

اثر جهت‌گیری المان بر ظرفیت شکست بتن و مسیر گسترش ترک در آزمون

بیرون کشیدگی انکربولت با استفاده از روش المان‌بندی تکه‌ای

صادق شرفی، علی پرمنون*، امیر هوشنگ اخویسی، رضا آقاییاری

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

* permanoon.ali@gmail.com

چکیده

پیش‌بینی دقیق ظرفیت گسیختگی و مسیر گسترش ترک در انکربولت‌های کاشتنی، به دلیل رفتار غیرخطی بتن و حساسیت پاسخ عددی به نحوه المان‌بندی، از مسائل مهم در تحلیل اتصال‌های بتنی است. در این پژوهش، اثر نوع و جهت‌گیری المان در چارچوب روش المان‌بندی تکه‌ای بر ظرفیت شکست، مسیر ترک و رفتار پس از اوج بررسی شده است. مدل عددی در نرم‌افزار انسیس، به صورت دوبعدی و با فرض کرنش مسطح توسعه یافت و با نتایج آزمایش بیرون کشیدگی انکربولت در بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و عمق کاشت ۶۰ میلی‌متر صحت‌سنجی شد. رفتار غیرخطی بتن با سطح تسلیم منتری - ویلام و گسترش ترک با مدل ناحیه چسبنده شبیه‌سازی گردید. چهار آرایش المان مربعی، غیرموازی، موازی و نامنظم، همراه با یک مدل پیوسته، تحلیل شدند. نوآوری پژوهش، بررسی نظام‌مند اثر جهت‌گیری المان و توسعه یک الگوریتم تولید المان گسسته برای ایجاد خودکار سطوح بالقوه ترک بین المان‌های مجاور است. نتایج نشان داد که المان‌های مربعی و غیرموازی به ترتیب ظرفیت شکست را حدود ۳۷ و ۱۵ درصد بیش‌برآورد کرده و مسیر ترک پله‌ای ایجاد می‌کنند. مدل موازی ظرفیت بیشینه را با خطای کمتر از ۲ درصد پیش‌بینی کرد، اما افت بار پس از اوج در آن تندتر بود. بهترین انطباق در مدل نامنظم حاصل شد؛ به گونه‌ای که خطای ظرفیت کمتر از ۱ درصد و زاویه ترک حدود ۳۴ درجه بود. مدل پیوسته ظرفیت را حدود ۴۲ درصد بیش‌برآورد کرد. با وجود محدودیت دوبعدی بودن مدل، نتایج نشان می‌دهد توزیع تصادفی جهت المان می‌تواند دقت پیش‌بینی شکست را به‌طور محسوسی بهبود دهد.

کلمات کلیدی

المان‌بندی تکه‌ای، بیرون کشیدگی انکربولت، گسترش ترک، مدل اجزاء محدود، ظرفیت شکست بتن

۱- مقدمه

مدل‌سازی دقیق سازه‌های بتنی مسلح متصل به اتصال‌های پیچیده مانند انکربولت‌ها یکی از چالش‌های اساسی مهندسی سازه است. خرابی‌های ناشی از ضعف در طراحی یا مدل‌سازی نادرست می‌تواند منجر به شکست‌های فاجعه‌بار شود. مدل‌سازی عددی این پدیده‌ها مستلزم به کارگیری روش‌های پیشرفته المان محدود است که بتواند اندرکنش‌های غیرخطی، شکست‌های موضعی و رفتارهای پیچیده بتن و فولاد را به درستی شبیه‌سازی کند. در این میان، مدل‌سازی ناحیه چسبنده^۱ برای شبیه‌سازی ترک خوردگی و جداسازی و استفاده از المان‌های تماسی^۲ برای مدیریت اندرکنش سطح به سطح بین اجزای بتن بسیار کاربردی و حائز اهمیت هستند. نحوه المان‌بندی نه تنها بر دقت عددی محاسبات تأثیر می‌گذارد، بلکه چگونگی توزیع تنش‌ها در نواحی تمرکز تنش، مانند نزدیکی سر انکربولت یا ناحیه برش در بتن را مستقیماً کنترل می‌کند. عدم رعایت تناسب در اندازه المان‌ها یا استفاده از المان‌های نامناسب می‌تواند منجر به مشکلات عددی و الگوی گسترش ترک نامناسب شود، جهت‌گیری ترجیحی

¹ Cohesive Zone Model

² Contact Elements

المان‌ها می‌تواند بر مسیر انتشار ترک و نرخ انرژی آزاد شده در طول شکست تأثیر بگذارد. کیفیت المان‌بندی^۱ در هر تحلیل المان محدود سنگ بنای دقت نتایج است، در مدل‌هایی که وابستگی انرژی به اندازه المان دارند مانند مدل ناحیه چسبنده، این اهمیت تشدید می‌شود. المان‌بندی مناسب سبب می‌شود که توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در نواحی اطراف انکربولت و سطوح تماس به‌طور موثری توسط تعداد کافی از المان‌ها تقریب زده شود. اگر المان‌ها در ناحیه بحرانی مانند ناحیه اتصال انکربولت به بتن بیش از حد درشت باشند، مدل نخواهد توانست نرخ کاهش مقاومت پس از رسیدن به اوج تنش را به‌درستی جذب کند که این مسئله به مفهوم وابستگی به المان^۲ مربوط می‌شود.

یک مدل عددی سازگار سه‌سطحی^۳ برای شبیه‌سازی ترک در بتن معمولی و بتن مسلح با الیاف تحت بارگذاری یکنواخت توسعه یافته است. در این روش، با درج تدریجی المان‌های رابط^۴ تنها در نواحی آسیب‌پذیر، هزینه محاسباتی به میزان چشمگیری کاهش یافته، بدون آنکه دقت نتایج افت کند [۱]، جهت کاهش هزینه محاسباتی در مدل‌سازی سازه‌های نیمه‌ترد مانند بتن، یک روش نوین چند مقیاسی ارائه شد. در این رویکرد، با ادغام بهینه‌سازی توپولوژی غیرخطی در مقیاس ماکرو و مدل‌سازی ریزساختار در مقیاس مزو، تنها مناطق بحرانی با جزئیات بالا تحلیل می‌شود [۲]، در پژوهشی دیگر، کاربرد روش ترکیبی ماکرو - مزو مبتنی بر بهینه‌سازی توپولوژی، به‌طور خاص برای مدل‌سازی ترک در تیرهای بتنی مورد بررسی قرار گرفته و کارایی آن در کاهش هزینه‌های محاسباتی تأیید شد [۳]، یک روش چند مقیاسی تطبیقی مبتنی بر تصویر نیز برای شبیه‌سازی تکامل آسیب در بتن‌آرمه ابداع شد، در این روش از تصاویر ریزساختاری واقعی برای شناسایی فازهای مختلف استفاده شد و با یک شبکه محاسباتی تطبیقی، از پیچیدگی‌های ناشی از مدل‌سازی ناحیه انتقالی^۵ جلوگیری شد [۴]، رفتار پیوند و لغزش بین میلگرد و بتن با روش‌های متعددی مطالعه شد. یک روش جایگزین بر پایه المان محدود کوپلینگ ارائه‌گردید که امکان مدل‌سازی گسسته میلگردها و رفتار پیوند - لغزش را در مسائل دو و سه‌بعدی فراهم کرد. این مدل به اندازه المان حساسیت کمتری نشان داد [۵]، یک تکنیک اتصال جدید برای المان‌های غیرمتطابق معرفی شد که بدون افزودن درجات آزادی اضافی، امکان اتصال المان‌ها را در مسائل دو و سه بعدی فراهم کرد [۶]، تأثیر مخرب خوردگی میلگرد بر رفتار چسبندگی و ظرفیت گیرایی با ارائه یک مدل اصطکاکی بررسی شد. این مدل، کاهش مقاومت پیوند ناشی از عوامل خوردگی را پیش‌بینی کرد [۷]، در زمینه بتن پیش‌تنیده مدل‌های تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی طول انتقال و توزیع تنش توسعه یافتند. یک مدل تحلیلی بسته و یک مدل عددی سه‌بعدی غیرخطی نشان داد که عواملی مانند مقاومت بتن، پوشش بتن و اثر جمع‌شدگی تأثیر قابل توجهی بر طول انتقال دارند [۸]، توسعه یک معادله مرتبه سوم برای مدل‌سازی ترک و بکارگیری تئوری استوانه جدار ضخیم، رویکرد دیگری برای تحلیل انتقال پیش‌تنیدگی بود [۹]، یک رابطه پیش‌بینی برای طول انتقال در اعضای پیش‌تنیده ارائه‌شد که عوامل مؤثری مانند قطر کابل، پیش‌تنیدگی، مقاومت و پوشش بتن را به‌طور واقع‌گرایانه‌تری نسبت به روابط آیین‌نامه‌ای در نظر گرفت [۱۰]، تحلیل توزیع غیریکنواخت تنش پیوند در کابل‌های پیش‌تنیده با استفاده از یک مدل رابطه تنش - لغزش غیرخطی و حل معادلات دیفرانسیل با شرایط مرزی واقع‌گرایانه انجام شد [۱۱]، رفتار اتصال‌های چسبی نیز با ارائه یک مدل رفتاری بر پایه مقاومت چسب به جای مقاومت بتن برای پیش‌بینی بار شکست مورد تحلیل قرار گرفت [۱۲]، مطالعات تجربی بر روی اتصال‌های مکانیکی نشان‌داده که شکست غالباً به صورت بیرون کشیدگی میلگرد^۶ از اتصال و در محل تمرکز تنش رخ می‌دهد [۱۳]، یک مدل عددی دو بعدی میان‌مقیاس برای شبیه‌سازی فرآیند ترک‌خوردگی در بتن ارائه شد. در این مدل ساختار ناهمگن بتن شامل سنگدانه‌ها، ماتریس و ناحیه انتقالی با استفاده از المان‌های رابط با ضخامت بسیار کم و یک مدل آسیب کششی بازتولید شده و تأثیر پارامترهای سنگدانه بررسی شد [۱۴]، یک مدل عددی میان‌مقیاس دیگر برای شبیه‌سازی رفتار شکست ستون‌های بتن آرمه لاغر تحت بار فشاری خارج از مرکز توسعه یافت. این مدل توانست رفتار غیرخطی ستون‌ها را با در نظرگیری اثرات

