



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دکتری

رشته:

مهندسی عمران – خاک و پی

عنوان:

الگوی کشسان خمیری چند صفحه‌ای آسیب جهت ارزیابی تحلیلی

مصالح سنگی یا بتنی

استاد راهنما:

مرحوم آقای دکتر سید امیرالدین صدرنژاد

استاد مشاور:

آقای دکتر حسن قاسم زاده

نگارش:

شهریز شاکری گرکانی

اردیبهشت ماه

۱۳۹۷

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیر و تشکر

در آغاز سخن، خداوند بزرگ را شکر می گویم که انوار رحمتش را در لحظه لحظه زندگی خود حس می کنم و بدون الطاف او به پایان رسانیدن مجموعه حاضر بر من ممکن نبود.

تشکر می کنم از پدر و مادر عزیز و همسر و فرزند مهربانم که در تمامی مراحل زندگی پشتیبان من بوده اند. نیک می دانم که قدردانی از این بزرگواران در حد و اندازه حقیر نیست، پس هر آنچه نیکی و رحمت است برایشان از خداوند بزرگ مسألت دارم.

از روح استاد گرانقدرم، جناب آقای دکتر سید امیرالدین صدرنژاد، کمال تشکر را دارم که هیچ گاه سؤالهای بی پایان مرا بی پاسخ نگذارد و همواره با سعه صدر اینجانب را در به انجام رسانیدن مجموعه حاضر یاری فرمود. بسیار متاسفم که دست تقدیر در واپسین گامهای مسیر، این استاد فرزانه و گرانقدر را از من گرفت و مرا از این نعمت محروم ساخت. برای ایشان علو درجات را از درگاه خداوند متعال خواستارم.

همچنین از زحمات جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده که با نهایت دقت و دلسوزی در راهنمایی و مشاوره این رساله دکتری به بنده یاری نمودند، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده :

اکثر مصالح مطرح و مورد مطالعه در علوم مختلف مهندسی دارای رفتار ناهمسانگرد می‌باشند. بررسی رفتار مکانیکی مصالح ناهمسانگرد بدلیل پیچیدگی ذاتی رفتار این گونه مصالح با استفاده از الگوهای رفتاری پیوسته متداول، در برخی خصوصیات دچار محدودیت می‌باشند که تا حدودی قابل رفع نمی‌باشند. بعنوان مثال پیش‌بینی جهت گسیختگی و یا نوع گسیختگی^۱ و تغییرات آرایش مصالح^۲ (تغییر جهت دانه‌ها در مصالح دانه‌ای یا کریستال‌ها در فلزات) تحت مسیرهای مختلف بارگذاری تنش یا کرنش که برای یک ماده ممکن است اتفاق بیفتد، همگی از محدودیت‌های الگوهای رفتاری پیوسته می‌باشد که در حالت عادی توسط آنها امکان پیش‌بینی و محاسبه وجود ندارد. از آنجا که اکثر الگوهای پیوسته بر پایه مقادیر ثابت تانسورها استوار هستند، لذا اثر چرخش محورهای اصلی تنش یا کرنش در اینگونه الگوها قابل محاسبه نیستند. بعلاوه در نظر گرفتن شرایط ناهمسانگردی بر پیچیدگی شرایط موجود می‌افزاید که در برخی زمینه‌ها استفاده از الگوهای پیوسته را دچار محدودیت می‌نماید.

به عنوان هدف اصلی این رساله دکتری، و در جهت رفع مشکلات و نواقص گفته شده، یک الگوی رفتاری پیشنهاد شده است که قادر به در نظر گرفتن موارد فوق و از بین بردن موانع می‌باشد. این الگوی رفتاری بر بستر الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای^۳ توسعه یافته است. جهت در نظر گرفتن خواص ناهمسانگردی در جهات مختلف و محاسبه تغییرات آن در حین بارگذاری با یک قانون جامع، بیضی‌گون‌های سختی قائم و برشی به الگوی پایه اضافه شده‌اند. این بیضی‌گون‌های اولیه در طول بارگذاری با استفاده از روابط آسیب تنش و کرنش روی صفحات مختلف، دچار تغییر و تحول می‌شوند و اشکال هندسی نامنظم جدید بوجود می‌آورند که نشانگر مقاومت جدید ماده در راستاهای مختلف می‌باشد. جهت اعمال خواص ناهمراستایی^۴ تنش و کرنش در این الگو، مفهوم میدان تنش و کرنش معرفی شده است. با اضافه کردن موارد فوق الگوی رفتاری پیشنهاد شده قادر به در نظر گرفتن اکثر خواص مصالح ناهمسانگرد می‌باشد.

جهت بررسی صحت کارکرد الگوی رفتاری توسعه یافته نقطه‌ای، نتایج تجربی چندین آزمایش تک محوری و سه محوری و استوانه توخالی^۵ برای سنگ و ماسه موجود در مقالات معتبر، بکار گرفته شده و با نتایج حاصل از الگوی رفتاری مقایسه شده است. نتایج حاصله گویای دقت الگوی رفتاری و توانایی آن در پیش‌بینی رفتار مصالح می‌باشد. همچنین جهت کاربردی کردن این الگوی رفتاری نقطه‌ای، یک برنامه در محیط نرم‌افزار Opensees نوشته شده و الگوی رفتاری به نرم‌افزار معرفی شده است. این برنامه به صورت عددی قادر به شبیه سازی اجزاء محدود کلیه سازه‌های خاکی و یا بتنی ناهمسانگرد و پیش‌بینی نتایج رفتاری حاصل از بارگذاری آنها در کلیه جهات و صفحات دلخواه می‌باشد. نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های این برنامه نیز با نتایج تجربی موجود مقایسه شده و گویای عملکرد مناسب آن می‌باشد.

واژه های کلیدی : الگوی رفتاری چندصفحه‌ای، نظریه آسیب، ناهمسانگردی، ناهمراستایی تنش و کرنش، چرخش محورهای اصلی، تغییر آرایش مصالح

1 Failure Mode
2 Fabric Assessment
3 Multi-laminate Model
4 Non-Coaxiality
5 Hollow Cylinder

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱۰
۱-۱- مقدمه	۱۱
۲-۱- تعریف مسئله و هدف تحقیق	۱۱
۳-۱- ضرورت تحقیق	۱۲
۴-۱- سوالات اساسی تحقیق	۱۲
۵-۱- نوآوری تحقیق	۱۳
۶-۱- ساختار تحقیق	۱۴
۲- تاریخچه الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای و نظریه آسیب	۱۶
۲-۱- الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای	۱۷
۲-۲- الگوهای آسیب	۲۳
۳- معرفی الگوی چند صفحه‌ای پیشنهادی و تطبیق آن	۲۵
۳-۱- روابط و چارچوب الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای	۲۶
۳-۲- مروری بر نظریه و روابط الگوی آسیب مورد استفاده	۳۳
۳-۳- ناهمسانگردی ذاتی مصالح	۴۰
۳-۳-۱- بیضی گون ضرایب سختی مولفه قائم	۴۰
۳-۳-۲- بیضی گون ضرایب سختی مولفه برشی	۴۴
۳-۴- ناهمسانگردی واداشته مصالح و تغییرات آرایش ماده	۴۶
۳-۵- پیدا کردن فراسنج‌ها و نتایج	۵۳
۳-۶- بررسی حالات مختلف گسیختگی	۶۱
۳-۷- بررسی نتایج آزمایش استوانه توخالی	۶۶
۳-۸- جمع بندی	۷۵
۴- ناهمراستایی تنش و کرنش در مصالح ناهمسانگرد	۷۶
۴-۱- اهمیت و لزوم در نظر گرفتن چرخش محورهای تانسور تنش و ناهمراستایی با کرنش	۷۷
۴-۲- توابع آسیب و محاسبه تنش‌های صفحات	۷۸
۴-۳- نمودار مفهومی تنش کرنش برشی تناوبی	۷۹
۴-۴- میدان تنش و کرنش برشی در صفحات	۸۱
۴-۵- واسنجی الگو و پیدا کردن فراسنج‌ها	۸۴
۴-۶- بررسی و مقایسه نتایج ناهمراستایی الگو و آزمایشگاهی	۸۷
۴-۷- جمع بندی	۹۳
۵- تحلیل یک نمونه آزمایش نوار برشی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود OpenSees	۹۵
۵-۱- معرفی نرم افزار OpenSees	۹۶
۵-۲- اضافه کردن یک الگوی رفتاری جدید به OpenSees	۹۷
۵-۳- معرفی مشخصات نمونه مورد بررسی	۱۰۰

