرنش معادل حداکثر حدود  $۰,۰۲۲۷$  نشان‌دهنده تغییر شکل غیرخطی قابل توجه و احتمال ورود به ناحیه‌های پلاستیک یا آسیب موضعی در ماده آسفالت است. برای مواد شبه شکننده یا ویسکوپلاستیک مانند آسفالت، چنین مقادیری می‌توانند نشان‌دهنده شروع خردایش دانه‌ای یا شکست در لایه‌های ضعیف شود.

جدول ۶. خلاصه نتایج شبیه‌سازی تحلیل اجزای محدود

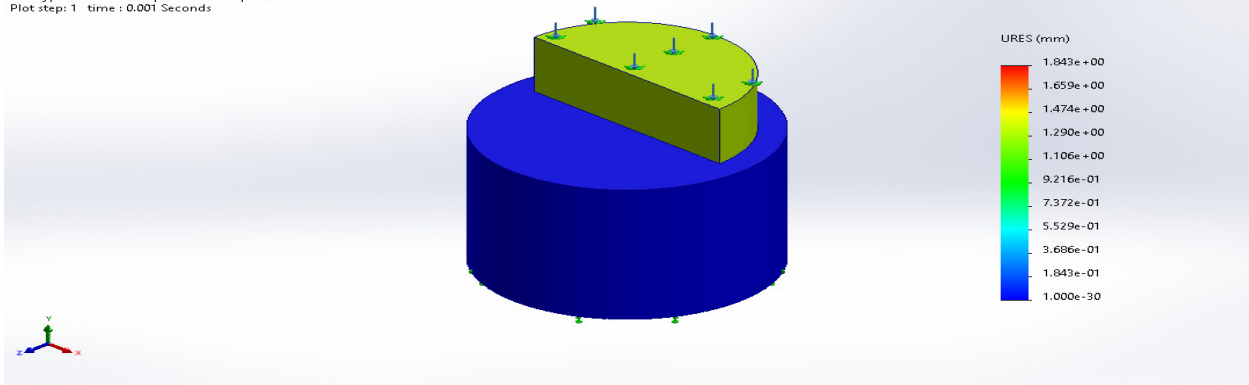
پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین
تنش ون‌مایز ( $N/m^2$ )	$۴,۰۷۲e-۰۲$	$۲,۰۹۷e-۰۶$	$۳,۰۸۴e-۰۶$
جابجایی (mm)	0	۱,۸۴۳	۰,۹۲۱
کرنش معادل	$۱,۵۹۰e-۰۹$	$۲,۲۶۸e-۰۲$	$۱,۱۳۴e-۰۲$

Model name: Asphalt shear test  
 Study name: Nonlinear 1(-Default-)  
 Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1  
 Plot step: 1 time : 0.001 Seconds



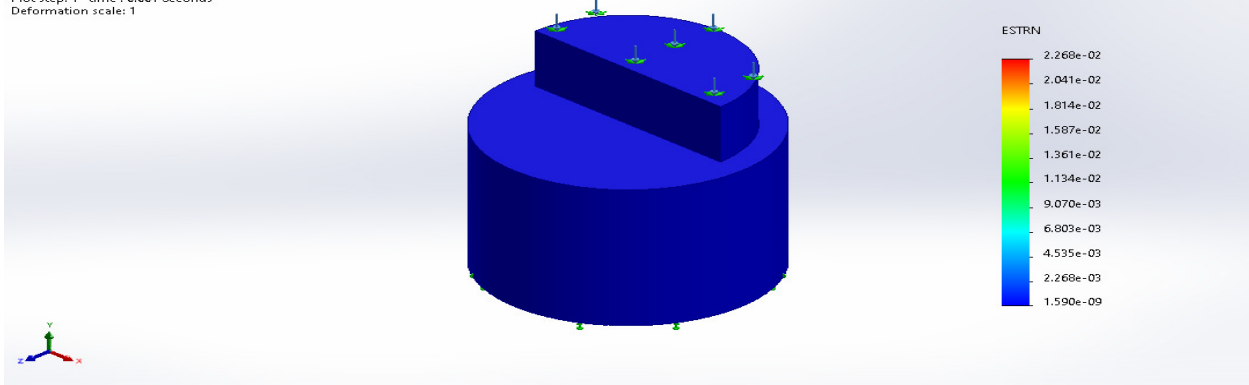
(الف)

Model name: Asphalt shear test  
 Study name: Nonlinear 1(-Default-)  
 Plot type: Nonlinear Displacement Displacement1  
 Plot step: 1 time : 0.001 Seconds



(ب)

Model name: Asphalt shear test  
 Study name: Nonlinear 1(-Default-)  
 Plot type: Total Strain Strain1  
 Plot step: 1 time : 0.001 Seconds  
 Deformation scale: 1



