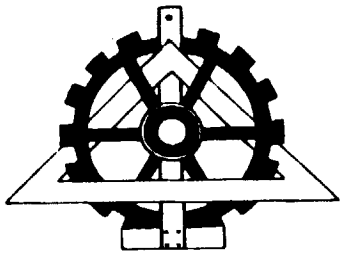
٣٨٢٣٤



دانشگاه تهران

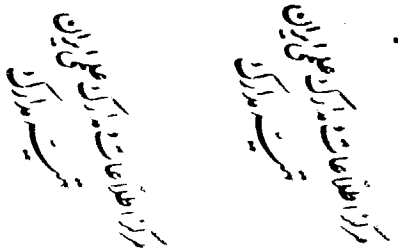
دانشکده فنی

۱۳۸۰ /۸/ ۱۰

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی عمران

گرایش سازه



تحلیل دینامیکی گسترش ترک خوردگی سازه‌ها به روش ترکیبی اجزاء محدود و المانهای مجزا

(Combined Finite/Discrete Element Method)

015032

۳۸۲۳۴

استاد راهنما : دکتر سهیل محمدی

نگارش : امیر حسین جواهری

تابستان ۱۳۸۰

۳۸۲۳۴

موضوع

تحلیل دینامیکی گسترش ترک خوردگی سازه‌ها به روش ترکیبی اجزاء محدود و المانهای مجزا

توسط

۱۳۸۰ /۸/ ۱۰

امیرحسین جواهری کچوسنگی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی عمران ، گرایش سازه

از این پایان نامه در تاریخ ۱۰ / ۷ / ۱۳۸۰ در مقابل هیأت داوران دفاع به‌عمل آمده و مورد تصویب قرارگرفت.

محل امضاء

سرپرست کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده : .....

مدیر گروه آموزشی: .....

نماینده تحصیلات تکمیلی گروه : .....

استاد راهنما : .....

عضو هیأت داوران : .....

عضو هیأت داوران : .....

تقدیم به پدرعزیزومادرگرامیم

به پاس

لحظات سرشار ازمهرشان

سخنان امید بخششان

کمکهای بی‌دریغشان

وصبر و شکیبایشان

﴿ به کسی که به شما نیکی می کند پاداش دهید و اگر نمی توانید تشکر کنید که تشکر و سپاس خود نوعی پاداش است. ﴾

رسول اکرم (ﷺ)

با تشکر صمیمانه از

استادگرامی جناب آقای دکتر محمدی

به خاطر راهنماییهای ارزنده و زحمات فراوانشان

چکیـــده

در این پایان‌نامه ،درمحیط دوبعدی برای مـدلسازی گسترش ترک در اثر بار ضربه‌ای از روش ترکیبی اجزاء محدود و المانهای مجزا استفاده شده است.کاربرد روش ترکیبی اجزاء محدود و المانهای مجزا بـرای مـدلسازی گسترش تـرک ، روشی جدید است و در مقـایسه بـا مـدلسازی عددی مـوجود از پیشرفتهای بارزی برخوردار است .

روش قدیمی برای شبیه‌سازی توزیع تنش ، تکنیکهای اجزاءمحدود است .هرچند، این روش براساس مکانیک‌محیط‌پیوسته می‌بـاشد و بـرای مسائل گسترش تـرک منـاسب نیست . بر ایـن اساس ، روش المانهای‌مجزا برای حل مسائلی که در رفتار مادی و هندسی خود ناپیوستگی دارند، طراحی‌شده‌است . در این روش، منطقه احتمالی شکست بااستفاده از مش المان‌مجزا مدل می‌شودوباقیمانده سازه توسط مش اجزاءمحدود مدل می‌شود . یک مـش ترکیبی مارا از ردیابی تماس و محاسبات اندرکنش تماسی غیر لازم نجـات میدهد . که این دو قسمت ، بخش اعظم هزینه زمانی را تشکیل می‌دهند . برای مدل ماده از معیار نرم‌شدگی رانکین استفاده شد تا شروع و گسترش ترک مشخص شود .