۴-۵	جزء بندی نمونه.....	۱۰۴
۵-۵	از بین بردن تاثیرات جزء بندی نمونه در نتایج.....	۱۰۹
۶-۵	بررسی تغییر شکل نمونه‌های مختلف با جزء بندی متفاوت.....	۱۱۳
۷-۵	بررسی تنش‌های جانبی و قائم نمونه.....	۱۱۷
۸-۵	تغییرات ضرایب آسیب در صفحات مختلف نمونه.....	۱۱۹
۹-۵	تغییرات ضرایب سختی فشاری و برشی در جهات مختلف نمونه.....	۱۲۵
۱۰-۵	تغییرات آرایش دانه‌ها در صفحات مختلف نمونه.....	۱۲۹
۶	نتیجه‌گیری.....	۱۳۳
۱-۶	مقدمه.....	۱۳۴
۲-۶	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....	۱۳۴
۳-۶	پیشنهادهای برای ادامه کار.....	۱۳۵
۷	مراجع.....	۱۳۶

فهرست اشکال و جداول

- شکل ۳-۱- مکعب مورد نظر با ابعاد بینهایت کوچک در الگوهای پیوسته..... ۲۶
- شکل ۳-۲- جانمایی صفحات مختلف در چندوجهی ۳۴ صفحه‌ای مورد مطالعه..... ۲۸
- شکل ۳-۳- یکی از صفحات نمونه به همراه مولفه‌های قائم و برشی کرنش تصویر شده در دستگاه محلی..... ۳۱
- شکل ۳-۴- نحوه عملکرد تقابل صفحات مختلف در بوجود آوردن تنش‌های قائم و برشی..... ۳۳
- شکل ۳-۵- روند مفهومی تغییرات تجربی مقدار سختی‌های برشی و محوری با افزایش کرنش‌ها..... ۳۴
- شکل ۳-۶- تغییرات رفتار $(1-\omega)$ نسبت به مقادیر مختلف b و افزایش کرنش‌ها..... ۳۵
- شکل ۳-۷- تاثیر مقادیر مختلف b روی حالات رفتاری منحنی‌های تنش-کرنش..... ۳۶
- شکل ۳-۸- تغییرات مقادیر تابع آسیب در بارگذاری و باربرداری..... ۳۹
- شکل ۳-۹- نمایش دو بعدی واقعی و تقریبی توزیع تنش در اطراف نقطه بازای نسبت‌های مختلف تنش $(\sigma_1 / (\sigma_2 \text{ or } \sigma_3))$ برابر ۲/۵ و ۴/۰..... ۴۱
- شکل ۳-۱۰- بیضی‌گون ضرایب سختی ماده برای مولفه‌های قائم بر صفحه..... ۴۳
- شکل ۳-۱۱- بیضی‌گون ضرایب سختی ماده برای مولفه‌های برشی صفحه..... ۴۶
- شکل ۳-۱۲- تاثیر بارگذاری بر تغییر بافت و آرایش دانه‌ها..... ۴۷
- شکل ۳-۱۳- تغییرات مفهومی توزیع کرنش (گلبرگ آبی) و بیضی‌گون ضرایب سختی قائم فشاری (پروانه بنفش)..... ۵۰
- شکل ۳-۱۴- چرخش محورهای اصلی و زوال یک نمونه از بیضی‌های ضرایب سختی برشی صفحات در اثر پیشرفت بارگذاری..... ۵۱
- شکل ۳-۱۵- نمونه‌های ماسه-سنگ Queerxi..... ۵۵
- شکل ۳-۱۶- مقایسه نتایج تجربی و نظری آزمایش فشار محوری..... ۵۹
- شکل ۳-۱۷- حساسیت نتایج الگو به تغییرات فشار دورگیر..... ۶۱
- شکل ۳-۱۸- الف) رشد توابع مختلف آسیب در صفحات حین بارگذاری با زاویه بارگذاری $\Theta=0$ و فشار محیطی صفر ب) حالت گسیختگی رخ داده در نمونه..... ۶۳
- شکل ۳-۱۹- الف) رشد توابع مختلف آسیب در صفحات حین بارگذاری با زاویه بارگذاری $\Theta=45$ و فشار محیطی صفر ب) حالت گسیختگی رخ داده در نمونه..... ۶۴
- شکل ۳-۲۰- الف) رشد توابع مختلف آسیب در صفحات حین بارگذاری با زاویه بارگذاری $\Theta=90$ و فشار محیطی صفر ب) حالت گسیختگی رخ داده در نمونه..... ۶۵
- شکل ۳-۲۱- مقایسه و واسنجی نتایج محاسباتی الگوی چند صفحه‌ای و آزمایشگاهی روی یک نمونه ماسه نوادا با فشار محیطی ۱۰۰ KPa جهت یافتن فراسنج‌ها..... ۶۷
- شکل ۳-۲۲- مسیر بارگذاری آزمایش استوانه توخالی نمونه: NK41CU50. بعد از یک مرحله تحکیم ناهمسانگرد، مقدار تنش برشی پیچشی به تناوب تغییر می‌کند..... ۷۱

- شکل ۳-۲۳- مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط الگو و نتایج آزمایشگاهی برای تغییرات کرنش انحرافی نسبت به کرنش برشی برای نمونه: NK41CU50..... ۷۲
- شکل ۳-۲۴- تغییرات ضرایب سختی فشاری قائم در اثر چرخش محورهای اصلی تانسور تنش. خط چین قرمز: توزیع ضرایب سختی در حالت تحکیم همسانگرد-خط آبی: تغییرات پس از بارگذاری..... ۷۳
- شکل ۳-۲۵- تغییرات ضرایب سختی برشی در انتهای مرحله تحکیم ناهمسانگرد و تناوب‌های چرخش محورهای اصلی تانسور تنش..... ۷۴
- شکل ۴-۱- منحنی نمونه تنش کرنش برشی ماسه در حالات بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد..... ۸۰
- شکل ۴-۲- شیوه محاسبه میدان تنش برشی بر اساس میدان کرنش برشی و توزیع ضرایب سختی برشی روی صفحات مختلف..... ۸۳
- شکل ۴-۳- تغییرات و چرخش مفهومی متوالی میدان تنش برشی بر اساس تغییرات میدان کرنش برشی و بیضی توزیع ضرایب سختی روی صفحات مختلف..... ۸۴
- شکل ۴-۴- مقایسه نتایج نظری و تجربی تنش انحرافی ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) در مقابل کرنش برشی $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ برای آزمایش‌های F..... ۸۵
- شکل ۴-۵- مقایسه نتایج نظری و تجربی مقاومت گسیختگی در زوایای مختلف بارگذاری..... ۸۶
- شکل ۴-۶- نمایش مسیرهای تنش و کرنش در فضای $a - \theta$ ۸۸
- شکل ۴-۷- نمایش مسیرهای تنش و کرنش در فضای $a - \theta$ برای آزمایش‌ها..... ۸۹
- شکل ۴-۸- نمایش مسیر تنش روی صفحه نرمال شده و بردارهای افزایش کرنش در نتیجه چرخش محور تانسور تنش برای آزمایش $R1+0^\circ$ ۹۱
- شکل ۴-۹- نمایش مسیر تنش روی صفحه نرمال شده و بردارهای افزایش کرنش در نتیجه چرخش محور تانسور تنش برای آزمایش $R2+180^\circ$ ۹۱
- شکل ۴-۱۰- مقایسه ناهمراستایی بین الگو و نتایج آزمایش برای نمونه‌ها..... ۹۳
- شکل ۵-۱- نمودار گردش کار برنامه جهت حل مسئله با توجه به شرایط مرزی مختلف..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲- محورهای بارگذاری نمونه آزمایش فشاری ماسه استاندارد توپورا..... ۱۰۲
- شکل ۵-۳- مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی با جزءبندی مختلف برای مقاومت فشاری ماسه توپورا..... ۱۰۵
- شکل ۵-۴- مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی با جزءبندی مختلف برای تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری ماسه توپورا..... ۱۰۶
- شکل ۵-۵- جزءبندی‌های متفاوت برای بررسی حساسیت نمونه در نواحی مختلف نوار برشی و سایر قسمت‌ها..... ۱۰۷
- شکل ۵-۶- مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی با جزءبندی متفاوت در یک نمونه برای بررسی حساسیت نواحی مختلف نمونه فشاری ماسه توپورا..... ۱۰۸
- شکل ۵-۷- سطح برازش داده شده کلی برای ضرایب تبدیل f_{tr} و تعریف محورها..... ۱۱۱