(ج)

شکل ۸. بررسی مولفه‌های مدل شده: (الف) توزیع تنش و نمايز، (ب) توزیع جابجایی، (ج) توزیع کرنش معادل

#### ۴- تفسیر مکانیزم‌های شکست و توزیع تنش

##### تمرکز فشار و توزیع تماس

تماس نقطه‌ای یا لبه‌ای بین فک و نمونه باعث ایجاد پیک‌های فشار محلی می‌شود که توزیع تنش را نامتقارن می‌سازد؛ این پیک‌ها محل‌های آغاز شکست برشی موضعی هستند. مطالعات تماس تایر-روکش و آزمایش‌های مستقیم نشان می‌دهند که توزیع فشار تماس می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ناحیه برشی را متمرکز کند و الگوی کرنش را تغییر دهد (Akraym et al., 2023; Su et al., 2008). در مورد اثر هندسه فک، زاویه کنارگیری و عمق شیارها مستقیماً بر مساحت مؤثر تماس و شیب میدان فشار تأثیر می‌گذارد؛ هندسه تیزتر موجب تمرکز فشار و افزایش گرادیان تنش‌های برشی می‌شود، که در نتیجه تنش‌های برشی موضعی و کرنش‌های پلاستیک زودهنگام در ماتریکس آسفالت پدید می‌آیند و مسیرهای تشکیل میکروتکرک و نوارهای برشی را تسهیل می‌کنند و در نهایت می‌تواند عمر خدمتی نمونه را تحت بارگذاری برشی به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

##### رفتار میکرو: ماتریکس، فیلم آسفالت و دانه‌ها

در مقیاس میکروسکوپی، رفتار برشی مخلوط‌های آسفالتی به‌شدت تحت تأثیر تعامل بین ماتریکس قیری، فیلم آسفالت و دانه‌های سنگی است. فیلم نازک آسفالت که دانه‌ها را احاطه کرده، نقش کلیدی در انتقال تنش و حفظ چسبندگی بین اجزای مخلوط دارد. ضخامت این فیلم، نوع قیر، و شرایط پیرشدگی آن می‌توانند مقاومت برشی را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کاهش ضخامت فیلم آسفالت، به‌ویژه در نواحی تماس با دانه‌های زبر، منجر به کاهش چسبندگی و افزایش احتمال لغزش بین‌دانه‌ای می‌شود (Dong, Sun, et al., 2020; Lu & Isacsson, 2002). همچنین، در دماهای بالا یا تحت بارگذاری‌های مکرر، فیلم آسفالت ممکن است دچار نرم‌شدگی یا شکست موضعی شود که آغازگر تخریب‌های برشی در مقیاس ماکرو خواهد بود. بنابراین، مدل‌سازی دقیق رفتار میکرو نیازمند درک صحیح از خواص رئولوژیکی قیر، ضخامت فیلم و ویژگی‌های سطحی دانه‌هاست.

#### تشکیل نوارهای برشی و توسعه پلاستیک ماکرو

در سطح ماکرو، یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست در مخلوط‌های آسفالتی، تشکیل و گسترش نوارهای برشی است. این نوارها به‌صورت نواحی باریک با تمرکز بالای کرنش پلاستیک ظاهر می‌شوند و معمولاً در راستای بیشینه تنش برشی توسعه می‌یابند. مطالعات عددی و تجربی نشان داده‌اند که تحت بارگذاری‌های شبه‌استاتیک یا چرخه‌ای، نوارهای برشی ابتدا در نواحی ضعیف‌تر یا دارای تمرکز تنش شکل می‌گیرند و سپس با افزایش بار، گسترش یافته و به شکست کلی منجر می‌شوند. این پدیده به‌ویژه در مخلوط‌هایی با دانه‌بندی نامناسب یا چسبندگی ضعیف بین اجزا تشدید می‌شود. مدل‌سازی دقیق این نوارها نیازمند استفاده از مدل‌های غیرخطی پیشرفته مانند الاستوپلاستیک یا ویسکوالاستیک است که بتوانند وابستگی به نرخ بارگذاری، دما و تاریخچه تنش را در نظر بگیرند (Buttlar et al., 2014; Underwood & Kim, 2011; Zhu et al., 2022). در شبیه‌سازی حاضر، مشاهده کرنش معادل حداکثر در حدود ۰.۲۲۷ نشان‌دهنده ورود نمونه به ناحیه پلاستیک و آغاز تشکیل چنین نوارهایی است.