¹ Mesh Quality

² Mesh Independence

³ Micro, Mezo, Macro

⁴ Contact Element

⁵ Interfacial Transition Zone

⁶ Pull out

هندسی و آسیب بتن، بدون استفاده از المان‌های تماسی پرهزینه شبیه‌سازی کند [۱۵]، تأثیر الیاف پلاستیکی ماکروسنتتیک^۱ بر بهبود مقاومت و چقرمگی شکست ترکیبی بتن با استفاده از یک روش ترکیبی آزمایشگاهی - عددی مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی عددی با به‌کارگیری تکنیک گسسته‌سازی المان^۲ و مدل ناحیه چسبنده انجام شد [۱۶]، برای مدل‌سازی غیرخطی سازه‌های بنایی، یک المان رابط سه‌بعدی توسعه یافت که قادر است رفتار این سازه‌ها را با دقت بالا و بدون نیاز به ریزسازی بیش از حد المان شبیه‌سازی کند [۱۷]، از مدل شبکه‌ای همپوشان همراه با تحلیل خطی ترتیبی برای شبیه‌سازی شکست بتن استفاده شد. این مدل غیرموضعی قادر است جهت و عرض ترک را پیش‌بینی کند [۱۸]، یک روش عددی مبتنی بر تئوری پلاستیسیته برای پیش‌بینی سطح شکست بهینه و ظرفیت اتصال‌های منفرد تحت بار کششی ارائه شد [۱۹] و مطالعات تجربی بر روی مهارهای گوه‌ای در بتن با عملکرد بالا^۳ نشان داد که استفاده از این بتن مقاومت کششی را افزایش می‌دهد و افزودن الیاف فولادی رفتار پس از اوج را بهبود می‌بخشد [۲۰].

در پژوهشی یک روش نیمه‌تحلیلی مبتنی بر مکانیک شکست الاستیک خطی برای شبیه‌سازی انتشار ترک در مواد ترد ارائه شد که با محاسبه مستقیم ضرایب شدت تنش و استفاده از معیار نرخ حداکثر آزادسازی انرژی، مسیر رشد ترک را پیش‌بینی می‌کند. نتایج نشان داد این روش با تعداد درجات آزادی کمتر و هزینه محاسباتی پایین‌تر، دقت بالایی در پیش‌بینی مسیر ترک و تحلیل گسیختگی و شکست نهایی دارد [۲۱]. چقرمگی شکست مود بازشونده بتن با استفاده از آزمایش دیسک برزلی ترک‌دار و مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترک‌های کششی از نوک درزه آغاز شده و با گسترش تدریجی، به شکست نهایی نمونه منجر می‌شوند و مدل عددی توانایی مناسبی در پیش‌بینی فرایند گسیختگی و شکست دارد [۲۲]، مکانیزم گسیختگی و شکست درزه‌های غیردائم در نمونه‌های ملات به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه شد. نتایج بیانگر است که تعداد و زاویه درزه‌ها تأثیر قابل توجهی بر مسیر رشد ترک، الگوی شکست و مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها دارد [۲۳]، پیش‌بینی چقرمگی شکست سنگ در مودهای I و II با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین انجام شد، نتایج نشان داد که مدل‌های داده‌محور قادر به برآورد مناسب مقاومت مصالح در برابر گسترش ترک و شکست هستند [۲۴]، همچنین تأثیر نانو لوله‌های کربنی چنددیواره و پلیمر الاستومر استایرن - بوتادین - استایرن^۴ بر رفتار شکست سیمان چاه نفت مورد بررسی قرار گرفت، نتایج حاکی از بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی، افزایش جذب انرژی و ارتقاء رفتار پس از گسیختگی مصالح است [۲۵].

با وجود توسعه روش‌های مختلف برای تحلیل شکست بتن پیرامون انکربولت‌ها، در اغلب پژوهش‌های پیشین تمرکز اصلی بر انتخاب مدل رفتاری مصالح، مدل‌های آسیب یا روش‌های مختلف مکانیک شکست بوده و تأثیر جهت‌گیری و توپولوژی المان در چارچوب روش المان‌بندی تکه‌ای بر پیش‌بینی ظرفیت شکست و مسیر گسترش ترک به‌صورت نظام‌مند بررسی نشده است. از آنجا که در این روش، مسیرهای بالقوه گسترش ترک در امتداد فصل مشترک المان‌ها تعریف می‌شوند، جهت‌گیری المان می‌تواند بر آغاز، مسیر گسترش و ظرفیت نهایی شکست تأثیرگذار باشد و این موضوع تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری این پژوهش در توسعه و ارزیابی یک چارچوب عددی مبتنی بر روش المان‌بندی تکه‌ای برای بررسی اثر مستقل جهت‌گیری المان بر رفتار شکست انکربولت‌های کاشتنی در بتن است. در این چارچوب، با توسعه یک الگوریتم خودکار برای گسسته‌سازی مدل و ایجاد فصل مشترک‌های چسبنده با ضخامت صفر، چهار آرایش مختلف المان شامل المان چهارگره‌ای منظم، المان مثلثی هم‌راستا با مسیر مورد انتظار ترک، المان مثلثی خلاف‌راستا با مسیر مورد انتظار ترک و المان مثلثی با جهت‌گیری تصادفی تولید و تحت شرایط یکسان مورد مقایسه قرار گرفتند. بدین ترتیب، اثر توپولوژی و جهت‌گیری المان، مستقل از سایر پارامترهای مدل، بر ظرفیت شکست، مسیر گسترش ترک، زاویه ترک و رفتار پس از اوج ارزیابی شد. بر این اساس، در این پژوهش یک مدل عددی دوبعدی با فرض کرنش مسطح توسعه داده شد و رفتار غیرخطی بتن با استفاده از سطح تسلیم منتری - ویلام و مدل ناحیه چسبنده شبیه‌سازی گردید. همچنین برهم‌کنش بتن - فولاد با استفاده از المان‌های تماسی

¹ Macrosynthetic Plastic Faiber

² Mesh Fragmentation Technique

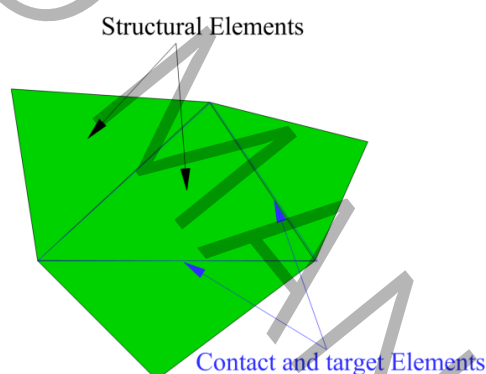
³ High Performance Concrete

⁴ Styrene-Butadiene-Styrene

و قانون تنش - جدایش مدل شد و صحت عملکرد مدل از طریق مقایسه با نتایج آزمایش بیرون کشیدگی و روابط آیین نامه ACI 318-05 ارزیابی گردید. معیارهای مقایسه شامل ظرفیت نهایی، زاویه ترک، شکل مخروط گسیختگی و شیب ناحیه نرم شونده منحنی بار - تغییر مکان بود. هدف نهایی این پژوهش، ارائه مبنایی مهندسی برای انتخاب آرایش مناسب المان در تحلیل شکست بتن و کاهش وابستگی نتایج عددی به جهت گیری و توپولوژی المان است.

۲- مدل سازی گسسته تکه ای

در این پژوهش به منظور شبیه سازی آغاز و گسترش ترک، از مدل ناحیه چسبنده در چارچوب روش المان بندی تکه ای استفاده شد. در این روش، ابتدا بتن در مقیاس مزو به مجموعه ای از المان های مجزا تقسیم و سپس با تکثیر گره های مشترک، پیوستگی سینماتیکی بین المان های مجاور حذف شد. در ادامه، در تمامی فصل مشترک های داخلی بتن و همچنین در فصل مشترک بتن - فولاد، المان های تماسی و لایه های ناحیه چسبنده با ضخامت صفر قرار داده شد؛ بنابراین تمامی مرزهای بین المان ها به عنوان مسیرهای بالقوه گسترش ترک در نظر گرفته شد (شکل ۱). با اعمال بارگذاری، تنش و جدایش در این فصل مشترک ها بر اساس قانون تنش - جدایش کنترل شد. هنگامی که تنش به معیار آغاز آسیب رسید، فرآیند آسیب در لایه چسبنده آغاز شد و با افزایش جدایش، سختی موثر فصل مشترک به تدریج کاهش یافت تا در نهایت جدایش کامل و تشکیل ترک رخ داد. در نتیجه، مسیر رشد ترک از پیش تعریف نشده و به صورت خودکار بر اساس توزیع تنش، تکامل آسیب و آرایش المان گسسته در طول تحلیل تعیین شد. این راهبرد ضمن بازتولید تدریجی و وابسته به انرژی شکست، امکان بررسی اثر جهت گیری المان بر مسیر گسترش ترک و ظرفیت شکست را نیز فراهم کرد.