شکل ۵-۸- محدوده بین ۰/۹ تا ۱/۱ سطح برآزش داده شده ضرایب تبدیل f_{tr}	۱۱۱
شکل ۵-۹- تفکیک محدوده ضرایب تبدیل f_{tr}	۱۱۲
شکل ۵-۱۰- کانتور تغییر مکان نمونه تحلیلی با جزء مکعبی به ابعاد ۵ میلیمتر.....	۱۱۳
شکل ۵-۱۱- کانتور تغییر مکان نمونه تحلیلی با جزء مکعبی به ابعاد ۱۰ میلیمتر.....	۱۱۵
شکل ۵-۱۲- کانتور تغییر مکان نمونه تحلیلی با جزء مکعبی به ابعاد ۲۰ میلیمتر.....	۱۱۶
شکل ۵-۱۳- نتایج تجربی عرض نوار برشی و تغییر مکان قائم نیمه فوقانی در آزمایش ماسه توپورا.....	۱۱۷
شکل ۵-۱۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی و تحلیلی برای عرض نوار برشی.....	۱۱۷
شکل ۵-۱۵- کانتور تنش‌های نمونه تحلیلی با جزء مکعبی به ابعاد ۵ میلیمتر.....	۱۱۸
شکل ۵-۱۶- کانتور تنش‌های نمونه‌های استوانه‌ای تجربی آزمایش شده روی ماسه توپورا.....	۱۱۹
شکل ۵-۱۷- تغییرات ضرایب آسیب نمونه تحلیلی با افزایش کرنش محوری در محدوده بالای نوار برشی.....	۱۲۲
شکل ۵-۱۸- تغییرات ضرایب آسیب نمونه تحلیلی با افزایش کرنش محوری در محدوده نوار برشی.....	۱۲۳
شکل ۵-۱۹- تغییرات ضرایب آسیب نمونه تحلیلی با افزایش کرنش محوری در محدوده پایین نوار برشی.....	۱۲۴
شکل ۵-۲۰- تغییرات ضرایب آسیب فشاری نمونه تحلیلی حین بارگذاری (محدوده پایین نوار برشی).....	۱۲۶
شکل ۵-۲۱- تغییرات ضرایب آسیب فشاری نمونه تحلیلی حین بارگذاری (محدوده وسط نوار برشی).....	۱۲۷
شکل ۵-۲۲- تغییرات ضرایب آسیب برشی صفحه شماره ۷.....	۱۲۸
شکل ۵-۲۳- تغییرات ضرایب آسیب برشی صفحه شماره ۱۰.....	۱۲۸
شکل ۵-۲۴- تغییرات ضرایب آسیب برشی صفحه شماره ۱۷.....	۱۲۹
شکل ۵-۲۵- تعریف زوایای چرخش دانه‌ها در صفحات مختلف.....	۱۳۰
شکل ۵-۲۶- توزیع فراوانی زوایای چرخش دانه‌ها در صفحه V.....	۱۳۱
شکل ۵-۲۷- توزیع فراوانی زوایای چرخش دانه‌ها در صفحه S.....	۱۳۲
جدول ۳-۱- کسینوس‌های هادی و ضرایب وزنه صفحات مختلف در چندوجهی ۳۴ صفحه‌ای.....	۲۹
جدول ۳-۲- خلاصه اطلاعات فراسنج‌های الگو، مفاهیم مکانیکی و روش تعیین مقدار آنها.....	۵۳
جدول ۳-۳- فراسنج‌های الگوی پیشنهادی برای ماسه-سنگ Queerxi.....	۵۹
جدول ۳-۴- فراسنج‌های الگوی پیشنهادی (آسیب و ناهمسانگردی) برای ماسه Nevada.....	۶۸
جدول ۴-۱- فراسنج‌های الگوی پیشنهادی (آسیب و ناهمسانگردی) برای ماسه Toyoura با دانسیته نسبی ۸۲٪.....	۸۷
جدول ۴-۲- خلاصه شرایط آزمایش‌های R1+0 و R2+180.....	۸۸

١- مقدمة

۱-۱- مقدمه

علوم مهندسی در حوزه‌های مختلف امروزه با مواد و مصالح متنوعی روبروست. این مواد عمدتاً دارای خواص ناهمسانگردی می‌باشند. درک صحیح از عملکرد این مصالح تحت اثر بارگذاری‌های مختلف و متنوع، نیازمند داشتن الگوی مناسب جهت تحلیل دقیق رفتار مکانیکی اینگونه مواد و مصالح می‌باشد. به عنوان مثال بدنه سدهای خاکی رفتار ناهمسانگردی از خود نشان می‌دهند چراکه جهت‌گیری دانه‌ها و ذرات خاک که در مراحل مختلف ساخت با استفاده از عبور غلتک کوبیده و متراکم شده است، حتماً متمایل به یک سمت و سوی خاص خواهند بود. در حوزه سنگ‌های رسوبی و بویژه مخازن زیرزمینی نفت و گاز که طی میلیون‌ها سال شکل گرفته‌اند؛ فشار سربار و یا فشارهای تکتونیکی صفحات زمین‌شناسی نسبت به هم باعث شکل‌گیری سنگ‌های ناهمسانگرد می‌شود. لذا هرگونه عملیات حفاری عمودی، افقی یا جهت دار، عملیات ازدیاد برداشت و شکست هیدرولیکی باید با علم و آگاهی از خواص و رفتار مکانیکی سنگ انجام گیرد. در حوزه فلزات نیز اکثر مصالح و مصنوعات فلزی، با استفاده از روش‌هایی چون آهنگری، نورد و یا اکستروژن تولید و جهت استفاده عرضه می‌شوند. باید توجه داشت که در همه‌ی این روش‌ها با وارد کردن نیرو و فشار به فلز گداخته یا سرد تغییر شکل آن اتفاق می‌افتد، لذا به تبع آن باعث تغییر جهت و آرایش کریستال‌های فلزات شده و از همه آنها انتظار رفتار ناهمسانگرد می‌رود.

با توجه به توضیحات فوق روشن است که حوزه کاربرد مصالح ناهمسانگرد دارای وسعت زیادی بوده و جهت محاسبه رفتار واقعی مواد در طبیعت و صنعت، باید از الگوهای رفتاری مرتبط با مصالح ناهمسانگرد که قادر به در نظر گرفتن ویژگی‌های آنها باشند استفاده کرد.

۱-۲- تعریف مسئله و هدف تحقیق

مواد و مصالح ناهمسانگرد دارای ویژگی‌های رفتاری متمایزی می‌باشند که در یک مطالعه دقیق، باید لحاظ گردند. در نظر نگرفتن این خصوصیات رفتاری به طور قطع باعث کاهش دقت محاسبات گردیده و اعتبار نتایج را خدشه دار می‌نماید.