روش پنـالتی بـرای اعمال قید عدم نفوذ در الگوریتم اندرکنش تماسی به‌کاربـرده‌شد.محدوده‌تماس‌ها ابتدا توسط روش درخت دودویی در جستجوی کلی مشخص می‌شود وسپس‌تـوسط جستجوی‌محلی به‌طوردقیق محل تمـاس‌ها مشخص می شود . بـرای مـدل کردن تـرکها از تکنیک مـش‌بندی مجـدد استفاده می‌شود که این روش، برای ارضای شرایط سـازگاری لازم ، المانهای مجاور ترک رانیز تقسیم می‌کند . برای مش بندی از المانهای مثلثی استفاده شد . تکنیک مش بندی مجدد ، علاوه بر مدل‌کردن ترک ، مش را درمحل ترک ریزتر می کند که این امر باعث می شود که از پیچش المـانهای ترک‌یافته جلوگیری شود و تخمین‌های محاسباتی کاهش یابد .

در نتیجه ، روش ترکیبی اجزاء محدود و المانهای مجـزا یـک روش کـارا و سـودمند بـــرای تحلیـل شکست دوبعدی‌موادتحت‌بـار ضـربه‌ای تشخیص داده شد . ایـن روش بـــا پـــاره‌ای از اصلاحـــات می‌توانـد بـرای مـدل کردن مصـالـح بـنـایی ، سازه‌های بتن مسلح ومواد مرکب که تحت بارگـذاری ضربه‌ای و انفجاری هستند، برای پیش‌بینی شکست پیشرونده استفاده شود .

فهرست

۱ مقدمـه ۱

۱-۱-مقدمه ۱

۱-۲-فصل‌بندی پایان‌نامه ۲

۲ پلاستیسیته ۴

۲-۱- مقدمه ۴

۲-۲- معیارهای پلاستیسیته ۷

۲-۲-۱- معیار ترسکا ۷

۲-۲-۲- معیار فون‌میزس ۷

۲-۲-۳- معیار رانکین ۸

۲-۲-۴- معیار مور- کولمب ۱۰

۲-۲-۵- معیار دراکر- پراگر ۱۱

۲-۳- رفتار سخت‌شدگی ۱۲

۲-۳-۱- روابط ساختاری ۱۳

۲-۴- رفتار نرم‌شدگی ۱۵

۲-۴-۱- فرمول‌بندی روابط در فضای کرنش ۱۵

۲-۵- الگوریتم تغییرات تنش در هر مرحله از بارگذاری ۱۸

۳ مکانیک شکست ۲۲

۳-۱- مقدمه ۲۲

۳-۲- روش گریفیث ۲۳

۳-۳- مودهای شکست در نوک ترک ۲۵
۳-۴- بررسی ناحیه پلاستیک نوک ترک ۲۷
۳-۴-۱- ناحیه پلاستیک با معیار فون میزس ۲۷
۳-۴-۲- ناحیه پلاستیک طبق معیار ترسکا ۲۸
۳-۵- معیارهای رشد ترک ۲۹
۳-۵-۱- مقدمه ۲۹
۳-۵-۲- معیار MTS ۳۱
۳-۵-۳- معیار M ۳۲
۳-۵-۴- معیار S ۳۳
۳-۵-۵- معیار T ۳۴
۳-۶- ضرایب شدت تنش ۳۵
۳-۶-۱- بارگذاری یک محوری ۳۵
۳-۶-۲- برش خالص ۳۶
۳-۶-۳- بارگذاری دو محوری ۳۶
۳-۷- مدل سازی سازه و نمایش ترک در آنالیز شکست ۳۶
۳-۷-۱- مدل ترک مجزا ۳۷
۳-۷-۲- مدل ترک پخشی ۳۷
۳-۸- مدلهای رفتاری و معیارهای گسترش ترک ۳۸
۳-۸-۱- معیارهای مبتنی بر مقاومت ۳۸
۳-۸-۲- معیارهای مکانیک شکست ۳۹
۳-۸-۳- مدل نرم شدگی کرنش ۳۹
۳-۸-۴- مودهای بالاتر شکست ۴۱
۴ روش المانهای مجزا **۴۲**
۴-۱- مقدمه ۴۲
۴-۲- آشکارسازی تماس ۴۳