#### نقش اصطکاک و شرایط مرزی

شرایط مرزی و ضریب اصطکاک بین فک و نمونه آسفالتی تأثیر مستقیمی بر نحوه توزیع تنش و انتقال نیرو دارند. در آزمایش‌های برشی، اگر تماس بین فک و نمونه دارای اصطکاک بالا باشد، نیروی برشی به‌صورت متمرکز در ناحیه تماس اعمال می‌شود که می‌تواند منجر به تمرکز تنش و آغاز ترک‌های موضعی شود. در مقابل، کاهش اصطکاک یا استفاده از لایه‌های لغزنده می‌تواند توزیع تنش را یکنواخت‌تر کرده و از تمرکز تنش جلوگیری کند (D'Andrea et al., 2013; White, 2017). همچنین، شرایط مرزی مانند نوع تکیه‌گاه‌ها (ثابت یا لغزنده)، نحوه تثبیت نمونه، و زبری سطح تماس، همگی بر نتایج نهایی تأثیرگذارند. مطالعات نشان داده‌اند که عدم کنترل دقیق این شرایط می‌تواند منجر به پراکندگی زیاد در نتایج آزمایشگاهی شود و تکرارپذیری را کاهش دهد (White, 2017; Zhang et al., 2025). بنابراین، تعریف دقیق شرایط مرزی و اندازه‌گیری تجربی ضریب اصطکاک برای ورود به مدل‌های عددی و تفسیر نتایج ضروری است.

### مقایسه با داده‌های مرجع و اعتبار نتایج

مقدار میانگین تنش ون‌مایز به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی این مطالعه (۳,۰۸۴ مگاپاسکال) با بازه تجربی و پیش‌بینی‌شده در مقاله مدرسی و همکاران (۲۰۲۴) که در حدود ۳,۱ مگاپاسکال گزارش شده، اختلاف کمی دارد (Modarresi et al., 2024); این نزدیکی کمی نشان‌دهنده این است که پارامترهای ورودی مدل (خواص ماده، ضریب اصطکاک و هندسه فک) و فرضیات مرزی انتخاب‌شده، بازنمایی معقولی از شرایط آزمایشگاهی فراهم کرده‌اند. این اختلاف کمتر از ۲٪ در چنین مطالعاتی که شامل عدم قطعیت‌های تجربی و پارامتری است، معمولاً در محدوده قابل قبول تلقی می‌شود. همچنین هر دو مطالعه، تمرکز تنش در ناحیه تماس و تشکیل نواحی پلاستیک موضعی / نوارهای برشی را گزارش می‌کنند؛ این هم‌راستایی نشان می‌دهد که مدل عددی نه‌تنها مقادیر را بازتولید می‌کند، بلکه مکانیزم‌های شکست را نیز به‌درستی شبیه‌سازی می‌کند. لازم به ذکر است که این مطالعه بر تحلیل غیرخطی المان محدود با تمرکز بر توزیع تنش و کرنش تحت بار نرمال ۳۵,۰۰۰ نیوتون تکیه دارد، در حالی که مطالعه مدرسی و همکاران ترکیبی از آزمایش‌های فیزیکی با فک‌های طراحی‌شده و مدل‌سازی داده‌محور (برنامه نویسی ژنتیک) ارائه کرده‌اند. هر روش نقاط قوت خود را دارد: تحلیل اجزای محدود (FEA) برای تحلیل میدان‌های داخلی و مکانیزم‌ها مناسب است و برنامه نویسی ژنتیک برای استخراج روابط پیش‌بینی و تعمیم تجربی مفید است. هم‌افزایی این دو رویکرد (اعتبارسنجی عددی با داده‌های تجربی و مدل‌های داده‌محور) می‌تواند مسیر قوی‌تری برای توسعه پروتکل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های پیش‌بینی در آینده فراهم می‌آورد. در مقایسه با مطالعات میدانی و آزمایشگاهی مرسوم، مطالعات کلاسیک برشی (جعبه برش مستقیم) (Qiu et al., 2013; Said et al., 2012) و آزمون‌های دینامیکی (DSR) (Farrar et al., 2015; Xu et al., 2024) معمولاً توزیع تنش یکنواخت‌تری را فرض یا اندازه‌گیری می‌کنند و نتایج آن‌ها اغلب با نتایج حاصل از فک‌های متمرکز یا هندسه‌های تیز تفاوت دارد. در مقایسه با این روش‌ها، شبیه‌سازی حاضر و مطالعاتی که فک‌های ویژه طراحی کرده‌اند نشان می‌دهند که:

-مقادیر پیک تنش و کرنش در آزمایش‌های با تماس متمرکز بالاتر و نواحی آسیب موضعی واضح‌تری مشاهده می‌شود، در حالی که

روش‌هایی با تماس گسترده‌تر توزیع تنش را هموارتر گزارش می‌کنند.