این نوع مصالح، از ذرات و اجزائی تشکیل شده‌اند که در جهات مختلف هندسی دارای خصوصیات هندسی و مکانیکی متفاوتی هستند. در نتیجه این موضوع، مقاومت مکانیکی و سختی خود جسم نیز در مقیاس بزرگ دچار تغییر و تنوع در جهات مختلف می‌باشد. به علاوه در حین بارگذاری، آرایش ذرات و اجزای جسم تغییر کرده و دگرگون می‌شود. از آنجا که مقاومت جسم تابع آرایش و قرارگیری ذرات تشکیل دهنده می‌باشد، لذا در نظر گرفتن تغییرات آرایش و چیدمان ذرات در کنار هم از این حیث نیز لازم و ضروری است. همچنین در مصالح ناهمسانگرد باید توجه داشت که تنش و کرنش درشت مقیاس در یک راستا نبوده و بر خلاف مصالح همسانگرد کشسان، بردارهای آنها ناهمراستا می‌باشند.

با توجه به توضیحات فوق، وجه تمایز مصالح همسانگرد و ابعاد مسئله مورد نظر و اهمیت آن روشن گردید. در واقع موضوع مورد تحقیق در این رساله پیش‌بینی رفتار مکانیکی درشت مقیاس و ریز مقیاس و تغییرات خصوصیات مصالح ناهمسانگرد در طول مدت بارگذاری می‌باشد.

۱-۳- ضرورت تحقیق

با توجه به توضیحات دو بخش گذشته، وسعت و اهمیت مطالعه رفتار مصالح ناهمسانگرد روشن است، اما متأسفانه باید گفت که بیشتر الگوهای رفتاری پیوسته موجود قادر به در نظر گرفتن شرایط مسائل مرتبط نیستند. این الگوها با توجه به محدودیت‌هایی که دارند، قادر به پاسخگویی به تمام سوالات و نیازهای مرتبط نیستند. همچنین اضافه کردن شرایط و روابط ریاضی جدید به آنها جهت رفع مشکلات موجود، به پیچیدگی‌های ذاتی آنها می‌افزاید و الگوی ساخته شده بر این مبنا را سنگین‌تر کرده و از کارایی آن می‌کاهد. لذا ضروری است الگویی توسعه داد و ابداع کرد که ضمن حفظ سادگی و سرعت محاسبات، قادر به رفع نیازهای گفته شده در مطالعه مسائل با محیط ناهمسانگرد باشد.

۱-۴- سوالات اساسی تحقیق

در ارتباط با رفتار مصالح ناهمسانگرد، موارد اساسی زیر مطرح است که الگوی مورد نظر باید آنها را در محاسبات خود لحاظ کند و در نظر گیرد:

الف- مواردی همچون آرایش و بافت ذرات و دانه‌ها بخصوص در مصالح دانه‌ای تاثیر بسزایی در میزان و درجه ناهمسانگردی مصالح دارد و باعث بروز خواص مکانیکی مختلف در جهات مختلف می‌شود. از این رو اندازه‌گیری میزان تغییرات آرایش و بافت دانه‌ها در طول بارگذاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چراکه تاثیر مستقیم روی میزان مقاومت و شکل پذیری ماده در مراحل بعدی بارگذاری دارد. الگوهای رفتاری پیوسته رایج قادر به در نظر گرفتن تغییرات آرایش مواد و تاثیرات مربوطه در طول مسیر بارگذاری، نمی‌باشند.

ب- بعلاوه پیش‌بینی جهت گسیختگی و نوع آن نیز در الگوهای پیوسته در یک نقطه امکان‌پذیر نیست. از آنجا که الگوهای پیوسته بر اساس ثابت‌های تنش و کرنش استوار هستند که در کلیه جهات مختلف ثابت باقی می‌مانند، و در ضمن تنها شش جهت از بی‌نهایت جهات متصور در اطراف یک نقطه مادی را در نظر می‌گیرند و از تاثیر سایر جهات چشم‌پوشی می‌نمایند، بنابراین امکان پیش‌بینی جهت و نوع گسیختگی در آنها میسر نمی‌باشد.

ج- در نظر گرفتن خواص ناهمسانگردی مصالح در الگوهای رفتاری پیوسته به راحتی امکان‌پذیر نیست و نیاز به اعمال روابط ریاضی دارد که از درک فیزیکی الگوی رفتاری می‌کاهد و باعث پیچیده شدن روابط می‌شود و در نتیجه هزینه محاسباتی نتایج الگوی رفتاری نیز افزایش می‌یابد.

د- همانطور که گفته شد الگوهای پیوسته بر اساس ثابت‌های تنش و کرنش استوار هستند لذا نسبت به چرخش جهات تنش و کرنش حساسیتی نداشته و قادر به پیش‌بینی تغییر شکل‌ها و تغییرات رفتاری ماده ناشی از چرخش محورهای اصلی تنش و کرنش، نیستند.

۱-۵- نوآوری تحقیق

جهت رفع کاستی‌های فوق و پیدا کردن راه حلی برای آنها، الگوی رفتاری جدیدی در این رساله توسعه داده شده و معرفی گشته است. با توجه به قابلیت‌های مورد نیاز، الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای^۱ بعنوان پایه و اساس الگوی جدید در نظر گرفته شده است. این الگو قادر به در نظر گرفتن هر تعداد صفحه دلخواه اطراف یک نقطه مادی می‌باشد. لذا با توجه به دقت مورد نیاز در حل مسئله و حساسیت آن می‌توان تعداد صفحات اطراف نقطه را کم یا زیاد نمود. همچنین جهت افزایش کارایی الگوی پیشنهادی، نوآوری‌هایی نیز انجام شده و اصلاحاتی در الگوهای قبلی صورت گرفته است که در ادامه به اختصار توضیح داده شده و در فصل‌های آتی جزئیات آنها به تفصیل شرح داده می‌شود:

الف- جهت در نظر گرفتن خواص ناهمسانگردی مصالح و تغییرات مقاومت ماده در جهات مختلف ایده بیضی‌گون‌های ضرایب سختی قائم و برشی ابداع و ارائه شده است. به جهت ساده سازی موضوع و برقرار کردن یک قانون ساده و یکسان در تمام صفحات، مقاومت ماده توسط بیضی‌گون‌هایی تعریف می‌شود. این بیضی‌گون‌ها وظیفه محاسبه مقاومت‌های برشی و قائم ماده در جهات مختلف بر اساس یک قانون ساده را بر عهده دارند.

ب- قانونی که تغییر شکل‌های بیضی‌گون‌های معرفی شده و به خصوص بیضی‌گون مقاومت برشی را اصلاح می‌کند نیز از ابداعات و نوآوری‌های این تحقیق می‌باشد که بر اساس مشاهدات تجربی و آزمایشگاهی و با کمک روابط آسیب بنا شده است. مطابق این قانون بیضی‌گون‌های اولیه دچار تغییر شکل و حتی چرخش در محورهای اصلی می‌گردند که زوال مقاومتی ماده را طی بارگذاری نشان می‌دهد. روند این تغییر شکل و چرخش محورها منطبق بر تغییر آرایش ذرات مصالح خواهند بود. لذا پس از محاسبه شکل جدید بیضی‌گون‌ها در هر مرحله از بارگذاری، می‌توان آرایش جدید دانه‌ها و اجزاء مصالح اعم از نحوه چیدمان و راستای قرارگیری، را نیز پیش‌بینی کرد.

ج- در مصالح ناهمسانگرد معمولاً بردار افزایش تنش و کرنش بر هم منطبق نیستند و با هم زاویه می‌سازند. جهت در نظر گرفتن ناهمراستایی تنش و کرنش^۲، به جای استفاده از بردار منتج تنش و کرنش روی صفحات، برای اولین بار از مفهومی به نام میدان تنش و کرنش برشی استفاده شده است که باعث ایجاد امکان محاسبه عدم انطباق بین تنش و کرنش برشی روی صفحات می‌گردد و در نهایت منجر به محاسبه و لحاظ کردن عدم انطباق تنش و کرنش در نقطه خواهد شد. به عبارت دیگر به جای

1 Multi-Laminate Model

2 Non-Coaxiality

اینکه تنش برشی روی صفحات به طور مستقیم از تصویر تانسور کرنش صفحه بدست آید، از میدان برداری کرنش برشی که روی صفحه بوجود آمده است محاسبه می‌گردد. به این ترتیب به علت یکسان نبودن سختی جسم در جهات مختلف صفحه، برآیند بردار تنش و کرنش در هر صفحه بر یکدیگر منطبق نبوده و در نتیجه برآیند آنها در نقطه نیز بر هم منطبق نخواهد بود و با واقعیت تطابق بیشتری خواهد داشت.