۴-۲-۱- مختصات بر اساس تجزیه سلولی فضا ۴۴
۴-۲-۲- روش دودویی ۴۶
۴-۲-۳- روش آزمایش مستقیم ۴۷
۴-۲-۴- روش نشانه مستقیم ۴۷
۴-۲-۵- روش دودویی ترکیب شده با نشانه مستقیم ۴۸
۴-۳- اندرکنش تماسی ۵۱
۴-۳-۱- روشهای اعمال قید ۵۱
۴-۳-۱-۱- روش پنالتی ۵۱
۴-۳-۱-۲- روش حداقل مربعات ۵۲
۴-۳-۱-۳- روش ضرائب لاگرانژ ۵۲
۴-۳-۱-۴- روش لاگرانژ پیچیده ۵۳
۴-۳-۱-۵- روش لاگرانژ افزایشی ۵۳
۴-۳-۲- روش پنالتی ۵۴

۵ مثالهای عددی **۵۶**

۵-۱- برخورد یک جسم صلب مربعی به یک تیر ۵۶
۵-۲- میله‌ای با دو انتهای متحرک با سرعت ثابت ۶۲
۵-۳- تکیه گاههای متحرک ۶۸
۵-۴- ضربه یک جسم به یک تیر بتنی ۷۱
۵-۵- برخورد یک میلهٔ مسی به یک دیوار صلب ۸۰

۶ نتایج **۸۸**

۶-۱- چکیده مطالب ۸۸
۶-۲- پیشنهادات برای تحقیقات بعدی ۸۹

منابع **۹۰**

فصل ۱

مقدمه

۱-۱-مقدمه

بیشتر مواد در سیستمهای واقعی به صورت غیر پیوسته هستند. موادی مانند خاک یا بتن دارای دانه های مجزا میباشند همچنین موادی مانند سنگ، یخ یا مواد بنایی بهترین نمونه هایی هستند که به صورت سیستم های مجزا مدل میشوند. مواد و سیستم هایی که به صورت پیوسته نیز مدل می شوند ممکن است تحت شرایطی مانند انفجار، ضربه و غیره به صورت غیر پیوسته تبدیل شوند.

روشهای محاسباتی موجود معمولاً به بررسی وضعیت پیوسته و غیر ترک خورده ماده و یا به بررسی تشکیل و گسترش تعداد بسیار محدود ترک در سازه ها اختصاص دارند و تئوریهای کلاسیک الاستیسیته و پلاستیسیته و اجزاء محدود اصولاً مبتنی بر رفتار ماده در حالت یک محیط پیوسته هستند و در برخورد با محیط های ناپیوسته (حاصل از ترک خوردگی شدید) از کارآیی لازم برخوردار نیستند. تئوری مکانیک شکست نیز فقط برای یک ترک واحد یا سطح شکست محدود و بدون هیچ خردشدگی می باشد. بر این اساس روش المانهای مجزا[1] به طور ویژه برای حل مسائلی که رفتار مادی و هندسی غیر پیوسته دارند طراحی شده است. در سالهای اخیر، روش جدید ترکیبی اجزاء محدود و المانهای مجزا توسعه قابل ملاحظه ای یافته است و با افزودن مفاهیم مکانیک تماس به تئوری کلاسیک اجزاء محدود این روش را تکمیل کرده اند و دامنهٔ کاربرد آن را به کلیه کاربردهای صنعتی گسترش داده اند. در روش ترکیبی، در سازه دو منطقه اجزاء محدود و المانهای مجزا را همزمان در نظر می گیرند. منطقه المان - مجزا با روش اجزاء محدود مش بندی میشود و در این منطقه شکست و جداشدگی می تواند رخ دهد ولی در منطقه اجزاء محدود هیچ شکست و جداشدگی نداریم. منطقه شکست معمولاً در مجاورت بارگذاری ضربه ای می باشد. برای بدست آوردن این منطقه تحلیل شکست احتیاج نیست. یک تحلیل سریع الاستوپلاستیک بوسیله المان های ساده برای مشخص کردن مناطق مختلف تنش بکار می رود. با استفاده از این تحلیل یک مرز تقریبی برای منطقه المانهای مجزا بدست می آوریم و سپس تحلیل دقیق را انجام می دهیم. اگر شکست ماده به مرزهای منطقه شکست

---

(۱) Discrete Element Method

برسد، این منطقه را توسعه می دهیم و آنالیز را تکرار می کنیم.