-فک قیچی‌مانند و طراحی‌های مشابه می‌توانند بار برشی محلی و ترکیبی قائم-برشی را بهتر شبیه‌سازی کنند، بنابراین برای پیش‌بینی شیارشدهگی و شکست موضعی مناسب‌ترند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که انتخاب روش آزمایشی باید بر اساس هدف مهندسی (پیش‌بینی شیارشدهگی موضعی در مقابل اندازه‌گیری مقاومت برشی کلی) صورت گیرد.

از طرف دیگر، مطالعات مزوسکوپی که تعامل فیلم آسفالت و دانه‌ها را بررسی کرده‌اند نشان می‌دهند که ضخامت فیلم، زبری سطح دانه‌ها و خواص رئولوژیک قیر نقش تعیین‌کننده‌ای در آستانه لغزش بین‌دانه‌ای و آغاز خردایش دارند (Dong, Sun, et al., 2020; Gong et al., 2025; Huang et al., 1998). در مقایسه با این نتایج:

-مدل حاضر که از منحنی تنش-کرنش غیرخطی برای آسفالت استفاده کرده، توانسته ورود به ناحیه پلاستیک موضعی را بازنمایی کند، اما جزئیات میکروسکوپی مانند توزیع فیلم آسفالت یا جداشدهگی بین‌دانه‌ای صریحاً مدل نشده‌اند.

-مطالعاتی که مدل‌های چندمقیاسی یا پیوند با داده‌های میکروساختاری دارند، معمولاً می‌توانند روند خردایش دانه‌ای و انتقال انرژی شکست را دقیق‌تر پیش‌بینی کنند؛ بنابراین برای تکمیل اعتبار، پیشنهاد می‌شود نتایج عددی با آزمایش‌های میکروسکوپی (مثلاً تصویربرداری میکرو-CT یا آزمون‌های رابط) مقایسه شوند تا پارامترهای میکرو (ضخامت فیلم، ضریب چسبندگی) به‌صورت مستقیم وارد مدل شوند.

به‌علاوه، مطالعات عددی پیشرفته که از مدل‌های ویسکوالاستیک-ویسکوساختار یا الاستوپلاستیک با آسیب جمعی استفاده کرده‌اند (Cao et al., 2020; Li et al., 2025; Zhang et al., 2019)، نشان داده‌اند که پاسخ آسفالت به بارگذاری‌های چرخه‌ای و وابسته به نرخ می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی با نتایج شبه‌استاتیک تفاوت داشته باشد. در این زمینه:

شبیه‌سازی حاضر (تحلیل غیرخطی شبه‌استاتیک) برای بررسی مکانیزم‌های آغاز شکست و توزیع تنش مناسب است، اما برای پیش‌بینی رفتار تحت بارگذاری چرخه‌ای یا دام‌های متفاوت نیاز به گسترش مدل ماده به ویسکوالاستیک / خستگی وجود دارد.

## ۵- نتیجه گیری

هدف اصلی این مطالعه، ارائه و اعتبارسنجی یک روش نوین برای ارزیابی مقاومت برشی آسفالت با استفاده از طراحی فک ابداعی دستگاه مارشال و تحلیل اجزای محدود غیرخطی در نرم افزار SolidWorks بود. این تحقیق با تمرکز بر رفع محدودیت‌های روش‌های سنتی مانند آزمایش جعبه برش مستقیم و آزمون مارشال، تلاش کرد ابزاری طراحی کند که بتواند شرایط واقعی تر بارگذاری برشی را بازنمایی کرده و نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتر برای تحلیل رفتار مکانیکی آسفالت فراهم آورد. در بخش روش‌شناسی، ابتدا طراحی فک جدید با اصلاح هندسه فک مرسوم مارشال انجام شد؛ این اصلاحات شامل ایجاد شیارها و تغییرات هندسی برای اعمال نیروی برشی به صورت قیچی مانند بود. سپس مدل سه بعدی شامل نمونه آسفالت، اجزای فولادی فک و پیستون بارگذاری در محیط SolidWorks ساخته شد. خواص مصالح بر اساس داده‌های تجربی و استانداردهای ASTM وارد مدل گردید؛ فولاد با مدل پلاستیسیته ون‌مایز و آسفالت با مدل غیرخطی الاستیک همراه با منحنی تنش-کرنش تعریف شد. شرایط مرزی شامل قیدهای ثابت و تماس سطح-به-سطح با ضریب اصطکاک ۰٫۳ در نظر گرفته شد و بارگذاری نرمال ۳۵،۰۰۰ نیوتن به صورت تابع زمان اعمال گردید. مش‌بندی با کیفیت بالا و تعداد مناسب المان‌ها انجام شد تا توزیع تنش و کرنش با دقت کافی ثبت شود. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که فک ابداعی توانست شرایط برشی واقعی‌تر را ایجاد کند. توزیع تنش‌ها نشان‌دهنده تمرکز بار در نواحی تماس مستقیم فک و نمونه بود و متوسط تنش معادل ون‌مایز حدود  $10^6 \times 3,084$  نیوتون بر متر مربع ثبت شد. تغییر مکان نمونه حدود ۱٫۸۴۳ میلی‌متر و کرنش معادل حداکثر ۰٫۰۲۲۷ بود که بیانگر تغییر شکل غیرخطی و آغاز نواحی پلاستیک در آسفالت است. نیروهای اصطکاکی محاسبه شده نیز نشان دادند که تماس سطحی نقش مهمی در پایداری نمونه و جلوگیری از لغزش دارد. مقایسه رفتار فولاد و آسفالت در نمودارهای تنش-کرنش نیز نشان داد فولاد با رفتار پایدار و خطی توانسته بارگذاری را به خوبی متحمل کند، در حالی که آسفالت پس از رسیدن به مقاومت نهایی دچار افت تنش و نرم‌شدگی شده است.