د- توابع آسیب مورد استفاده برای برش، در این تحقیق طوری در نظر گرفته شده است که علاوه بر مقاومت اصطکاکی ذرات و دانه‌های ماده، مقاومت ناشی از چسبندگی را نیز در محاسبات در نظر گیرد. شایان ذکر است روابط این تابع طوری تنظیم شده است که در طول بارگذاری، تغییرات ظرفیت هر یک از این انواع مقاومت برشی نیز لحاظ گردد.

ه- همچنین جهت در نظر گرفتن بهتر رفتار تناوبی تنش-کرنش برشی، به جای استفاده از روش‌های قبلی ارائه شده در مقالات، از روشی جدید استفاده شده است که بدون اضافه کردن فراسنج جدید به الگو، قادر به در نظر گرفتن اکثر خصوصیات رفتاری تناوبی برشی مصالح می‌باشد. در این روش جدید با استفاده از دو محور کمکی جدید، رفتار تناوبی تنش و کرنش برشی به خوبی در محاسبات گنجانیده می‌شود. به این ترتیب برخلاف الگوهای قبلی، اثر ترمیمی تغییر شکل‌های برشی ماده بر روی مقاومت برشی نیز لحاظ می‌گردد.

۱-۶- ساختار تحقیق

در فصل دوم این رساله تاریخچه الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای و روند تکامل آنها که به عنوان چارچوب توسعه الگو در نظر گرفته شده است؛ توضیح داده شده است. همچنین توضیح مختصری در خصوص اصول مشترک الگوهای قبلی ارائه شده است. در ادامه این فصل نیز به تاریخچه و اصول و روابط نظریه آسیب و فرایند و نحوه عملکرد آن پرداخته شده است.

در فصل سوم الگوی چند صفحه‌ای پیشنهادی و روابط آن به تفصیل شرح و ارائه شده است. بیضی‌گون‌های مقاومت برشی و قائم و توابع آسیب به کار رفته نیز در همین فصل معرفی و توضیح داده شده‌اند. قواعد حاکم بر تغییرات شکل و راستای بیضی‌گون‌ها هم در این فصل بسط و گسترش داده شده است. در ادامه فصل، فراسنج‌های مورد استفاده در الگو به روش واسنجی نتایج نظری و تجربی پیدا شده‌اند. در انتهای فصل نیز، الگوی ارائه شده مورد راستی آزمایی قرار گرفته است و نتایج پیش‌بینی آن با مشاهدات تجربی مقایسه گردیده است.

فصل چهارم به تکمیل الگوی ارائه شده در فصل قبل اختصاص دارد. در ابتدا به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار تناوبی تنش-کرنش مصالح دانه‌ای، اصلاحاتی در نحوه محاسبه ضرایب آسیب برشی در بارگذاری تناوبی انجام شده است. جهت در نظر گرفتن ناهمراستایی تنش و کرنش، اصلاحاتی نیز در نحوه محاسبه تنش ریز مقیاس از روی کرنش ریز مقیاس صورت گرفته است. و محاسبات تنش با

استفاده از مفهوم میدان بردارهای تنش و کرنش بسط داده شده‌اند. به این ترتیب امکان محاسبه ناهمراستایی در سطح صفحات نیز ممکن گردیده که منتج به ناهمراستایی تنش و کرنش درشت مقیاس می‌گردد. در انتهای این فصل نیز جهت صحت‌سنجی فرضیات به کار رفته، مقایسه‌ای بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی صورت گرفته است.

جهت بکارگیری الگوی پیشنهادی در حل مسائل بزرگ، لازم است که این الگوی رفتاری در یک برنامه تحلیلی قدرتمند اجزاء محدود جایگذاری گردد. این مهم در فصل پنجم رساله انجام شده است. نرم افزار اجزاء محدود مورد استفاده در این رساله، Opensees می‌باشد. به دلیل اینکه کدهای مورد استفاده در این نرم‌افزار به رایگان در دسترس عموم قرار دارد، دارای قابلیت‌های مناسبی جهت اضافه کردن و معرفی الگوی رفتاری به مجموعه نرم‌افزار می‌باشد. پس از انجام مراحل کد نویسی و معرفی الگوی رفتاری به Opensees، نوبت به انجام صحت سنجی عملکرد برنامه با الگوی جدید می‌رسد. در این مرحله، یک نمونه از آزمایش‌های انجام شده روی یک نوع ماسه ناهمسانگرد که تا مرحله ایجاد نوار برشی بارگذاری شده، مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج بارگذاری، تغییر شکل‌ها، تاثیرات اندازه اجزاء، و تغییرات صورت گرفته در آرایش دانه‌های ماسه مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲-تاریخچه الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای و نظریه آسیب

از آنجا که الگوی رفتاری توسعه یافته برای مصالح مورد استفاده در مطالعه حاضر ترکیبی از الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای^۱ و نظریه آسیب^۲ می‌باشد، فصل حاضر به بیانی کوتاه از نظریه‌های یاد شده اختصاص یافته است.

۲-۱- الگوهای رفتاری چند صفحه‌ای

با مطالعه‌ای روی مقالات علمی مرتبط با موضوع الگوسازی رفتاری مواد زمین‌ساختی، می‌توان دریافت که الگوهای رفتاری مواد یاد شده به دو گروه عمده قابل تقسیم هستند: الگوهای پیوسته^۳ و الگوهای گسسته^۴.

در الگوهای پیوسته فرض بر این است که جسم به صورت یکپارچه بوده و وجود هرگونه ناپیوستگی اعم از ترک، گسیختگی، جدایش و یا شکست در آن مجاز نیست. از سوی دیگر در الگوهای گسسته، جسم بصورت مجموعه‌ای سرهم بندی شده از ذراتی در نظر گرفته می‌شود که می‌توانند روی حرکت یکدیگر مؤثر باشند.

الگوهای پیوسته به نوبه خود به دو زیرگروه عمده تقسیم می‌شوند: الگوهای درشت مقیاس^۵ که بر اساس نظریه پلاستیسیته و یا آسیب و یا ترکیبی از هر دو بنا می‌شوند و الگوهای متوسط مقیاس^۶ نظیر الگوهای ریز صفحات^۷ و یا الگوهای چند صفحه‌ای [۱].

در الگوهای درشت مقیاس، رفتار جسم بر اساس تعریف ارتباط مستقیم میان تانسورهای تنش و کرنش (مقیاس متداول ساختمانی) سازماندهی می‌شود حال آنکه در الگوهای متوسط مقیاس رفتار ماده مبتنی بر تعریف این ارتباط به نحوی غیرمستقیم است، به این صورت که به جای تعریف ارتباط میان تانسورهای تنش و کرنش، ارتباط میان بردارهای تنش و کرنش روی صفحاتی با جهات از پیش تعیین شده تعریف می‌شوند که در مقالات علمی به ریز صفحات یا چند صفحه‌ای مشهور هستند.

الگوهای گسسته رفتار جسم را بر اساس تعریف نیروهای بین ذره‌ای در اثر تأثیر حرکتی آنها بر روی یکدیگر و سپس جاگذاری این نیروها در معادلات حرکت و حل آنها به کمک تکنیک عددی اجزای گسسته^۸ شبیه سازی می‌کنند.