می توان تمام سازه را با المان های مجزا مدل کرد که در این حالت امکان جداشدگی در کل سازه مشاهده می شود ولی روش ترکیبی ما را از محاسبات آشکارسازی و اندرکنش تماس که وقت زیادی می گیرد نجات می دهد. ممکن است در یک سازه چند منطقه شکست داشته باشیم که هر منطقه را با یک المان مجزا مدل می کنیم و هر کدام از این المان ها را با اجزاء محدود مش بندی می کنیم. رفتار بین المانهای اجزاء محدودی که داخل المان مجزا می باشد بر اساس اندرکنش های تماسی و اصطکاکی می باشد و معیار شکست و جداشدگی برای آنها کنترل می شود ولی رفتار بین المان های اجزاء محدودی که داخل المان مجزا نمی باشند و المان مجزا توسط سطوح انتقال[1] مدل می شوند. یک سطح انتقال مانند یک سطح مرزی با مقاومت اتصالی خیلی بالا می باشد که تحت تمام شرایط تنش از شکست و جداشدگی جلوگیری می کند.

نکته قابل توجه در پیشروی ترک این است که ایجاد هر ترک جدید در یک المان باعث ریز تر شدن مش می شود. الگوریتم المان بندی مجدد شامل چهار مرحله است: ترک برداشتن المان، جداشدگی گره های خراب شده، ایجاد گره های جدید و تقسیم المانهای سالم به خاطر سازگاری در گره های جدید. با توجه به این المان بندی مجدد ما یک مش ریز تر در منطقه شکست داریم که برای تخمین های اجزاء محدود بهتر است.

۱ـ۲ـ فصل بندی پایان نامه

موضوع تحقیق، تحلیل دینامیکی گسترش ترک خوردگی در سازه ها می باشد. برای رسیدن به این هدف مفاهیم و تئوری های زیادی باید مورد بحث قرار گیرد که به دلیل محدودیت، خلاصه ای از مطالب مهم و اساسی در این پروژه بیان شده است.

فصل دوم به موضوع پلاستیسیته و معیارهای تسلیم می پردازد. در تمام شکستها در نوک ترک، منطقه پلاستیک داریم که اگر ماده خیلی تردو شکننده باشد این منطقه خیلی کوچک است و اگر نرم و شکل پذیر باشد این منطقه بزرگتر می شود و تا معیار پلاستیسیته ارضاء نشود ترک خوردگی نخواهیم داشت.

در فصل سوم، تئوری مکانیک شکست را مورد بررسی قرار می دهیم و خواهیم دید که بدون استفاده از روشهای محاسباتی چون اجزاء محدود و ترک پخشی[2] و المان مجزا، مشکلات فراوانی در مورد توسعه ترک خواهیم داشت و با استفاده از مفاهیم مکانیک شکست می توانیم یک ترک یا منطقه خیلی محدود شکست را پیش بینی کنیم.

روش المانهای مجزا و مکانیک تماس در فصل چهار معرفی شده اند. چنانکه بیان شد برای محیطهای غیر پیوسته باید از روش المان مجزا استفاده کرد که در آن امکان جداشدگی بین المانها و داخل المانها وجود دارد. برای اجرای این

---

(۱) Transition Interface

(۲) Smeared Crack

روش تئوری مکانیک تماس مورد نیاز است که به چگونگی اعمال قید بین المانها، آشکارسازی و اندرکنش تماس می پردازد و الگوریتم المان بندی مجدد در منطقه شکست بررسی می شود.

در فصل پنجم، پنج مثال با برنامهٔ ELFEN اجرا شده است تا کارآیی این روش نشان داده شود. اطلاعات چهار مثال با توجه به مقالات مختلف می باشند و نتایج آنها با نتایج این تحقیقات مقایسه می شود.

در فصل ششم خلاصه مطالب مهم و نتایج بدست آمده این تحقیق آورده شده است. سپس پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده در این موضوع عنوان شده است.