مطالعاتی که تحلیل پارامتریک گسترده و مدل‌های وابسته به نرخ را اجرا کرده‌اند، نشان داده‌اند که پارامترهایی مانند نرخ بارگذاری، دما و تاریخچه بار می‌توانند آستانه تشکیل نوارهای برشی و سرعت رشد آسیب را تغییر دهند؛ بنابراین اختلافات جزئی بین نتایج شبه‌استاتیک و نتایج چرخه‌ای قابل انتظار است.

در نهایت اختلافات مشاهده شده بین نتایج این مطالعه و برخی مطالعات را می‌توان عمدتاً به عوامل زیر نسبت داد:

**شرایط مرزی و هندسه تماس:** تفاوت در طراحی فک، زاویه‌ها، عمق شیارها و روش تثبیت نمونه می‌تواند توزیع فشار تماس را به طور چشمگیری تغییر دهد.

**تعریف ماده آسفالت:** استفاده از مدل الاستیک غیرخطی در مقابل مدل‌های ویسکوالاستیک یا الاستوپلاستیک منجر به تفاوت در پیش‌بینی کرنش‌های تجمعی و نواحی پلاستیک می‌شود.

**ضریب اصطکاک و آماده‌سازی سطح:** مقادیر متفاوت ضریب اصطکاک یا روش‌های آماده‌سازی سطح (زبرسازی، پوشش) نتایج برشی را جابه‌جا می‌کنند.

**مقیاس و جزئیات میکروساختاری:** مطالعاتی که اثرات میکروسکوپی را صریحاً مدل می‌کنند، معمولاً جزئیات شکست بین‌دانه‌ای را بهتر بازتولید می‌کنند و ممکن است مقادیر آستانه متفاوتی گزارش کنند.

مقایسه تفصیلی نشان می‌دهد که نتایج این مطالعه در چارچوب مطالعات مرجع و مقالات مرتبط، از جمله مدرسی و همکاران (۲۰۲۴) (Modarresi et al., 2024)، هم‌راستا و معتبر است؛ هم‌پوشانی کمی در مقادیر کلیدی و هم‌خوانی مکانیزمی (تمرکز تنش، نواحی پلاستیک و تشکیل نوارهای برشی) نشان می‌دهد که مدل عددی توانسته رفتار فیزیکی را به خوبی بازتولید کند. با این حال، برای ارتقای اعتبار و تعمیم‌پذیری، لازم است که مدل با مجموعه داده‌های تجربی گسترده‌تر، تحلیل‌های پارامتریک کمی و گسترش مدل ماده به منظور پوشش وابستگی به نرخ و دما تکمیل شود. این مسیر نه تنها همگرایی بین نتایج عددی و تجربی را افزایش می‌دهد، بلکه امکان تدوین پروتکل‌های آزمایشگاهی استانداردتر و مدل‌های پیش‌بینی قابل اعتمادتر را فراهم می‌آورد.

بارگذاری شبه‌استاتیک انجام شد و اثرات دینامیکی و خستگی ناشی از بارهای ترافیکی واقعی در نظر گرفته نشد. این موارد نشان می‌دهد که نتایج عددی باید با احتیاط تفسیر شوند و نیازمند اعتبارسنجی تجربی گسترده‌تر هستند.

در مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود آزمایش‌های تجربی گسترده برای اعتبارسنجی نتایج عددی انجام گیرد و مدل‌های پیشرفته‌تر ویسکوالاستیک و وابسته به دما توسعه یابند تا رفتار واقعی آسفالت تحت شرایط محیطی مختلف بهتر شبیه‌سازی شود. همچنین، بررسی اثر تغییر هندسه فک و شرایط تماس بر توزیع تنش و کرنش می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی کمک کند. توسعه تحلیل‌های دینامیکی و خستگی برای شبیه‌سازی شرایط بارگذاری چرخه‌ای و ترافیکی نیز ضروری است تا نتایج به شرایط واقعی نزدیک‌تر گردد. در نهایت، ترکیب داده‌های عددی و تجربی می‌تواند به تدوین استانداردهای جدید برای ارزیابی مقاومت برشی آسفالت منجر شود و مسیر تحقیقات آینده را به سمت کاربردهای عملی گسترده‌تر هدایت کند.

## ۶- مراجع

-دیواندری، حسن و اکراقبری، ایرج (۱۴۰۳). ارائه مدل تاثیر پارامترهای طراحی بر تنش و کرنش در روسازی ماندگار به روش اجزای محدود. *جاده*، ۳۲(۱۲۱)، ۱-۱۸.

-طهمورسی، قاسم، فضل‌اللهی، محمدرضا و دیواندری، حسن. (۱۴۰۲). ارائه مدل عملکرد مبتنی بر شاخص وضعیت روسازی با استفاده از داده‌های عملکرد بلندمدت روسازی. *جاده*، ۳۱(۱۱۴)، ۱-۱۴.

-Akraym, H. M., Muniandy, R., Jakarni, F. M., & Hassim, S. (2023). Review: Shear Properties and Various Mechanical Tests in the Interface Zone of Asphalt Layers. *Infrastructures*, 8(3), 48.

-Buttlar, W. G., Hill, B. C., Kim, Y. R., Kutay, M. E., Millien, A., Montepara, A., Paulino, G. H., Petit, C., Pop, I. O., & Romeo, E. (2014). Digital image correlation techniques to investigate strain fields and cracking phenomena in asphalt materials. *Materials and structures*, 47(8), 1373-1390.

به‌طور کلی، این مطالعه نشان داد که طراحی فک جدید می‌تواند محدودیت‌های روش‌های سنتی را کاهش دهد و با کمک تحلیل اجزای محدود، امکان ارزیابی دقیق‌تر مقاومت برشی آسفالت فراهم گردد. نتایج عددی با رفتار مکانیکی مورد انتظار مطابقت داشت و نشان داد که ترکیب طراحی مکانیکی و شبیه‌سازی عددی می‌تواند روشی کارآمد برای ارتقای کیفیت آزمایش‌های مکانیکی آسفالت باشد. از منظر نظری، این پژوهش توانست چارچوبی علمی برای بررسی دقیق‌تر رفتار برشی آسفالت ارائه دهد. طراحی فک ابداعی دستگاه مارشال و اعتبارسنجی آن با تحلیل اجزای محدود غیرخطی، امکان مطالعه توزیع تنش و کرنش در نمونه‌های آسفالتی را با دقتی بالاتر فراهم کرد. این رویکرد نه تنها به توسعه مدل‌های عددی در حوزه مکانیک روسازی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند مبنایی برای گسترش مدل‌های ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک باشد که رفتار وابسته به زمان و دما را نیز در نظر می‌گیرند. از این جهت، نتایج تحقیق حاضر ارزش افزوده‌ای برای محققان و مهندسانی دارد که به دنبال درک عمیق‌تر از مکانیزم‌های شکست و تغییر شکل در مصالح آسفالتی هستند. از منظر عملی، کاربرد این روش در آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت و مراکز تحقیقاتی می‌تواند به بهبود فرآیند طراحی و انتخاب مخلوط‌های آسفالتی منجر شود. فک ابداعی با ایجاد شرایط واقعی‌تر بارگذاری برشی، داده‌هایی تولید می‌کند که با عملکرد روسازی تحت بارهای ترافیکی همخوانی بیشتری دارند. این امر به مهندسان امکان می‌دهد مخلوط‌هایی مقاوم‌تر در برابر شیارشدگی و ترک انتخاب کنند و در نتیجه هزینه‌های نگهداری و تعمیر کاهش یابد. همچنین، استفاده از تحلیل اجزای محدود در کنار آزمایش‌های تجربی می‌تواند به طراحی دستگاه‌های آزمایشگاهی جدید با قابلیت ارزیابی دقیق‌تر مقاومت برشی کمک کند و در نهایت موجب ارتقای استانداردهای مهندسی روسازی در سطح ملی و بین‌المللی شود. با وجود دستاوردهای قابل توجه، این مطالعه محدودیت‌هایی دارد که باید در نظر گرفته شود. نخست، مدل عددی مورد استفاده تنها بخشی از رفتار پیچیده آسفالت را بازنمایی کرده و اثرات وابستگی به دما، نرخ بارگذاری و بارگذاری چرخه‌ای در آن لحاظ نشده است. دوم، داده‌های ورودی مربوط به منحنی تنش-کرنش آسفالت از آزمایش‌های محدود استخراج شده و ممکن است برای شرایط محیطی و مصالح مختلف نیاز به بازنگری داشته باشد. سوم، تحلیل حاضر بر پایه