تا کنون الگوهای پیوسته و گسسته بسیاری توسط محققین جهت پیش‌بینی رفتار مواد شبه زمینی و مواد زمین‌ساختی توسعه یافته‌اند. در این میان الگوهای ریزمقیاس گسسته به دلیل نوع پرداخت

1 Multi-laminate Models

2 Damage Theory

3 Continuous Models

4 Discontinuous Models

5 Macroscopic Models

6 Mesoscopic Models

7 Micro-plane Models

8 Discrete Element Method

موشکافانه و نزدیک به واقعیت رفتار مواد فوق‌الذکر، بهتر از سایر الگوهای یاد شده توانایی بازسازی رفتار پدیده‌هایی چون تمرکز موضعی تنش^۱ را در اینگونه مواد دارند اما برای مقاصد معمول مهندسی که همه روزه مهندسان با آن سر و کار دارند قدری دشوار و پیچیده و پر هزینه به نظر می‌رسد. در نقطه مقابل الگوهای ریز مقیاس گسسته، الگوهای درشت مقیاس مبتنی بر نامتغیرهای تنش یا کرنش^۲ از شبیه سازی بسیاری از ویژگی‌های رفتاری مواد یاد شده که وابسته به جهت هستند عاجزند زیرا ذخیره سازی اطلاعات وابسته به جهت اساساً توسط اینگونه الگوها غیرممکن است. بنابراین در چنین شرایطی به نظر می‌رسد استفاده از الگوهای متوسط مقیاس راه حلی منطقی و میانه بین دو دسته الگوهای یاد شده باشد. با عنایت به آنچه در این بخش از نظر گذشت، تلاش مطالعه حاضر به توسعه الگوی رفتاری چند صفحه‌ای از دسته الگوهای متوسط مقیاس برای شبیه سازی رفتار مواد و مصالح زمین ساختی، معطوف خواهد بود.

پیشینه موضوعی الگوی چند صفحه‌ای که در مرجع [۲] به تفصیل به آن اشاره شده است، به ایده ابتکاری آقای G. I. Taylor در سال ۱۹۳۸ باز می‌گردد. زمانی که ایشان مشغول مطالعه رفتار خمیری فلزات کریستالی بود [۳]، برای اولین بار ساختار رفتاری فلزات کریستالی را با تعریف ارتباط میان بردارهای تنش و کرنش روی صفحات با جهات گوناگون و سپس دستیابی به تانسورهای تنش و کرنش از طریق برابری میان بردارهای یاد شده تحت قید استاتیکی^۳ بدست آورد. ایده وی حدود یازده سال بعد یعنی سال ۱۹۴۹ میلادی توسط آقایان Batdorf و Budiansky با جزئیات بیشتری مطرح شد تحت نام "نظریه خمیری برشی"^۴ مشهور گشت [۴]. بعد از گذشت مدت کوتاهی این نظریه به عنوان ابزار قدرتمندی جهت شبیه سازی رفتار فلزات خمیری سخت شونده شناخته شد. نظریه خمیری برشی در خلال تحقیقات دانشمندانی چون Lin و Ito (۱۹۶۵) [۵]، Kröner (۱۹۶۱) [۶]، Budiansky و Wu (۱۹۶۲) [۷]، Hill (۱۹۶۵) [۸]، و Rice (۱۹۷۰) [۹] اصلاح گردید. در تمام کارهای انجام شده فرض بر این بود که روی ریز صفحات در جهات مختلف، فقط کرنش‌های غیرخطی برشی روی دهد و از کرنش‌های غیرخطی عمود بر صفحات اثری نباشد. بعدها این نظریه طی انجام اصلاحاتی تحت عنوان روش "چند صفحه‌ای" توسط محققینی همچون Zienkiewicz و Pande (۱۹۷۷) [۱۰]، Pande و Sharma (۱۹۸۳) [۱۱]، جهت شبیه سازی رفتار سنگ‌های ناهمسانگرد و صدرنژاد (۲۰۰۳) [۱۲] جهت شبیه سازی رفتار ماسه ناهمسانگرد مورد استفاده قرار گرفت.

در همه الگوهای رفتاری فوق، چنین فرض شده است که صفحاتی که لغزش برشی خمیری روی آنها اتفاق می‌افتد و در الگوهای یاد شده "صفحات لغزش" نامیده شده و در متن این رساله "صفحه" خوانده می‌شوند در اصطلاح علمی به شکل استاتیکی به هم وابسته هستند به عبارت دیگر بردار تنش

1 Stress localization

2 Stress or Strain Invariants

3 Static Constraint

4 Slip Theory of Plasticity

روی صفحات تصویر تانسور تنش درشت مقیاس هستند. همچنین در الگوهای فوق، کرنش‌های خطی ریز^۱ مقیاس روی صفحات در محاسبات وارد نشده و به شکل جداگانه در مقیاس درشت به تانسور کرنش‌های غیر خطی اضافه می‌شوند. شبیه سازی رفتار نرم شوندگی کرنش^۲ در مطالعات یاد شده فوق مد نظر نبوده است هرچند که در صورت توجه هم، این رفتار بوسیله الگوهای ذکر شده قابل شبیه سازی نیست [۱۳]. علت آنست که قید استاتیکی^۳ که در الگوهای فوق بین تانسور تنش و تنش صفحات در نظر گرفته شده است، سبب می‌شود تا در صورت تعریف قانون نرم شوندگی کرنش روی صفحات، رفتار ماده در مقیاس درشت ناپایدار گردد [۱۳].

جهت تعمیم الگوهای خمیری برشی به حالت غیر کشسان، به طوری که الگوی رفتاری توانایی در نظر گرفتن خرابی‌های عمود بر صفحه مانند ترک را نیز داشته باشد، واژه "صفحات لغزش" مناسب به نظر نمی‌رسید که آقای Bažant واژه "ریز صفحه" را جایگزین آن نمود [۱۴ش]. "ریز صفحه" به صفحه‌ای اطلاق می‌شود که دارای جهاتی از پیش تعریف شده باشد و روی آن روابط ساختاری تنش و کرنش بین بردارهای تنش و کرنش نوشته شود. در این الگوها بر خلاف الگوهای پیوسته که روابط ساختاری بین ثوابت تانسوری تنش و کرنش درشت مقیاس نوشته می‌شوند؛ روابط بین بردارهای تنش و کرنش غیر کشسان روی صفحات نوشته می‌شود. ریز صفحاتی که این روابط برای آنها نوشته می‌شوند امکان در نظر گرفتن اثراتی چون ترک‌ها و لغزش‌های میکروسکوپی را فراهم می‌کنند. لذا استفاده از پیشوند "ریز" برای این صفحات ارتباط مفهومی با کاربرد آنها می‌تواند داشته باشد. در الگوهای پیوسته درشت مقیاس ارتباط بین I_1 و J_2 نمایشگر اصطکاک داخلی خواهد بود اما در واقعیت اصطکاک تنها روی صفحات امکان‌پذیر می‌باشد که این کار فقط از عهده الگوهای مبتنی بر بردار تنش و کرنش صفحات ساخته است. در الگوهای ارائه شده توسط آقای Bažant، بجای استفاده از قید استاتیکی از قید حرکتی استفاده شده است بدین معنا که بردار کرنش روی ریز صفحات، در واقع تصویر تانسور کرنش روی آنها هستند.

همانطور که گفته شد حوالی سال ۱۹۸۰ مشخص شد که الگوهای Taylor و خمیری برشی در شبیه سازی رفتار نرم شوندگی دچار مشکل و ناپایداری می‌شوند. این مشکل از تمرکز کرنش در یک صفحه خاص و اضافه شدن کرنش‌های کشسانی درشت مقیاس ناشی می‌شود. این مشکل بین سالهای ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۵ توسط Bažant و همکاران او برطرف گردید [۱۴ش و ۱۵ش و ۱۶ش]. آنها سه تغییر عمده را در روابط الگوهای قبلی اعمال نمودند تا عیوب آنها برطرف گردد:

الف) استفاده از قید حرکتی به جای قید استاتیکی

1 Microscopic
2 Strain Softening
3 Static Constraint

ب) استفاده از اصل کار مجازی جهت محاسبه تانسور تنش درشت مقیاس پیوسته به جای استفاده از روی هم گذاری بردارهای تنش

ج) کلیه کرنش‌ها اعم از کرنش‌های کشسان و غیر کشسان همگی روی صفحات تصویر می‌شوند و در روابط ساختاری صفحات دخالت داده می‌شوند. این در حالیست که در الگوهای قبلی کرنش‌های کشسان فقط در مقیاس درشت در محاسبات دخالت داده می‌شدند.