فصل ۲

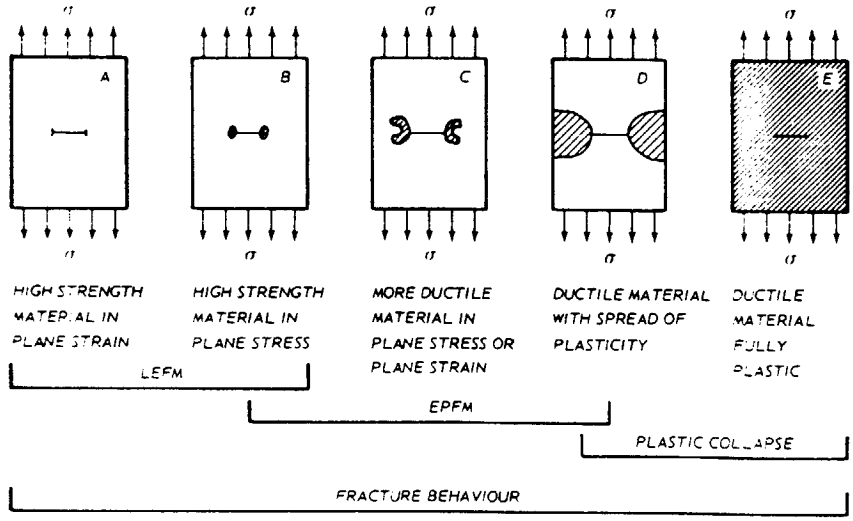
پلاستیسیته

۲-۱-مقدمه

مقاومت مواد مختلف تحت تنشهای چند محوره تابعی از شرایط تنش است و نمی توان به سادگی حالت تنش یک-محوره آن را تعیین کرد. در حالت تنش یک محوره، تنش تسلیم مشخص است و وقتی ماده به تنش تسلیم خود برسد، پلاستیسیته اتفاق می افتد و شیب منحنی تنش-کرنش تغییر می کند. در حالت تنش های چند محوری نیز معیارهای مختلفی پیشنهاد داده شده اند و نمی توان یک معیار را برای تمام مواد بکار برد و برای نمایش دادن اوضاع تسلیم مواد شکننده و شکل پذیر معیارهای متفاوتی هستند و حتی برای یک نوع ماده نیز برای شرایط مختلف بارگذاری ممکن است معیارهای متفاوتی داشته باشیم. با استفاده از این معیارها منطقه پلاستیک را تعیین کرده و سپس به بررسی شکست و رشد ترک در آن منطقه می پردازیم.

در شکل ۲-۱ برای حالات مختلف شکست، منطقه پلاستیک نوک ترک نشان داده شده است.

با فرض ایزوتروپ بودن ماده، معیار پلاستیسیته را می توان به صورت تابعی از ثابتهای تنش و یا تنشهای اصلی نشان داد. به این ترتیب هر وضعیت تنش در حالت پلاستیک در یک جسم به صورت نقطه ای بر سطح تسلیم در فضای تنشهای اصلی قرار می گیرد.

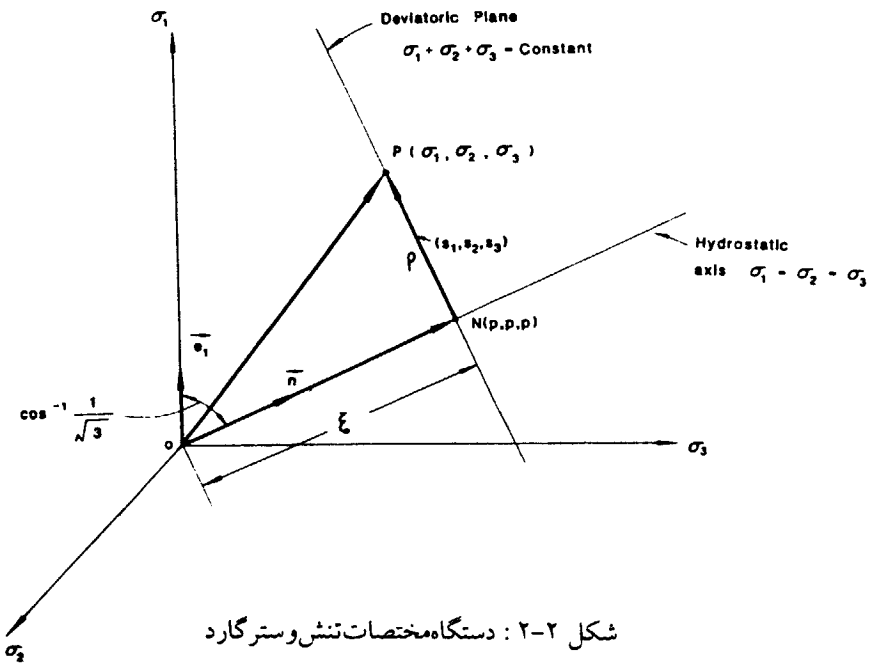


شکل ۲-۱ : محدودهٔ قابل قبول برای هر معیار شکست

خط گذرنده از مبدأ که از محورهای مختصات به یک فاصله است محور هیدرواستاتیک نامیده می‌شود، زیرا نقاط روی این محور نماینده حالت تنش هیدرواستاتیک بوده و در آن تنشهای انحراف آور صفر هستند؛ صفحات عمود بر این محور را صفحات انحراف آور می‌نامند. صفحه انحراف آوری که از مبدأ مختصات می‌گذرد صفحه Π نام دارد. نقاط روی این صفحه نشانگر حالت تنش برشی خالص بدون تنش هیدرواستاتیک هستند.