- sand and shredded tire mixtures using direct shear test. *J. Ferdowsi Civ. Eng.*, 29(1).
- Huang, S. C., Branthaver, J. F., Robertson, R. E., & Kim, S.-S. (1998). Effect of film thickness on the rheological properties of asphalts in contact with aggregate surface. *Transportation Research Record*, 1638(1), 31-39.
- Huang, T., Qi, S., Liu, H., Yu, H., & Li, S. (2019). Shear properties of asphalt mixtures under triaxial compression. *Applied Sciences*, 9(7), 1489.
- Ji, X., Zheng, N., Hou, Y., & Niu, S. (2013). Application of asphalt mixture shear strength to evaluate pavement rutting with accelerated loading facility (ALF). *Construction and Building Materials*, 41, 1-8.
- Kazerani, T., Yang, Z.-Y., & Zhao, J. (2012). A discrete element model for predicting shear strength and degradation of rock joint by using compressive and tensile test data. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(5), 695-709.
- Kruncheva, M., Collop, A., & Thom, N. (2001). Shear box test: finite element modelling. *Project Report PGR01-05, NCPE, Nottingham*, 358-362.
- Li, L., Wu, C., Cheng, Y., Tan, G., & Li, H. (2021). Study on numerical simulation of asphalt mixtures and asphalt pavement based on finite element software: A Review. *2021 IEEE 11th annual international conference on CYBER technology in automation, control, and intelligent systems (CYBER)*.
- Li, X. Sha, A., Jiao, W., Cao, Y., & Song, R. (2025). Strain response and creep behavior of asphalt mixture based on multi-damage fractional visco-elasto-plastic constitutive model. *Construction and Building Materials*, 472, 140834.
- Lu, X., & Isacsson, U. (2002). Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building Materials*, 16(1), 15-22.
- Modarresi, M., Divandari, H., Amouzadeh Omrani, M., & Esmaeilnia Amiri, M. (2024). Introducing an Experimental Model of Asphalt Shear Strength Using Designed Jaws and Presentation of Shear Strength Prediction Model
- Cao, P., Leng, Z., Shi, F., Zhou, C., Tan, Z., & Wang, Z. (2020). A novel visco-elastic damage model for asphalt concrete and its numerical implementation. *Construction and Building Materials*, 264, 120261.
- D'Andrea, A., Tozzo, C., Boschetto, A., & Bottini, L. (2013). Interface roughness parameters and shear strength. *Modern Applied Science*, 7(10), 1-10.
- De Bondt, A. H. (2000). Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays.
- Divandari, H., Sarkar, A., Kargar Aldaghi, O., & Hosseinian, S. M. (2025). Evaluation of performance characteristics of microsurfacing treatment modified with gilsonite as a substitute for natural aggregate filler. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1), 2477766.
- Dong, M., Hao, Y., Zhang, C., Li, L., Sun, W., & Jin, C. (2020). Shear fracture energy of asphalt-aggregate systems and its application to predicting shear fatigue in asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(2), 246-256.
- Dong, M., Sun, W., Li, L., & Gao, Y. (2020). Effect of asphalt film thickness on shear mechanical properties of asphalt-aggregate interface. *Construction and Building Materials*, 263, 120208.
- Fakhri, M., & Mahmoodinia, N. (2012). Rutting resistance evaluation of large stone asphalt mixtures. *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 23(1), 123-135.
- Farrar, M., Sui, C., Salmans, S., & Qin, Q. (2015). Determining the low-temperature rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR). *Report 4FP*, 8, 20.
- Gong, X., Gu, H., Yan, H., Huang, X., Zhou, H., & Ma, J. (2025). Effect of aggregate roughness and film thickness on interfacial interaction of aggregate-asphalt-aggregate films. *Construction and Building Materials*, 486, 141984.
- Hosseininia, A. (2017). A study of the effect of shredded tire size on the mechanical behavior of