با استفاده از اصل کار مجازی، مقادیر مولفه‌های تانسور تنش درشت مقیاس به صورت انتگرالگیری روی یک نیمکره به شعاع واحد محاسبه می‌شود. بردارهای نرمال این نیمکره همان جهات ممکن مختلف ریز صفحات مماس بر آن می‌باشد. اما در محاسبات عددی انتگرالگیری روی این نیمکره همانند روش گاوس انجام خواهد شد. در این روش تقریبی، جمع وزنی مقادیر بردارهای تنش روی صفحاتی با جهات معین با ضرایب وزنه مشخص شده محاسبه می‌شود. با افزایش تعداد صفحات دقت محاسبات بالاتر خواهد رفت.

از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۳ الگوهای مختلفی توسط آقای Bažant و همکاران او تحت عنوان $M1^0$ و $M1$... تا $M7$ ارائه شده‌اند. این الگوها به مرور توسعه یافته و بهبود یافته‌اند به طوریکه امروزه قادر هستند تا رفتار بسیاری از مصالح زمین ساختی را شبیه‌سازی کنند. در الگوی $M1^0$ سطوح بارگذاری برای مولفه‌های قائم و برشی هر صفحه تعریف و به کار گرفته شد. اما به زودی معلوم شد که مورد نیاز نبوده و تنها باعث پیچیده شدن الگو می‌گردد. الگوی $M1$ [۱۵ش و ۱۶ش] تنها اختصاص به ترک خوردگی کششی مصالح داشت. الگوهای $M2$ تا $M6$ قادر بودند تا رفتار غیر کشسان را در فشار شبیه‌سازی نمایند. به خصوص آنها قادر بودند تا بین حالت‌های وجود یا فقدان تنش محیطی که باعث ایجاد تفاوت در رفتار نرم شوندگی کرنشی در بارگذاری فشاری می‌گردند؛ تمایز قائل شوند. این مهم در الگوی $M2$ ، با جدا کردن کرنش‌های حجمی و انحرافی انجام شد [۱۷ش و ۱۸ش]. در الگوهای $M3$ و $M4$ نیز علاوه بر جدا کردن بخش‌های حجمی و انحرافی تانسور کرنش، حدود مقاومتی متفاوتی برای هر یک از بخش‌های بردار کرنش قائم بر صفحه در نظر گرفته شد [۲ و ۱۹ش و ۲۰ش].

اما جداسازی بخش‌های حجمی و انحرافی کرنش هم مسائل جدیدی به وجود می‌آورد. افزایش بیش از اندازه کرنش جانبی و برخی اختلالات دیگر در محاسبه مقادیر تنش‌ها پس از ناحیه نرم شوندگی در بارگذاری‌های کششی تک محوره و بارگذاری و باربرداری‌های غیر واقعی در صفحات از عوارض جداسازی بخش‌های حجمی و انحرافی کرنش‌ها در این الگوها بود. کرنش بیش از اندازه جانبی و اختلالات محاسباتی تنش تا حدودی در الگوی $M5$ ، برطرف گردید [۲۱ش و ۲۲ش]. در این الگو رفتارهای کشش و فشار متفاوتی برای کرنش‌های هر صفحه در نظر گرفته شد. در الگوی $M6$ این جداسازی رفتاری کشش و فشار به صورت پیوسته انجام می‌شد [۲۳ش]. به طوریکه به محض بروز عوارض ناخواسته، این جداسازی متوقف می‌شد که البته باعث افزایش حجم محاسبات در مقیاس بزرگ

می‌گردید و تناوب‌های بارگذاری و باربرداری را زیادتر کرده و همزمان در جهات مختلف باعث بروز رخداد نرم شوندگی کششی و فشاری می‌شد.

پس از جداسازی بخش‌های حجمی و انحرافی کرنش‌های ریز صفحات، به نظر می‌رسید که اعمال روابط تعادلی جداگانه بین مقیاس‌های درشت و ریز برای بخش‌های حجمی و انحرافی تنش‌ها در الگوی M4 مناسب و مطلوب باشد. اما اعمال و الزام این فرضیه غیر ضروری باعث شد تا برآیند تنش‌های انحرافی ریز صفحات در مقیاس درشت، برابر صفر نشده که باید با اضافه کردن یک حلقه تکراری سعی و خطا این نقیصه نیز جبران می‌گردید. عدم جداسازی بخش‌های مختلف کرنش روی الگوی M2، نیز توسط برخی محققین مجدداً مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت که البته نتایج چندان مطلوبی نسبت به الگوهای M3 و M4 حاصل نگردید [۲۴ش و ۲۵ش].

ضعف‌های فوق در الگوی M7 تا حدودی جبران گردید. اختلاف اصلی این الگو با نیاکان خود این بود که در محدوده بارگذاری کشسان و بارگذاری کششی جداسازی حجمی-انحرافی کرنش‌ها انجام نمی‌شد اما برای بارگذاری فشاری و انحرافی صفحات این جداسازی انجام می‌شود و در نهایت برای مقایسه با مقدار کلی تنش در مقیاس درشت با تنش بقیه صفحات جمع می‌شود [۲۶ش].

در سال‌های اخیر نیز کاربردهایی از الگوهای چند صفحه‌ای در علوم مختلف به چشم می‌خورد. به عنوان مثال آقای M. Salviato و همکاران او الگوی چند صفحه‌ای را در مطالعه مصالح نیمه ترد کامپوزیت به کار برده‌اند [۲۷ش]. در این تحقیق تانسور سختی جسم به صورت طیفی تجزیه شده و به مالگو معرفی شده است تا مودهای متعامد کرنش صفحات به دست آیند. این مودها در واقع هرکدام مربوط به یک رابطه ساختاری و یک نوع پاسخ مصالح در مقیاس ریز می‌باشد. روابط ساختاری وابسته به کرنش ریز صفحات طوری تعریف شده‌اند که مقادیر ویژه تنش‌ها و کرنش‌های صفحات را به تانسور درشت مقیاس مربوط سازند. به این ترتیب بسیاری از خواص این گونه مصالح مانند پیدایش ترک‌ها و اتصال آنها به یکدیگر و جدایش و بیرون آمدن یک رشته از داخل بافت مصالح به خوبی شبیه‌سازی شده است [۲۷ش و ۲۸ش].

با توجه به توضیحات فوق مشخص است که روند توسعه الگوهای چندصفحه‌ای روندی طولانی مدت بوده که به مرور زمان در حال بهبود کارایی بوده است. مشاهده می‌شود که در الگوهای گذشته تا کنون رفتار مصالح ناهمسانگرد و تغییرات آرایش و مقاومت آنها در خلال بارگذاری و در جهات مختلف هندسی و همچنین اثرات ناهمراستایی تنش و کرنش مورد مطالعه و توجه قرار نگرفته است که موضوع مطالعه این تحقیق می‌باشد. توضیح داده شده که آقای Bažant و همکاران او در طول بیش از سه دهه اخیر، اصلاحاتی در جهت رفع کاستی‌های الگوهای رفتاری گذشته انجام داده‌اند که در کلیه سری الگوهای اخیر مشترک و ثابت باقی مانده است. به این ترتیب این سری الگوها قادر خواهند بود تا بتوانند نرم شوندگی کرنش، تغییرات حجمی غیرخطی و به خصوص تورم ناشی از برش را نیز شبیه سازی نمایند. اهم موارد اصلاح شده به شرح زیر می‌باشد:

الف) در سری الگوهای جدید، به جای قید استاتیکی از قید حرکتی^۱ استفاده شد. زیرا وجود قید استاتیکی میان مقیاس درشت و ریز سبب ایجاد ناپایداری عددی در ناحیه پس از نقطه تنش بیشینه یعنی ناحیه نرم شوندگی کرنش می‌گردد. در حالت قید حرکتی به جای آنکه تانسور تنش درشت مقیاس روی صفحات تصویر شود، تانسور کرنش تصویر می‌شود.