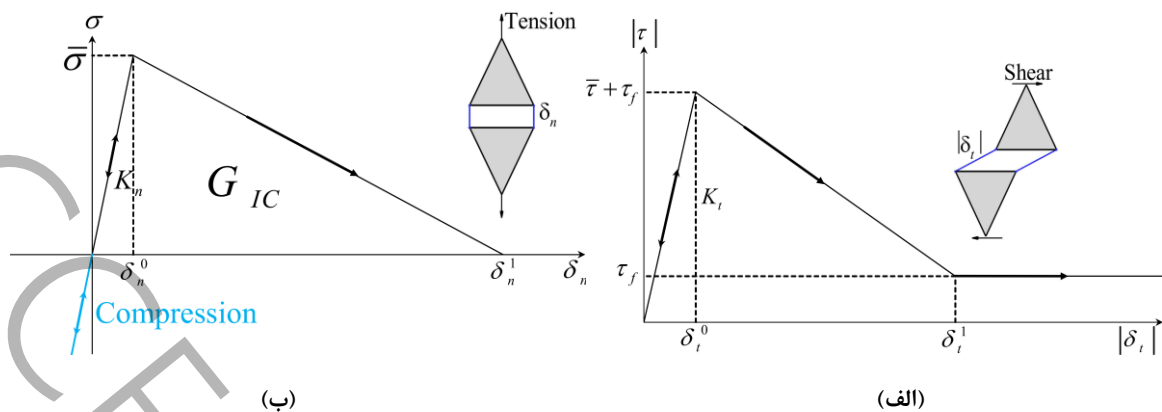
شکل ۱. نمایش آرایش المان های حجمی و فصل مشترک های تماسی - چسبنده با ضخامت صفر در روش المان بندی تکه ای

Figure 1. Arrangement of solid elements and zero-thickness cohesive contact interfaces in the Mesh Fragmentation Technique

۲-۱- مدل ناحیه چسبنده

مدل ناحیه چسبنده بر اساس فرمولاسیون آلفانو و کریسفیلد^۱ برای غلبه بر محدودیت های مکانیک شکست الاستیک خطی گسترش یافت. در مدل ناحیه چسبنده از مدل ۲ خطی و اصطکاک کلمب برای محاسبه تنش نرمال و برشی بین المان ها استفاده شد [۲۷-۳۱]. شکل ۲ رفتار کلی ناحیه چسبنده برای مودهای اول و دوم را نشان می دهد.

¹ Alfano and Crisfield



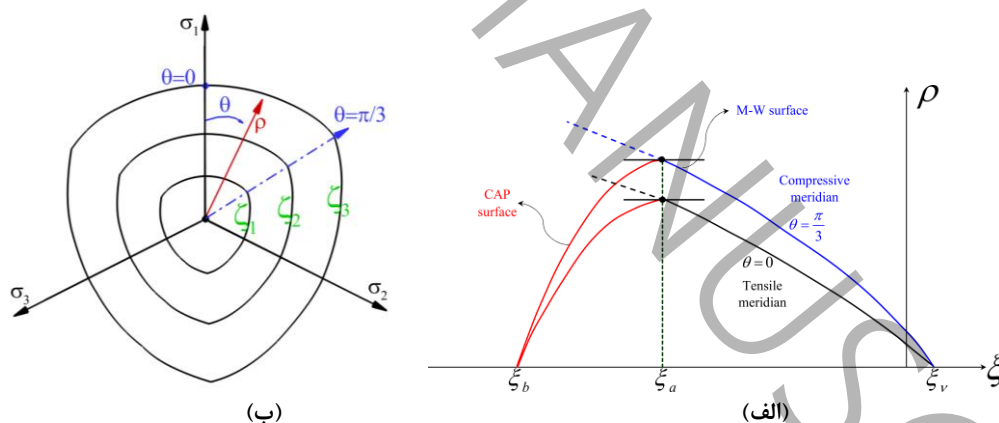
شکل ۲. قانون دوخطی تنش - جدایش در مدل ناحیه چسبنده: (الف) مود اول، بازشدگی تحت کشش (ب) مود دوم، لغزش تحت برش

Figure 2. Bilinear traction-separation law of the cohesive zone model: (a) Mode I opening under tension, (b) Mode II sliding under shear

۲-۲- سطح شکست منتری ویلام

سطح شکست منتری ویلام یک مدل پلاستیسیته برای بتن و مبتنی بر سطح تسلیم ویلام^۱ است، ویلام وارنکی مشابه سطح تسلیم موهر کولمب است با این تفاوت که موهر کولمب دارای لبه‌های تیز است و می‌تواند حل مسئله را دشوار (و مقاومت R_c ، مقاومت تسلیم در فشار تک‌محوره R_t کند. پارامترهای مصالح شامل: مقاومت تسلیم در کشش تک‌محوره (تابع تسلیم را تعریف می‌کنند. در

(الف) (ب) شکل ۳ شمای سه‌بعدی در فضای تنش‌های اصلی و حدود تسلیم در نواحی کششی و فشاری ارائه شد و جزییات بیشتر این سطح تسلیم در مراجع [۳۲-۳۴] است.



شکل ۳. سطح تسلیم منتری - ویلام برای بتن: (الف) نمایش سه‌بعدی در فضای تنش‌های اصلی (ب) حدود تسلیم در نواحی کششی و فشاری

Figure 3. Menetrey-Willam yield surface for concrete: (a) three-dimensional representation in principal stress space, (b) yield boundaries in the tensile and compressive regions

¹ Willam Warnke

۳- صحت‌سنجی و بررسی نتایج

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل عددی و همچنین بررسی تأثیر نوع المان‌بندی در چارچوب روش المان‌بندی تکه‌ای از نتایج آزمایش بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن به‌عنوان مبنای صحت‌سنجی استفاده شد. نمونه آزمایشگاهی مورد استفاده، در مطالعات پیشین توسط الیگه‌ازن و همکاران^۱ [۱۲] مورد بررسی و گزارش قرار گرفته و داده‌های تجربی آن به‌عنوان مرجع تطبیق نتایج عددی انتخاب شد. در فرآیند آماده‌سازی نمونه، محل استقرار انکربولت در بتن به‌وسیله دستگاه حفاری سوراخ‌کاری شده و سپس بولت فولادی با استفاده از چسب اپوکسی با مقاومت برشی اسمی ۱۹ مگاپاسکال در داخل بتن کاشته شد. مقاومت فشاری بتن مورد استفاده در نمونه برابر با ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد و عمق مهار^۲ بولت معادل ۶۰ میلی‌متر تعریف شد. به‌منظور اطمینان از انطباق شرایط مدل‌سازی عددی با شرایط آزمایشگاهی [۱۲]، تمامی پارامترهای مکانیکی مصالح شامل مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، ضرایب پواسون و مشخصات چسبندگی فصل مشترک، مطابق آیین نامه‌های معتبر در نظر گرفته شد و در مدل اجزاء محدود اعمال شد. همچنین ابعاد هندسی نمونه، شرایط مرزی و نحوه اعمال بارگذاری کششی به‌صورت جابجایی کنترل بازتولید شد. مشخصات کامل مکانیکی مواد و ابعاد هندسی نمونه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح، پارامترهای چسبندگی فصل مشترک و ابعاد هندسی نمونه مورد استفاده در صحت‌سنجی مدل عددی

Table 1. Mechanical properties of the materials, interface bond parameters, and specimen dimensions used for numerical model validation

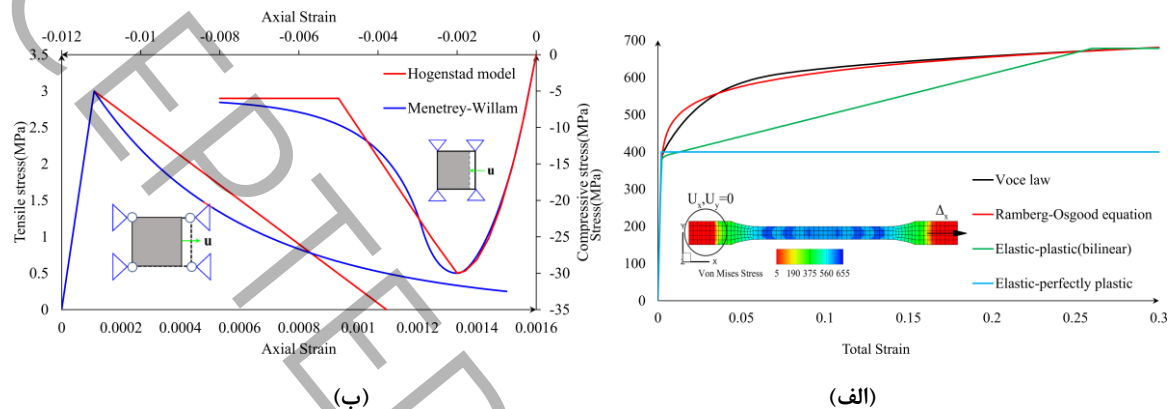
محل تعریف در ANSYS	مقدار	پارامتر	مدل / جزء
تعریف سطح تسلیم	۳۰ مگاپاسکال	مقاومت فشاری تک‌محوره R_c	سطح تسلیم منتری-ویلام
تعریف سطح تسلیم بتن	۳ مگاپاسکال	مقاومت کششی تک‌محوره R_t	سطح تسلیم منتری-ویلام
تعریف سطح تسلیم بتن	۳۴/۸ مگاپاسکال	مقاومت فشاری دوجوره R_b	سطح تسلیم منتری-ویلام
تعریف سطح تسلیم بتن	مطابق متن	زاویه اتساع ψ	سطح تسلیم منتری-ویلام
تعریف مدل ناحیه چسبنده	۳ مگاپاسکال	تنش بیشینه نرمال σ_{max}	فصل مشترک چسبنده
تعریف مدل ناحیه چسبنده	۰/۰۸۹۳ میلی‌متر	جدایش نرمال کامل δ_{nc}	فصل مشترک چسبنده
مبنای محاسبه انرژی شکست	۰/۱۳۴ نیوتن بر میلی‌متر	انرژی شکست مود اول $G_I = G_f$	سطح تسلیم منتری-ویلام فصل مشترک چسبنده
تعریف مدل ناحیه چسبنده	مطابق متن	تنش و جدایش بیشینه برشی δ_{tc} ، τ_{max}	فصل مشترک چسبنده
تعریف اصطکاک تماسی	مطابق متن	ضریب اصطکاک کولمب μ	فصل مشترک چسبنده
تعریف رفتار غیرخطی فولاد	۵۶۷ / ۴۲۶ مگاپاسکال	تنش تسلیم و نهایی f_u ، f_y	فولاد انکربولت
خواص الاستیک	۲۰۰ گیگاپاسکال	مدول الاستیسیته E_s	فولاد انکربولت
خواص الاستیک بتن	۲۵۰۸۴ مگاپاسکال	مدول الاستیسیته E_c	بتن
هندسه مدل	۶۰ میلی‌متر	عمق مهار مؤثر h_{ef}	هندسه نمونه