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0 \qquad (۲-۱)$$

هر نقطه در فضای تنشهای اصلی را می‌توان با استفاده از محور هیدرواستاتیک و صفحات انحراف آور نشان داد (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ : دستگاه مختصات تنش و سترگارد

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

بنابراین یک رویه تسلیم را می توان به صورتهای زیر نشان داد:

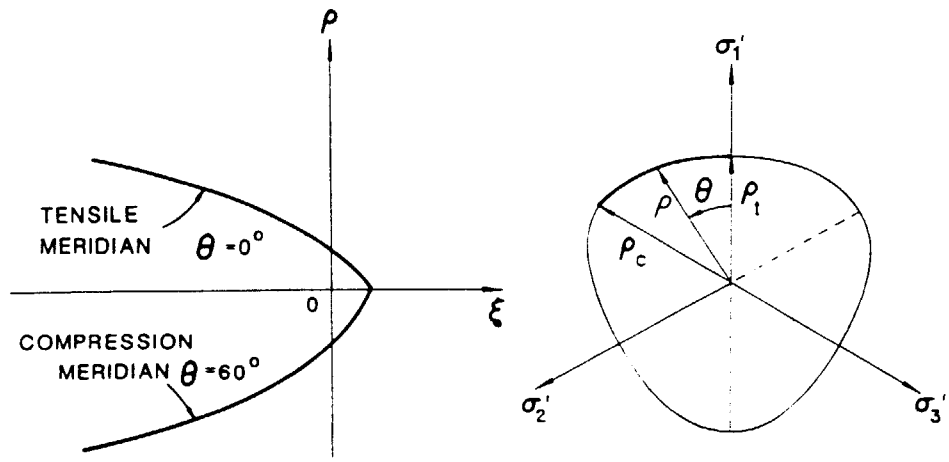
$$f(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)=0 \quad , \quad f(I_1,J_2,J_3)=0 \quad , \quad f(\rho,\xi,\theta)=0 \qquad (۲-۲)$$

باثابت فرض کردن مقادیر ξ و یا θ می توان نمایشهای مختلفی از رویه تسلیم را به شکل منحنیهای دوبعدی نشان داد. (شکل ۲-۳).

باثابت بودن θ منحنیهای حاصل از فصل مشترک صفحه گذرنده بر محور هیدرواستاتیک و رویه تسلیم بدست می آیند که در واقع یالهای تسلیم هستند و به ترتیب برای θ برابر صفر و سی و شصت درجه یالهای کششی، برشی و فشاری بدست می آید. اگر ξ ثابت باشد، منحنی بدست آمده، مقطع عرضی رویه تسلیم است که در نواحی تنش هیدرواستاتیک کششی و فشاری کوچک، به مثلث نزدیک بوده و با افزایش تنش هیدرواستاتیک فشاری به شکل دایره نزدیک می شود.

برای مصالح ایزوتروپ جایگزینی محورهای اصلی با یکدیگر تاثیری در حد تسلیم ندارد، به این دلیل رویه تسلیم نسبت به صفحات نیمسازها ($\sigma_1=\sigma_2$ و $\sigma_2=\sigma_3$ و $\sigma_1=\sigma_3$) متقارن است و با داشتن نقاط محدودهٔ $0^o \le \theta \le 60^o$، بقیهٔ نقاط رویه تسلیم بدست می آید.

در این فصل ابتدا چند معیار تسلیم مهم را بیان می کنیم و سپس روابط سخت شدگی و نرم شدگی را بررسی می کنیم. در انتهای فصل چگونگی استفاده از معیارهای پلاستیسیته را در برنامه تشریح می کنیم.



(ب) (الف)

شکل ۲-۳: نمایش هندسی معیار تسلیم ،(الف) صفحات انحراف آور (ب) یالها