ب) در نتیجه استفاده از قید حرکتی می‌بایست کرنش‌های خطی در مقیاس ریز یعنی روی صفحات جهات مختلف، در نظر گرفته شود، یعنی برخلاف قید استاتیکی که در آن کرنش‌های خطی فقط در مقیاس درشت وارد شده و بصورت جداگانه به کرنش‌های غیر خطی اضافه می‌شوند.

ج) در این سری الگوها که قید حرکتی در آنها استفاده می‌شود، تانسور تنش درشت مقیاس با استفاده از قانون کار مجازی از روی بردارهای تنش روی صفحات که در جهات گوناگون قرار دارند بدست می‌آید. برخلاف الگوهای قبلی مبتنی بر قید استاتیکی که تانسور کرنش غیرخطی درشت مقیاس با برآیندگیری ساده از بردارهای کرنش غیر خطی صفحات بدست می‌آمد. با بکارگیری قانون کار مجازی، اصل تعادل به اجبار ارضاء می‌گردد و اصل همسازی کرنش‌ها هم به دلیل استفاده از قید حرکتی (تصویر کردن تانسور کرنش روی صفحات جهت محاسبه کرنش صفحات) از ابتدا برقرار بوده است. لازم به ذکر است که در الگوهای اولیه با وجود اینکه اصل تعادل به دلیل به کارگیری قید استاتیکی برقرار بوده است؛ اما مسئله همسازی کرنش‌ها در هاله‌ای از ابهام قرار داشت.

د) بر خلاف الگوهای اولیه که در آنها فقط کرنش‌های برشی غیرخطی روی صفحات در نظر گرفته می‌شد، در الگوهای جدید کرنش‌های غیر خطی عمود بر صفحات نیز در محاسبات وارد شده و لذا آن را قادر می‌سازد تا علاوه بر شبیه سازی رفتار خمیری اثرات توزیع ترک‌های کششی در جهات گوناگون را در تحلیل وارد نماید.

ه) در نمونه‌های اولیه از این سری الگوها، روی هر یک از صفحات یک قانون ساختاری دو بعدی غیرخطی در نظر گرفته می‌شد که در آن با استفاده از یک تابع تسلیم و یک سطح پتانسیل با یک قانون جریان غیر همراه، مؤلفه‌های کرنش عمود و برشی هر صفحه به یکدیگر ارتباط پیدا می‌کردند. استفاده از یک تابع تسلیم برای هر صفحه در الگوهای اولیه، سبب پیچیدگی بی‌مورد در کار تعیین فراسنج‌های الگوی رفتاری در عملیات واسنجی^۲ می‌شد و این مسئله با فلسفه ساده سازی روش چند صفحه‌ای منافات داشت. از همین رو این موضوع سبب شد تا در الگوهای پیشنهاد شده بعدی، روش توابع تسلیم و سطح پتانسیل کنار گذاشته شود و میان کرنش‌ها و تنش‌های نظیر یعنی کرنش عمود و تنش عمود بر صفحه باهم و کرنش و تنش مماس بر صفحه نیز باهم، روابط جداگانه‌ای تعریف شده است. با این روش یعنی ارتباط ساختاری یک به یک روی ریز صفحات، می‌توان، تمام اثرات متقابل^۳ (اندرکرنش

1 Kinematic Constraint

2 Calibration

3 Cross effects

برش- فشار یا برش-کشش) در مقیاس درشت نظیر اتساع^۱ را به صورت ذاتی تولید نمود و این امر به دلیل اثرات متقابل صفحات در جهات گوناگون روی یکدیگر است [۱۹].

۲-۲- الگوهای آسیب

نظریه آسیب پیوسته، یک نظریه ساختاری است که جهت توصیف زوال مقاومتی مصالح در نتیجه پیدایش، رشد و انتشار ترکها در مقیاس ریز به کار می‌رود. منبع اولیه ترکهای ریز در مصالح می‌تواند در اثر از دست رفتن آب در سنگهای رسوبی و بتن، انبساط و انقباض حرارتی و یا نواقص اولیه حین تشکیل بافت کریستالی جسم باشد. در مصالح دانه‌ای نیز در حین پیشرفت بارگذاری، نقاط اتصال و اتکای دانه‌ها شروع به لغزش و غلتش کرده و باعث می‌شود بافت اولیه ماسه یا خاک به هم ریخته و دچار ضعف در باربری شود. در حقیقت در نتیجه انتشار ترکها در مقیاس ریز، سختی^۲ و مقاومت^۳ مصالح در مقیاس درشت (مهندسی) دچار نقصان می‌شود. این نظریه نخستین بار توسط آقای Kachanov در مورد پدیده خزش به کار گرفته شد [۲۹ و ۳۰]. کاهش سختی قائم و برشی مصالح نسبت به افزایش کرنش، توسط مشاهدات تجربی فراوانی تایید شده است. این مشاهدات روند کاهش سختی "S" شکلی را نشان می‌دهند که در فصل آینده به آن پرداخته شده است.

الگوهای آسیب در حالت عمومی مجهز به متغیرهای درونی^۴ هستند که چگالی و جهت ترکها را کنترل می‌کنند. ساده‌ترین نوع الگوهای آسیب، الگوی آسیب همسانگرد^۵ است که در آن تانسور سختی آسیب دیده مساوی حاصلضرب عدد اسکالر در تانسور سختی کشسان اولیه است. سادگی این الگو از نقاط قوت آن است. الگوهای آسیب ناهمسانگرد برای نمایش متغیر آسیب از خانواده بردارها [۳۱] یا تانسورهای مرتبه دو [۳۰] و یا تانسورهای مرتبه چهارم استفاده می‌کنند. در این تحقیق جهت سادگی از الگوهای آسیب همسانگرد استفاده شده است و ناهمسانگردی مصالح از طریق تغییر سختی در صفحات جهات مختلف لحاظ شده است.

در الگوی آسیب مورد استفاده در این تحقیق، روند خرابی و آسیب وارده به جسم، تابعی از میزان کرنش عمود یا برشی صفحات مختلف در نظر گرفته شده است. در این الگو رابطه ساختاری تنش و کرنش به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma = (1 - \omega) D_e \varepsilon, \quad \omega = g(\varepsilon) \quad (1-2)$$

در رابطه فوق σ مقدار بردار تنش روی صفحه، ε مقدار بردار کرنش روی صفحه، D_e ضریب کشسانی اولیه (برشی یا عمودی) و ω تابع آسیب می‌باشد. تغییرات تابع آسیب ω در ضمن رشد و

1 Dilatancy

2 Stiffness

3 Strength

4 Internal Variables

5 Isotropic Damage Model

انتشار ترک‌ها بین صفر تا حداکثر مقدار واحد تغییر می‌کند و باید بوسیله یک رابطه مناسب بیان شود. معمولترین نوع رابطه، رابطه‌ای است که تابع آسیب w را به شکل مستقیم بر اساس متغیر کرنش موجود در صفحات مختلف تعریف نماید. با توجه به مفهوم توابع آسیب، می‌توان آنها را به انواع و اشکال مختلف از قبیل خطی، چند جمله‌ای^۱ و مثلثاتی یا ترکیبی از آنها تعریف نمود مشروط بر اینکه محدوده تغییرات آن بین مقادیر صفر و یک قرار گیرد. مقادیر همه این توابع طبق تعریف بین صفر برای حالت ارتجاعی کامل و حداکثر مقدار واحد برای خرابی کامل متغیر است. در این رساله به جهت نیاز به فراسنج‌های کمتر و سهولت استفاده، از نوع توابع نمایی استفاده شده است.

¹ Polynomial

۳- معرفی الگوی چند صفحه‌ای پیشنهادی و واسنجی آن