به‌منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی و درستی سطوح تسلیم به‌کار رفته، مصالح مورد استفاده در نقاط بحرانی تنش مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت. رفتار بتن در کشش و فشار با روابط پیشنهادی هاگنستاد مقایسه شد (الف) (ب)

² R. Eligehausen et al

¹ Embedment Depth

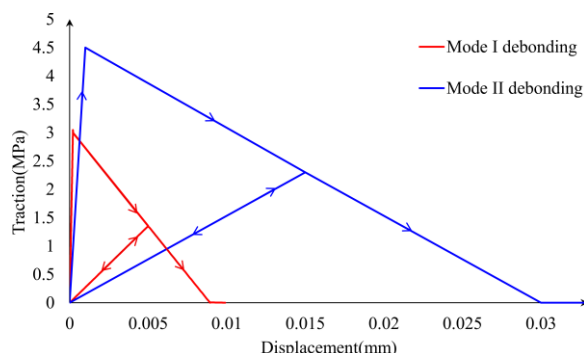
شکل ۴-الف)، تطابق مناسبی بین پاسخ حاصل از سطح تسلیم منتری - ویلام و منحنی‌های مرجع هاگنستاد به‌دست آمد که بیانگر کفایت مدل انتخابی در بازنمایی رفتار غیرخطی بتن است. به‌منظور صحت‌سنجی رفتار غیرخطی بولت فولادی، از سطح تسلیم ون‌میسز همراه با سخت‌شوندگی همسانگرد و قانون سخت‌شوندگی وُکه استفاده شد. پارامترهای مدل بر اساس منحنی تنش - کرنش فولاد تعیین شدند تا رفتار الاستوپلاستیک، شامل آغاز تسلیم، سخت‌شوندگی تدریجی و افزایش مقاومت پس از تسلیم، به‌درستی بازتولید شود. شکل ۴-ب نشان می‌دهد مدل انتخاب‌شده انطباق مناسبی با رفتار مورد انتظار فولاد داشته و قادر است پاسخ غیرخطی بولت را در مراحل قبل و بعد از تسلیم به‌طور واقع‌بینانه شبیه‌سازی کند [۳۵-۳۸].



شکل ۴. ارزیابی پاسخ تنش - کرنش مدل‌های رفتاری مصالح: الف) پاسخ بتن تحت کشش و فشار و مقایسه با منحنی‌های مرجع ب) پاسخ فولاد با معیار تسلیم ون‌میسز و قانون سخت‌شوندگی وُکه و مقایسه با مدل‌های الاستوپلاستیک، دوخطی و رامبرگ - اسگود

Figure 4. Stress-strain responses of the constitutive models: (a) concrete under tension and compression compared with the reference curves, (b) steel modeled using the von Mises yield criterion and Voce hardening law compared with elastoplastic, bilinear, and Ramberg-Osgood models

به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد المان‌های چسبنده، این المان‌ها به‌صورت مجزا تحت دو حالت بارگذاری کنترل‌شده قرار گرفتند؛ بدین ترتیب که در گام نخست تحت بار کششی خالص به‌منظور بررسی رفتار در مود اول جدایش (بازشدگی) و در گام دوم تحت بار برشی خالص به‌منظور ارزیابی پاسخ در مود دوم جدایش - لغزش مورد تحلیل قرار گرفتند. هدف از این ارزیابی، اطمینان از درستی قانون تنش - جدایش، مقدار انرژی شکست و نحوه کاهش تدریجی سختی المان در هر دو مولفه نرمال و برشی بود. نتایج نشان‌داد که در هر دو مود بارگذاری، روند آغاز آسیب، کاهش تدریجی سختی و جدایش نهایی المان با رفتار تئوریک مورد انتظار انطباق دارد و ناپایداری عددی یا سختی کاذب قابل توجهی مشاهده نشد. در شکل ۵ پاسخ تنش - جدایش المان‌های چسبنده در مود اول و مود دوم برای بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال ارائه شد که بیانگر بازتولید صحیح رفتار چسبندگی، اتلاف انرژی شکست و گذار پیوسته از ناحیه الاستیک به ناحیه نرم‌شوندگی است. این نتایج صحت انتخاب پارامترهای مدل ناحیه چسبنده و قابلیت المان چسبنده در مدل‌سازی فرآیند گسیختگی بتن را تأیید کرد.



شکل ۵. پاسخ تنش جدایش المان‌های چسبنده در آزمون‌های مستقل کشش خالص، مود اول و برش خالص، مود دوم برای بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال

Figure 5. Traction-separation responses of the cohesive interfaces under independent pure-tension (Mode I) and pure-shear (Mode II) tests for concrete with a compressive strength of 30 MPa

با توجه به اینکه نوع آزمایش مورد استفاده در این پژوهش در رده انکربولت‌های کاشتنی طبقه‌بندی می‌شود، مطابق ضوابط ارائه‌شده در آیین‌نامه ACI 318-05 [۲۶]، ظرفیت شکست اتصال می‌بایست بر اساس رابطه (۱)، که مبتنی بر مدل گسیختگی مخروط بتن و عمق مهاری موثر است، محاسبه و به‌عنوان معیار مقایسه با نتایج عددی در نظر گرفته‌شود. بدین ترتیب، چارچوب تحلیلی آیین‌نامه‌ای به‌عنوان مرجع ارزیابی صحت مدل عددی انتخاب شد.

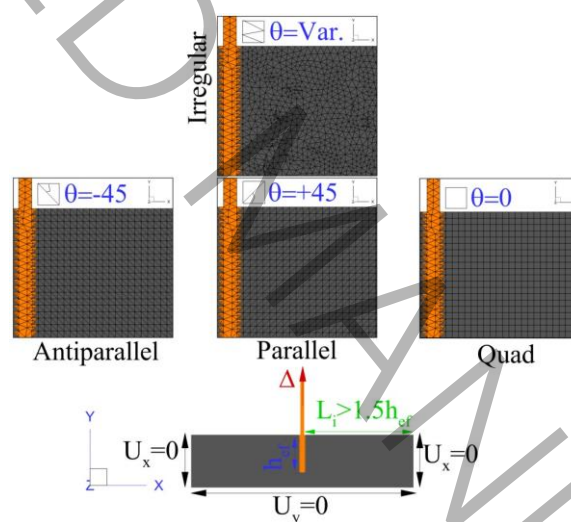
$$\bar{N}_b = 14.7 \sqrt{f'_c h_{ef}^{1.5}} = 14.7 \sqrt{30 \times 60^{1.5}} = 37.4 \text{ (kN)} \quad (1)$$

مدل عددی به‌صورت دوبعدی و با فرض کرنش مسطح توسعه داده‌شد. الگوریتم تولید مدل و المان بندی مدل گسسته در پیوست الف توضیح داده شده است. انتخاب کرنش مسطح به‌جای تنش مسطح بر اساس ضخامت قابل توجه بلوک بتنی و محدود شدن تغییر شکل پواسونی خارج از صفحه در ناحیه اطراف انکربولت انجام شد. در حالت تنش مسطح، $\sigma_z = 0$ فرض می‌شود و کرنش خارج از صفحه آزاد است، در حالی که در حالت کرنش مسطح شرط $\varepsilon_z = 0$ اعمال شده و در محدوده الاستیک تنش خارج از صفحه از رابطه $I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ ایجاد می‌شود. این تنش، بخشی از اثر محصورشدگی بتن مجاور را در صفحه میانی نمونه بازنمایی کرده و بر اولین ناوردای تنش و در نتیجه بر پاسخ مدل منتری - ویلام اثر می‌گذارد. از آنجا که نمونه مورد مطالعه یک بلوک بتنی حجیم و نه یک صفحه نازک با سطوح آزاد است، فرض کرنش مسطح در مقایسه با تنش مسطح تقریب مناسب‌تری محسوب می‌شود. با این حال، به دلیل ماهیت ذاتاً سه‌بعدی مخروط شکست انکربولت، مدل حاضر یک تقریب دوبعدی برای بررسی مقایسه‌ای اثر جهت‌گیری المان است و بازنمایی کامل هندسه شکست نیازمند تحلیل سه‌بعدی یا محورمقتارن خواهد بود. در گسسته‌سازی محیط، از المان جامد سازه‌ای دوبعدی چهارگره‌ای^۱ با دو درجه آزادی انتقالی در هر گره استفاده شد. به‌منظور جلوگیری از تأثیر مرزهای مصنوعی مدل بر الگوی ترک و میدان تنش و با استناد به توصیه‌های آیین‌نامه‌ای و مطالعات پیشین [۱۹]، فاصله مرکز انکربولت تا مرزهای جانبی مدل در راستای افقی (محور x) در هر طرف بزرگ‌تر از ۱/۵ برابر عمق مهاری مؤثر ($1/5 h_{ef}$) در نظر گرفته شد. این قید هندسی در تمامی مدل‌های عددی به‌صورت یکنواخت اعمال شده‌است تا شرایط مرزی از ناحیه شکست مورد انتظار فاصله کافی داشته باشد.