- Underwood, S. B., & Kim, R. Y. (2011). Viscoelastoplastic continuum damage model for asphalt concrete in tension. *Journal of Engineering Mechanics*, 137(11), 732-739.
- Wang, W., & Wang, L. (2024). Review on design, characterization, and prediction of performance for asphalt materials and asphalt pavement using multi-scale numerical simulation. *Materials*, 17(4), 778.
- White, G. (2017). State of the art: interface shear resistance of asphalt surface layers. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(10), 887-901.
- Xu, P., Zhang, D., Liu, Z., Tang, J., & Xu, S. (2024). Quantifying the blending efficiency of warm mix asphalt-synchronous rejuvenated SBS-modified asphalt through a dynamic shear rheometer (DSR) testing approach. *Construction and Building Materials*, 449, 138183.
- Yu, Y., Huang, W., Sun, M., Du, X., & Lin, H. (2025). Effect of Aggregate and Void Characteristics on Shear Resistance of Asphalt Mixtures. *Processes*, 13(11), 3461.
- Zhang, J., Li, Z., Chu, H., & Lu, J. (2019). A viscoelastic damage constitutive model for asphalt mixture under the cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 227, 116631.
- Zhang, Y., Feng, S., Wang, W., & Zhu, Y. (2025). Effects of Test-Specimen Boundary Conditions on the Interpretation of Stress–Strain Results for Hydraulic Asphalt Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(11), 8011-8025.
- Zhu, J., Ahmed, A., Said, S., Dinegda, Y., & Lu, X. (2022). Experimental analysis and predictive modelling of linear viscoelastic response of asphalt mixture under dynamic shear loading. *Construction and Building Materials*, 328, 127095.
- by Genetic Programming Method. *Journal of Advanced Transportation*, 2024(1), 2270042.
- Nezhad, A. S. (2025). Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed. *Ferdowsi Civil Engineering*, 38(1).
- Qiu, J., Li, N., Pramesti, F., Van De Ven, M., & Molenaar, A. (2012). Evaluating laboratory compaction of asphalt mixtures using the shear box compactor. *Journal of Testing and Evaluation*, 40(5), 844-852.
- Raab, C., & Arraigada, M. (2025). Towards A better understanding of crack propagation in asphalt pavements with reinforcement grids (using laboratory-scaled traffic load and interlayer shear test). *Road Materials and Pavement Design*, 26(sup1), 39-54.
- Said, S. F., Hakim, H., & Eriksson, O. (2013). Rheological characterization of asphalt concrete using a shear box. *Journal of Testing and Evaluation*, 41(4), 602-610.
- Shi, C., Cai, X., Yi, X., Wang, T., & Yang, J. (2021). Fatigue crack density of asphalt binders under controlled-stress rotational shear load testing. *Construction and Building Materials*, 272, 121899.
- Su, K., Sun, L., Hachiya, Y., & Maekawa, R. (2008). Analysis of shear stress in asphalt pavements under actual measured tire-pavement contact pressure. *Proceedings of the 6th ICPT, Sapporo, Japan*, 11-18.
- Tahmouresi, G., Amouzadeh Omrani, M., Divandari, H., & Seyedkazemi, A. (2025). Experimental investigation of the mechanical properties of asphalt mixtures containing lightweight expanded clay aggregate replacing coarse aggregates and modified with nano-AL2O3. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1), 2532690.

# Finite Element Analysis of Shear Behavior of Asphalt Mixtures Using an Innovative Marshall Jaw

*Morteza Modaresi, Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran.*

*Hassan Divandari, Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Mohsen Amouzadeh Omrani, Department of Civil Engineering, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.*

*Mojtaba Esmailnia Amiri, Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran.*

**E-mail: ha.divandari@iaau.ac.ir**

**E-mail: Mo.Omrani@iaau.ac.ir**

Received: October 2025 - Accepted: January 2026

## ABSTRACT

Asphalt shear strength is one of the most important mechanical properties governing the durability and performance of pavement, whose deficiency leads to cracking, rutting, and premature failure. Conventional methods, such as the direct shear box and the Marshall test, suffer from serious limitations due to non-uniform stress distribution and inability to reproduce realistic loading conditions, creating a significant research gap in the accurate assessment of shear strength. The innovation of this study is the design of an inventive jaw for the Marshall apparatus that, by modifying the geometry to produce a scissor-like action, enables the application of more realistic shear forces. The objective was to evaluate this new jaw and validate its performance using nonlinear finite element analysis in SolidWorks. The methodology included three-dimensional modeling of the jaw and asphalt specimen, definition of material properties according to ASTM standards, application of a normal load of 35,000 N, definition of surface-to-surface contact with a friction coefficient of 0.3, and high-quality meshing. Results showed that the inventive jaw was able to produce shear conditions closer to reality; the mean von Mises stress was approximately  $3.084 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>, the displacement reached 1.843 mm, and the equivalent strain was 0.0227, indicating nonlinear deformation and the onset of plastic zones in the asphalt. In summary, the combination of an innovative mechanical design and numerical simulation provides an efficient approach to improve asphalt shear strength assessment and paves the way for the development of new laboratory devices and more rigorous testing standards.

**Keywords:** Asphalt, Shear Strength, Innovative Jaw, Marshall Apparatus, Finite Element Analysis