به‌منظور بررسی تأثیر جهت‌گیری المان بر پاسخ عددی، چهار آرایش مختلف المان تولید شد که مبنای طبقه‌بندی آن‌ها جهت‌گیری غالب المان‌ها نسبت به مسیر مورد انتظار گسترش ترک است. با توجه به مطالعات تجربی و ضوابط آیین‌نامه ACI 318، ترک ناشی از بیرون کشیدگی انکربولت معمولاً با زاویه‌ای در حدود 35° تا 45° نسبت به افق گسترش می‌یابد. از این رو، زاویه مرجع 45° به‌عنوان جهت غالب رشد ترک در نظر گرفته‌شد و آرایش‌های مختلف المان بر این اساس تعریف گردیدند. در

¹ Solid182

مدل المان چهارگره‌ی منظم^۱، از المان‌های چهارگره‌ی با آرایش قائم - افقی استفاده شد که راستای غالب اضلاع آن‌ها در امتداد محورهای مختصات قرار دارد. این مدل نمایانگر المان ساختاریافته متداول در تحلیل‌های اجزای محدود است. در مدل المان مثلثی هم‌راستا با مسیر مورد انتظار ترک^۲، تمامی المان‌های مثلثی به‌صورت منظم و با زاویه غالب 45° نسبت به محور افقی آرایش یافتند؛ به‌گونه‌ای که راستای غالب اضلاع المان‌ها با جهت مورد انتظار انتشار ترک هم‌راستا باشد و کمترین مقاومت عددی در مسیر گسترش ترک ایجاد گردد. در مدل المان مثلثی خلاف‌راستا با مسیر مورد انتظار ترک^۳، همان آرایش منظم المان‌های مثلثی با زاویه غالب 45° - نسبت به محور افقی ایجاد شد. در این حالت، راستای غالب اضلاع المان‌ها در خلاف جهت مورد انتظار انتشار ترک قرار گرفته و هدف از آن، بررسی حساسیت پاسخ عددی به ناهم‌راستایی المان نسبت به مسیر گسترش ترک است. در مدل المان مثلثی با جهت‌گیری تصادفی^۴، تمامی المان‌ها از نوع مثلثی بود اما جهت‌گیری آن‌ها نسبت به مسیر مورد انتظار ترک به‌صورت کاملاً تصادفی تعیین شد؛ بنابراین هیچ راستای غالبی بر شبکه حاکم نیست. این آرایش به‌منظور کاهش وابستگی مسیر ترک به جهت‌گیری المان و فراهم کردن امکان تشکیل طبیعی مسیر گسترش ترک در محیط عددی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در هر سه مدل مثلثی، نوع المان، اندازه المان، تعداد المان‌ها و مشخصات مصالح یکسان بوده و تنها تفاوت میان مدل‌ها، جهت‌گیری هندسی المان نسبت به مسیر مورد انتظار گسترش ترک است. از این‌رو، مقایسه نتایج این سه مدل، اثر مستقل جهت‌گیری المان بر ظرفیت شکست، مسیر گسترش ترک و رفتار پس از اوج را نشان داد. شکل ۶ انواع مدل‌های عددی، نحوه المان‌بندی و شرایط مرزی اعمال‌شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۶. هندسه، آرایش‌های مختلف المان‌بندی، شرایط مرزی و نحوه اعمال بارگذاری در مدل‌های عددی آزمون بیرون کشیدگی انکربولت

Figure 6. Geometry, mesh configurations, boundary conditions, and loading arrangement of the numerical anchor pull-out models

لازم به ذکر است که در مدل مبتنی بر اجزای محدود محیط پیوسته^۵، با توجه به مشاهده گسترش ناحیه کرنش‌های پلاستیک در راستای افقی (محور x) و توسعه آن در فاصله‌ای فراتر از مقدار $(1/\Delta h_{ef})$ مشخص شد که در این حالت احتمال تأثیرگذاری مرزهای جانبی بر میدان تنش - کرنش و روند گسیختگی وجود دارد. از این‌رو، به‌منظور کاهش اثرات مرزی و اطمینان از مستقل بودن پاسخ عددی از ابعاد مدل، فاصله مرکز انکربولت تا مرزهای جانبی در این مدل به مقدار (Δh_{ef}) افزایش داده شد

² Structured Quadrilateral Mesh, 0°

³ Triangular Mesh Parallel to the Expected Crack Direction, $+45^\circ$

⁴ Triangular Mesh Antiparallel to the Expected Crack Direction, -45°

⁵ Randomly Oriented Triangular Mesh

¹ Continuum finite element model

و تحلیل‌های عددی بر اساس این هندسه اصلاح‌شده انجام پذیرفت. تحلیل‌های عددی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ANSYS APDL 2024 R2 و به‌صورت استاتیکی غیرخطی انجام شد. با توجه به غیرخطی بودن رفتار مصالح و حضور فصل مشترک‌های چسبنده، تحلیل از نوع غیرخطی مادی در نظر گرفته شد. فرآیند حل با استفاده از روش نیوتن - رافسون اصلاح‌شده انجام گرفت و به‌منظور افزایش پایداری عددی و بهبود همگرایی در مراحل آغاز آسیب و گسترش ترک، راهبرد جستجوی خطی نیز در طول تحلیل فعال گردید. بارگذاری به‌صورت کنترل جابه‌جایی اعمال شد تا امکان دنبال کردن رفتار پس از اوج و شاخه نرم‌شوندگی منحنی بار - تغییرمکان فراهم شود. همچنین، برای کنترل دقت حل، معیارهای همگرایی نیرو و جابه‌جایی به‌طور هم‌زمان فعال شدند و هر گام بارگذاری تنها زمانی همگرا تلقی شد که هر دو معیار در حدود خطای مجاز ارضا شوند. در تمامی تحلیل‌ها، تنظیمات حل، شرایط مرزی، مشخصات مصالح و گام‌های بارگذاری ثابت نگه‌داشته شد و تنها آرایش المان به‌عنوان متغیر اصلی مطالعه تغییر یافت تا اثر مستقل جهت‌گیری المان بر ظرفیت شکست و مسیر گسترش ترک مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳-۱- مدل عددی با المان‌بندی چهارگره‌ی منظم^۱ (مربعی)

همان‌گونه که در شکل ۹-الف ملاحظه می‌شود، در مدل مربعی انتظار می‌رود مسیر ترک امکان پیشروی نسبتاً پیوسته در راستای عمودی (محور y) و همچنین حرکت مایل مطابق مکانیزم گسیختگی مورد انتظار را داشته باشد. با این حال، به‌دلیل ساختار مربعی و هم‌راستای شبکه با محورها، مسیر پیشروی ترک به‌صورت عددی به لبه‌های المان محدود شده و امکان حرکت آزادانه در جهت عمودی و مایل به‌صورت مستقیم فراهم نمی‌شود. در نتیجه، ترک ناگزیر به‌صورت پله‌ای^۲ و از طریق ترکیب حرکت‌های افقی و سپس عمودی توسعه می‌یابد تا در نهایت بتواند مسیر کلی قائم - مایل را بازتولید کند. این محدودیت توپولوژیکی در المان‌بندی مربعی، موجب ایجاد سختی عددی کاذب در برابر گسترش ترک و در پی آن افزایش غیرواقعی ظرفیت شکست محاسبه‌شده می‌شود، به‌گونه‌ای که مقدار ظرفیت به‌دست‌آمده از این مدل به‌طور محسوسی بزرگ‌تر از مقدار آزمایشگاهی [۱۲] ارزیابی شد (۳۷ درصد بیشتر از ظرفیت واقعی). علاوه بر این، الگوی ترک حاصل نیز از حالت فیزیکی فاصله گرفته و به‌صورت غیرواقعی و با مسیر پله‌ای گسترش یافت. بر اساس هندسه مسیر ترک به‌دست‌آمده در این مدل، زاویه میانگین ترک نسبت به افق حدود 19° درجه محاسبه شد.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{60}{171}\right) = 19^\circ \quad (2)$$

این مقدار به‌طور معنی‌داری از زاویه ترک مورد انتظار بر اساس فرضیه‌های آیین‌نامه‌ای (حدود 35°) فاصله دارد و نشان داد که وابستگی مسیر ترک به جهت‌گیری المان در مدل مربعی می‌تواند منجر به خطای قابل توجه در پیش‌بینی همزمان مسیر ترک ظرفیت شکست شود.

۳-۲- مدل عددی با المان‌بندی مثلثی خلاف‌راستا با مسیر مورد انتظار ترک^۳ (غیرموازی)

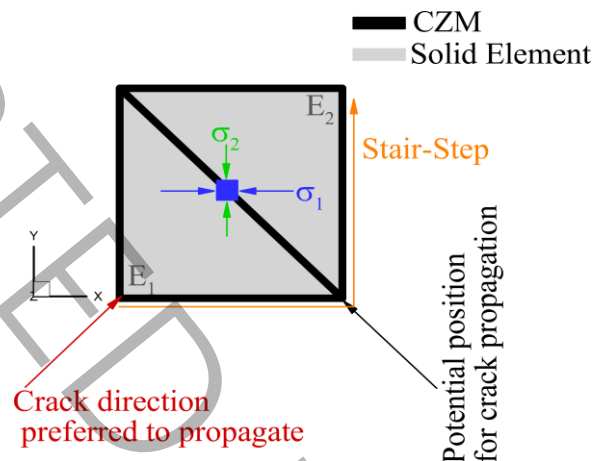
در مدل غیرموازی الگوی کلی رفتار و نحوه گسترش ترک، تا حد زیادی مشابه با مدل مربعی مشاهده شد. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مسیر ترک تمایل دارد در راستای بردار قطری غالب شبکه پیشروی کند؛ با این حال، به‌دلیل عدم هم‌راستایی سطوح چسبنده با مسیر غالب مورد انتظار ترک و در نتیجه فقدان امکان جدایش تدریجی و کنترل‌شده در فصل مشترک المان‌ها، شرایط لازم برای گسترش پیوسته ترک در راستای ترجیحی فراهم نشد. در چنین حالتی، مؤلفه‌های تنش اصلی در قطر متقاطع شبکه عمدتاً به‌صورت فشاری ظاهر شده و مانع از بازشدگی مستقیم ترک در آن راستا می‌شوند. بر این اساس، همانند مدل مربعی، مسیر ترک در این آرایش نیز به‌صورت پله‌ای و با ترکیب جابه‌جایی‌های متناوب افقی - عمودی

¹ Structured Quadrilateral Mesh, 0°

² stair-step

³ Triangular Mesh Antiparallel to the Expected Crack Direction, -45°

توسعه یافت. با این وجود، به دلیل وجود لغزش‌های محدود در فصل مشترک المان‌ها و ناهم‌راستایی نسبی شبکه با مسیر غالب ترک، سختی عددی کاذب نسبت به مدل مربعی اندکی کاهش یافت و در نتیجه مقدار ظرفیت نهایی پیش‌بینی‌شده در مدل غیرموازی کمتر از مدل مربعی و به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر ارزیابی شد. با وجود این بهبود نسبی، ظرفیت شکست محاسبه‌شده همچنان دارای بیش‌برآورد است و حدود ۱۵ درصد بیشتر از مقدار به‌دست‌آمده از آزمون تجربی [۱۲] گزارش شد. این اختلاف نشان داد اگرچه ناهم‌راستایی شبکه می‌تواند تا حدی وابستگی مسیر ترک به المان را کاهش دهد، اما در غیاب مدل‌های چسبنده و مکانیزم‌های جدایش تدریجی، استقلال کامل پاسخ از جهت‌گیری المان حاصل نشده و خطای سیستماتیک در پیش‌بینی ظرفیت نهایی باقی می‌ماند.



شکل ۷. تنش معادل در نقطه‌ای منتخب از مدل با المان‌بندی مثلثی خلاف‌راستا با مسیر مورد انتظار گسترش ترک

Figure 7. Equivalent stress at a selected location in the model with a Triangular Mesh Antiparallel to the Expected Crack Direction, -45°

۳-۳- مدل عددی با المان‌بندی المان مثلثی هم‌راستا با مسیر مورد انتظار ترک^۱ (موازی)

در مدل موازی، تمامی المان‌های چسبنده با زاویه تقریبی 45° درجه نسبت به افق آرایش یافتند. در این پیکربندی، محل المان‌های چسبنده به‌طور کامل با مسیر بالقوه گسترش ترک هم‌راستا در نظر گرفته شد؛ از این‌رو، امکان جدایش و پیشروی ترک در راستای غالب بدون ایجاد مقاومت عددی اضافی فراهم شد. در نتیجه، ظرفیت شکست پیش‌بینی‌شده در این مدل عددی با مقدار به‌دست‌آمده از آزمون تجربی [۱۲] تقریباً منطبق بوده و میزان اختلاف کمتر از ۲ درصد گزارش شد که بیانگر دقت بالای این آرایش در برآورد ظرفیت نهایی است. با وجود این انطباق مناسب در نقطه اوج، به دلیل هم‌جهتی کامل تمامی نواحی بالقوه گسترش ترک، رفتار مدل در ناحیه نرم‌شوندگی نمودار بار - تغییرمکان با شیبی تندتر از نتایج آزمایشگاهی [۱۲] مشاهده شد. این موضوع نشان می‌دهد که در این آرایش، فرآیند تخریب پس از اوج به‌صورت متمرکزتر و با اتلاف انرژی کمتر در مقایسه با رفتار واقعی رخ می‌دهد؛ به عبارت دیگر، پراکندگی مسیرهای شکست که در نمونه آزمایشگاهی وجود دارد، در این مدل تا حدی محدود شد. بر اساس هندسه ترک به‌دست‌آمده، زاویه کلی مسیر ترک نسبت به افق حدود $(24/6^\circ)$ درجه محاسبه شد، که اگرچه از زاویه آیین‌نامه‌ای مورد انتظار [۲۶] فاصله دارد، اما به دلیل هم‌راستایی شبکه با مسیر غالب ترک، پیش‌بینی ظرفیت نهایی با دقت قابل قبولی حاصل شده است. این نتایج نشان داد که هم‌جهتی کامل المان با مسیر ترک می‌تواند دقت برآورد ظرفیت را افزایش دهد، اما ممکن است به اغراق در شیب نرم‌شوندگی و کاهش واقع‌گرایی توزیع آسیب منجر شود.

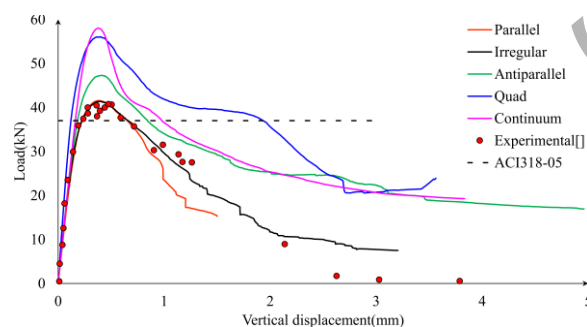
¹ Triangular Mesh Parallel to the Expected Crack Direction, $+45^\circ$

۴-۳- مدل عددی با المان بندی مثلثی و جهت گیری تصادفی^۱ (نامنظم)

در مدل عددی با المان بندی کاملاً نامنظم، مقدار ظرفیت شکست بیشینه با خطای کمتر از ۱ درصد نسبت به نتایج تجربی [۱۲] به دست آمد. علاوه بر این، در ناحیه نرم شوندگی نمودار بار - تغییر مکان نیز، به دلیل آنکه مسیر ترک ناگزیر است در میان المان هایی با راستاهای متنوع و غیر هم جهت پیشروی کند، رفتار عددی حاصل از نظر شکل منحنی و نرخ افت بار، انطباق بسیار مناسبی با پاسخ آزمایشگاهی [۱۲] نشان داد. این هم خوانی بیانگر آن است که در آرایش نامنظم، پراکندگی و چند مسیره بودن مکانیزم شکست که در رفتار واقعی مصالح شبه ترد مشاهده می شود، به صورت مؤثرتری باز تولید شد. زاویه کلی مسیر ترک نسبت به افق در این مدل حدود $33/9^\circ$ درجه محاسبه شد که به مقدار گزارش شده در نتایج آزمایشگاهی 32° درجه [۱۲] و نیز به مقدار پیشنهادی آیین نامه ACI 318-05 (حدود 35° درجه) بسیار نزدیک ارزیابی می شود. این نزدیکی در پیش بینی همزمان زاویه ترک و ظرفیت نهایی نشان داد که وابستگی پاسخ عددی به جهت گیری شبکه در این آرایش به حداقل رسیده و استقلال نسبی مسیر ترک از المان بندی حاصل شده است. بر این اساس، در مدل هایی که هدف اصلی آن ها پیش بینی دقیق مسیر و گسترش ترک است، توصیه می شود المان بندی تکه ای با توزیع کاملاً تصادفی زوایا تولید شود تا سختی عددی کاذب ناشی از هم راستایی شبکه کاهش یافته و نتایج حاصل، از نظر ظرفیت شکست، شیب نرم شوندگی و زاویه ترک، بیشترین انطباق با داده های آزمایشگاهی را نشان دهند.

۵-۳- مدل عددی با المان بندی مبتنی بر اجزای محدود محیط پیوسته^۲ (پیوسته)

در مدل مبتنی بر اجزای محدود محیط پیوسته، با به کارگیری سطح تسلیم منتری - ویلام به همراه با قانون نرم شوندگی مصالح (بخش ۲-۲)، مقدار ظرفیت شکست بیشینه به طور قابل توجهی بیش برآورد شد و حدود ۴۲ درصد بیشتر از مقدار به دست آمده از آزمون تجربی [۱۲] محاسبه شد. این اختلاف قابل ملاحظه بیانگر آن است که در چارچوب مدل پیوسته، تمرکز و موضعی شدن شکست به صورت فیزیکی باز تولید نشده و انرژی شکست در ناحیه وسیع تری توزیع می شود. بررسی میدان کرنش های پلاستیک نشان داد که در مراحل اولیه بار گذاری، ناحیه تسلیم به صورت غالب در راستای افقی گسترش یافته و سپس با افزایش بار، مسیر آن به تدریج به سمت بالا تغییر جهت می دهد. در نتیجه، ناحیه گسیختگی شبیه سازی شده به صورت مخروط بتن در این مدل به مراتب بزرگ تر از مقدار مشاهده شده در آزمایش [۱۲] به دست آمد. همچنین زاویه کلی مخروط شکست نسبت به افق حدود 15° درجه برآورد شد که فاصله قابل توجهی با مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی های آیین نامه ای دارد. این نتایج نشان داد که در مدل پیوسته، به دلیل عدم وجود سطوح گسستگی صریح و وابستگی پاسخ به پارامترهای نرم شوندگی، پدیده پهن شدگی ناحیه آسیب رخ داده و تمرکز تنش - کرنش در مسیر واقعی ترک به درستی باز تولید نمی شود؛ امری که منجر به بزرگ نمایی ظرفیت نهایی و کاهش دقت در پیش بینی زاویه و ابعاد مخروط گسیختگی می گردد. نمودار بار - تغییر مکان مدل های عددی مختلف در شکل ۸ و الگوی گسیختگی مدل های عددی مختلف در شکل ۹ ارائه شده است.

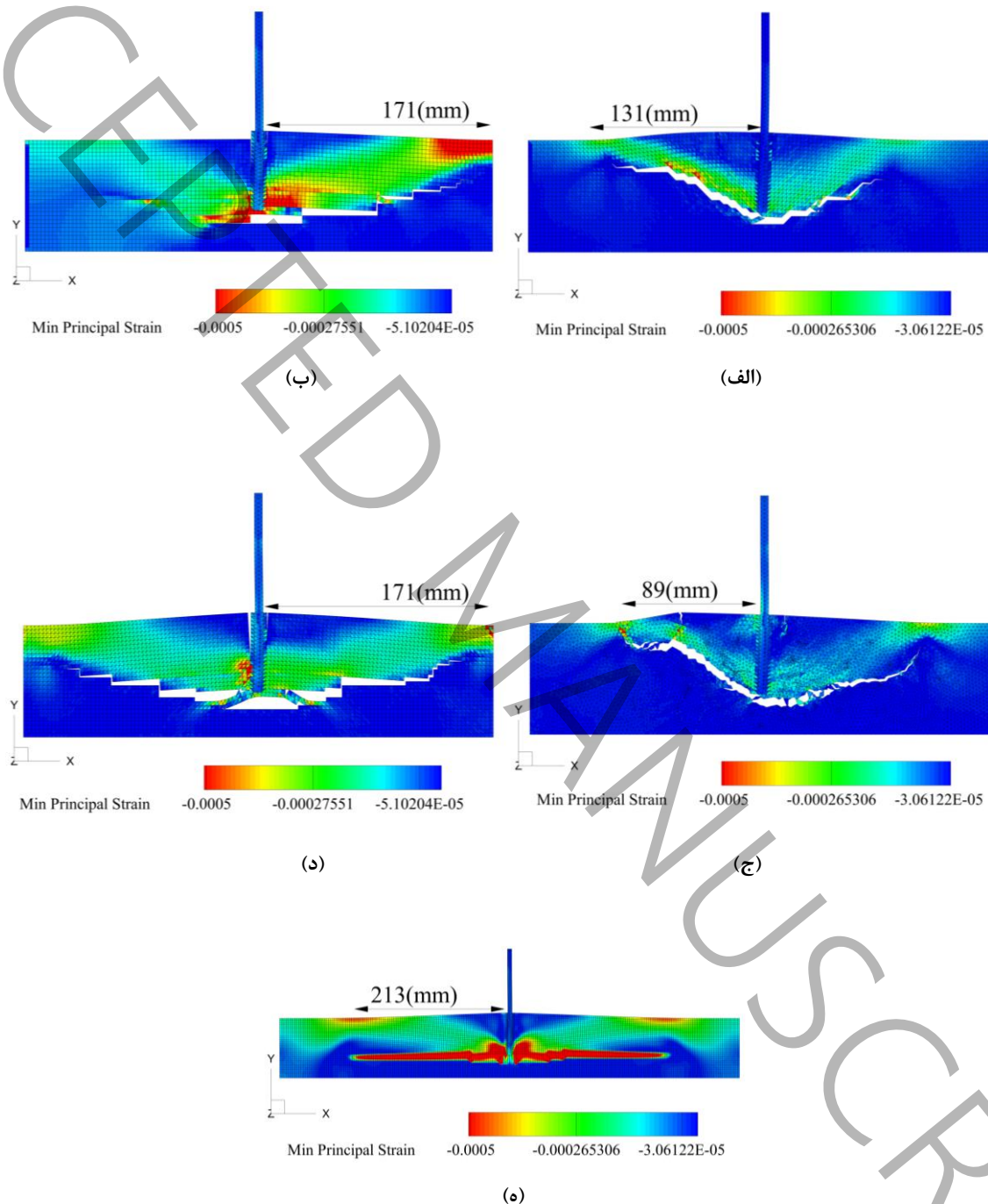


² Randomly Oriented Triangular Mesh

¹ Continuum finite element model

شکل ۸. مقایسه منحنی‌های بار-جابجایی مدل‌های عددی با آرایش‌های مختلف المان‌بندی و مدل اجزای محدود محیط پیوسته با نتایج آزمایش بیرون کشیدگی انکربولت [۱۲]

Figure 8. Comparison of load–displacement curves from the numerical models with different mesh configurations and the Continuum Finite Element Model against the experimental anchor pull-out results



شکل ۹. مقایسه الگوی تشکیل مخروط گسیختگی بتن در مدل‌های عددی (الف) المان‌بندی چهارضلعی منظم (ب) المان‌بندی مثلثی خلاف راستا با مسیر مورد انتظار ترک، با جهت‌گیری غالب منفی ۴۵ درجه (ج) المان‌بندی مثلثی هم‌راستا با مسیر مورد انتظار ترک، با جهت‌گیری غالب مثبت ۴۵ درجه (د) المان‌بندی مثلثی با جهت‌گیری تصادفی (ه) مدل اجزای محدود محیط پیوسته

Figure 9. Comparison of concrete breakout cone formation in the numerical models: (a) Structured Quadrilateral Mesh, 0°, (b) Triangular Mesh Antiparallel to the Expected Crack Direction, -45°, (c) Triangular Mesh Parallel to

۴- نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصل از صحت سنجی مدل عددی با استفاده از آزمون بیرون کشیدگی میلگرد از بتن و مقایسه پاسخ مدل های مختلف المان بندی، مشخص شد که نوع و جهت گیری المان در روش المان بندی تکه ای تأثیر تعیین کننده ای بر پیش بینی ظرفیت شکست، مسیر گسترش ترک و شیب ناحیه نرم شوندگی منحنی بار - تغییر مکان دارد.

۱- در مدل مربعی، به دلیل راستای قائم - افقی المان ها، مسیر ترک به صورت پله ای و غیر واقعی توسعه یافته و زاویه ترک حدود ۱۹° درجه نسبت به افق به دست آمد که فاصله قابل توجهی با مقدار آزمایشگاهی و آیین نامه ای داشت. این محدودیت هندسی منجر به بیش برآورد ظرفیت نهایی و افزایش مقاومت عددی کاذب شد.

۲- در مدل غیر موازی، اگرچه ناهم راستایی نسبی شبکه موجب کاهش اندک مقاومت عددی گردید، اما به دلیل نبود مکانیزم جدایش چسبنده، الگوی ترک همچنان پله ای باقی ماند و ظرفیت شکست حدود ۱۷/۵ درصد بیشتر از مقدار آزمایشگاهی [۱۲] محاسبه شد.

۳- در مدل موازی به واسطه هم راستایی کامل المان های چسبنده با مسیر بالقوه ترک، ظرفیت بیشینه با خطای کمتر از ۲ درصد نسبت به نتایج تجربی پیش بینی شد؛ با این حال، به دلیل هم جهتی کامل سطوح بالقوه گسیختگی، شیب ناحیه نرم شوندگی تندتر از رفتار واقعی ارزیابی شد و زاویه کلی ترک حدود ۲۴/۶° درجه محاسبه گردید که اگرچه ظرفیت را به خوبی باز تولید کرد، اما در باز نمایی توزیع انرژی شکست محدودیت هایی را نشان داد.

۴- بیشترین انطباق هم زمان در پیش بینی ظرفیت نهایی، شکل منحنی نرم شوندگی و زاویه ترک در مدل نامنظم مشاهده شد؛ به گونه ای که ظرفیت بیشینه با خطای کمتر از ۱ درصد و زاویه ترک حدود ۳۳/۹° درجه به دست آمد که با مقدار آزمایشگاهی [۱۲] (۳۲° درجه) و مقدار پیشنهادی آیین نامه ACI 318-05 (حدود ۳۵° درجه) هم خوانی بسیار مناسبی داشت. این نتایج بیانگر آن است که توزیع تصادفی راستاهای المان، وابستگی مسیر ترک به جهت گیری شبکه را به حداقل رسانده و امکان شکل گیری مسیر طبیعی شکست را فراهم می سازد.

۵- در مدل پیوسته مبتنی بر محیط پیوسته و سطح تسلیم منتری - ویلام با نرم شوندگی، ظرفیت شکست حدود ۴۲ درصد بیش برآورد شد و ناحیه کرنش های پلاستیک در ابتدا به صورت افقی و سپس مایل گسترش یافت. در این مدل، مخروط گسیختگی به مراتب بزرگ تر از مقدار آزمایشگاهی [۱۲] شبیه سازی شد و زاویه شکست حدود ۱۵° درجه نسبت به افق به دست آمد که نشان دهنده پهن شدگی ناحیه آسیب و فقدان تمرکز موضعی شکست در چارچوب پیوسته است. در مجموع، نتایج کمی و کیفی نشان می دهد که برای تحلیل دقیق گسترش ترک و پیش بینی واقع گرایانه ظرفیت شکست در مسائل بیرون کشیدگی انکربولت ها، استفاده از المان بندی تکه ای با توزیع تصادفی زوایا نسبت به آرایش های منظم یا مدل های پیوسته برتری محسوسی دارد. این رویکرد با کاهش مقاومت عددی کاذب، بهبود پیش بینی زاویه ترک و باز تولید صحیح شیب نرم شوندگی، بیشترین انطباق را با داده های آزمایشگاهی و ضوابط آیین نامه ای فراهم می سازد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

مدول الاستیسیته بتن	E_c
مدول الاستیسیته فولاد	E_s
مقاومت فشاری بتن	f'_c
مقاومت کششی بتن	f_t
انرژی شکست	G_f
مقدار انرژی جذب شده در راستای نرمال	G_I
نرخ رهایی انرژی بحرانی در کشش	G_{IC}

G_{II}	مقدار انرژی جذب شده در راستای نرمال
G_{III}	نرخ رهایی انرژی بحرانی در برش
h_{ef}	عمق مهاری
$\bar{N}_b$	ظرفیت شکست اتصال
R_b	مقاومت فشاری دو محوره
R_c	مقاومت کششی تک محوره
R_t	مقاومت کششی تک محوره

علائم یونانی

δ_n	جدایش الان تماسی در راستای برشی
δ_n^0	مقدار اولین جدایش نرمال
δ_t	جدایش الان تماسی در راستای نرمال
δ_t^0	مقدار اولین جدایش برشی
θ	زاویه
ξ	تنش هیدرواستاتیک
ρ	تانسور تنش انحرافی
σ	تنش نرمال
σ_y	تنش تسلیم
σ_0	تنش تسلیم اولیه
$\bar{\sigma}$	مقاومت کششی المان تماسی
τ	تنش برش
$\bar{\tau}$	مقاومت برشی المان تماسی
τ_f	تنش برشی بحرانی

پیوست الف - الگوریتم تولید خودکار مدل گسسته در روش المان بندی تکه‌ای

الف-۱- کلیات و دامنه‌ی توسعه یافته

در این پژوهش، حل گر اجزای محدود و فرمول بندی مدل های رفتاری مصالح توسط نویسندگان توسعه داده نشده است. سطح تسلیم منتری - ویلام برای بتن، سطح تسلیم ون میسز با قانون سخت شونده گی و^۱که برای فولاد، قانون دوخطی تنش - جدایش مدل ناحیه چسبنده، اصطکاک کولمب، فرمول بندی المان های تماسی سطح به سطح و الگوریتم حل غیرخطی نیوتن - رافسون اصلاح شده، همگی از قابلیت های استاندارد نرم افزار ANSYS Mechanical APDL R2 2024 هستند.

سهم توسعه ای نویسندگان منحصراً یک کد پیش پردازش است که الگوریتم المان بندی تکه ای را به صورت خودکار بر یک مدل پیوسته اولیه اعمال کرده و فایل ورودی مدل گسسته را تولید می کند. وظیفه این کد شامل استخراج توپولوژی المان بندی، شناسایی اضلاع داخلی مشترک، تکثیر گره ها، بازتعریف اتصال پذیری المان های حجمی، کنترل جهت بردار نرمال سطوح، حذف جفت های تماسی تکراری و تولید خودکار جفت های هدف - تماس^۱ به همراه تخصیص قانون ناحیه چسبنده است. هیچ رابطه رفتاری یا الگوریتم حلی در این کد بازنویسی نشده است.

کل فرایند شامل تولید هندسه، تعریف مصالح، المان بندی اولیه، گسسته سازی، اعمال شرایط مرزی و بارگذاری کنترل جابه جایی، تنظیمات حل غیرخطی و پس پردازش - به صورت کدنویسی شده و در قالب فایل های ورودی و ماکروهای APDL و در حالت اجرای دسته ای انجام شده است. از محیط گرافیکی نرم افزار صرفاً برای مشاهده کیفی نتایج استفاده شده است. این نکته تضمین می کند که پنج مدل مورد مطالعه از هر نظر جز جهت گیری المان کاملاً یکسان اند و اختلاف نتایج، ناشی از خطای انسانی در ساخت دستی مدل ها نیست.

¹ Target-Contact

الف-۲- نمادگذاری و ساختمان داده

مدل پیوسته اولیه شامل مجموعه گره‌های N و مجموعه المان‌های E است. برای گره i ، بردار مختصات به صورت رابطه (الف-۱) تعریف می‌شود:

$$X_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (\text{الف-۱})$$

توپولوژی هر المان دوبعدی به صورت یک مجموعه مرتب از شماره گره‌های آن ذخیره می‌شود؛ برای یک المان چهارگره‌ای مطابق رابطه (الف-۲) و برای المان سه‌گره‌ای به صورت مشابه با سه گره:

$$E^{(e)} = [n_1^{(e)}, n_2^{(e)}, n_3^{(e)}, n_4^{(e)}] \quad (\text{الف-۲})$$

و مجموعه اضلاع هر المان از رابطه (الف-۳) به دست می‌آید:

$$S^{(e)} = \{(n_1, n_2), (n_2, n_3), (n_3, n_4), (n_4, n_1)\} \quad (\text{الف-۳})$$

الف-۳- گام‌های الگوریتم

در ادامه، شرح تفصیلی هر گام آورده می‌شود.

گام ۱- تولید مدل پیوسته اولیه

هندسه نمونه، مشخصات مصالح، شرایط مرزی و المان‌بندی اولیه به صورت پیوسته و با استفاده از المان جامد سازه‌ای دوبعدی با دو درجه آزادی انتقالی در هر گره ایجاد می‌شود. در این مرحله، آرایش و جهت‌گیری المان‌ها به عنوان تنها متغیر مستقل مطالعه تعیین می‌گردد (بند الف-۶).

گام ۲- استخراج فهرست گره‌ها و مختصات

شماره و مختصات تمامی گره‌های مدل پیوسته استخراج و در یک آرایه با ابعاد $N \times 2$ ذخیره می‌شود. این آرایه مبنای تکثیر گره‌ها در گام ۶ قرار می‌گیرد.

گام ۳- استخراج اتصال‌پذیری و تشکیل مجموعه اضلاع

اتصال‌پذیری هر المان مطابق رابطه (الف-۲) استخراج و مجموعه اضلاع آن مطابق رابطه (الف-۳) تشکیل می‌شود. خروجی این گام، فهرستی از تمامی اضلاع مدل به همراه شماره المان مالک هر ضلع است.

گام ۴- مرتب‌سازی شماره گره‌های هر ضلع و تشکیل کلید یکتا

یک ضلع مشترک میان دو المان مجاور، در فهرست اضلاع هر المان با ترتیب شماره‌گذاری متفاوتی ظاهر می‌شود. برای آنکه تطبیق اضلاع مستقل از جهت شماره‌گذاری انجام شود، برای هر ضلع یک کلید مرتب‌شده مطابق رابطه (الف-۴) تعریف می‌گردد:

$$k_{ij} = (\min(n_i, n_j), \max(n_i, n_j)) \quad (\text{الف-۴})$$

گام ۵- شناسایی اضلاع داخلی مشترک

چنانچه یک کلید یکسان به دو المان متفاوت تعلق داشته باشد، ضلع متناظر به عنوان فصل مشترک داخلی شناسایی می‌شود (رابطه الف-۵). اضلاعی که تنها به یک المان تعلق دارند، مرز خارجی مدل را تشکیل می‌دهند و گسسته نمی‌شوند:

$$k_{ij} \in S^{(e_1)} \cap S^{(e_2)} \quad (\text{الف-۵})$$

گام ۶- تکثیر گره‌ها و بازتعریف اتصال‌پذیری

برای حذف پیوستگی سینماتیکی مستقیم میان المان‌های مجاور، گره‌های واقع بر فصل مشترک‌های داخلی تکثیر می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که هر المان حجمی مجموعه گره‌های منحصربه‌فرد خود را داشته باشد. مختصات گره‌های تکثیرشده برابر مختصات گره اصلی باقی می‌ماند، اما شماره گره و در نتیجه درجات آزادی آن‌ها مستقل می‌شود (رابطه الف-۶):

$$n_i^{(e_1)} \neq n_i^{(e_2)}, X_i^{(e_1)} + X_i^{(e_2)} = X_i \quad (\text{الف-۶})$$

در نتیجه، ضخامت هندسی فصل مشترک در وضعیت اولیه برابر صفر است، اما پس از آغاز بارگذاری، دو سطح مجاور می‌توانند جابه‌جایی نسبی مستقل داشته باشند. بردار پرش جابه‌جایی و مولفه‌های آن در دستگاه مختصات محلی فصل مشترک از روابط (الف-۷) و (الف-۸) به‌دست می‌آید:

$$u = u^+ - u^- \quad (\text{الف-۷})$$

$$\delta_n = u \cdot n \quad (\text{الف-۸})$$

$$\delta_s = u \cdot t$$

پس از تکثیر گره‌ها، اتصال‌پذیری تمامی المان‌های حجمی با شماره گره‌های جدید بازنویسی می‌شود. برای یک المان‌بندی با تعداد المان N_e و تعداد گره در هر المان n_{ne} ، تعداد کل گره‌های مدل گسسته برابر است با حاصل ضرب این دو مقدار؛ برای نمونه در المان‌بندی مثلثی، تعداد گره‌های مدل گسسته سه برابر تعداد المان‌ها است.

گام ۷- ایجاد جفت سطوح هدف - تماس و کنترل بردار نرمال

برای هر ضلع داخلی شناسایی‌شده در گام ۵، یک جفت سطح هدف - تماس با هندسه کاملاً منطبق ایجاد می‌شود. بردارهای واحد مماسی و نرمال هر ضلع از روابط (الف-۹) و (الف-۱۰) محاسبه می‌گردند؛ در این روابط اندیس‌های ۱ و ۲ به گره‌های ابتدا و انتهای ضلع اشاره دارند:

$$L_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (\text{الف-۹})$$

$$t = \frac{1}{L_{ij}} \begin{bmatrix} x_j - x_i \\ y_j - y_i \end{bmatrix} \quad (\text{الف-۱۰})$$

جهت بردار نرمال هر سطح به‌گونه‌ای کنترل می‌شود که به سمت خارج المان مالک باشد؛ در غیر این صورت، الگوریتم تماس در وضعیت اولیه نفوذ کاذب گزارش کرده و همگرایی مختل می‌شود. همچنین از آنجا که هر ضلع داخلی به دو المان تعلق دارد، در گام ۵ به‌ازای هر فصل مشترک دو بار شناسایی صورت می‌گیرد؛ لذا پیش از تولید جفت‌های تماسی، فهرست کلیدها پالایش شده و جفت‌های تکراری حذف می‌شوند تا از تعریف دوباره یک فصل مشترک و ایجاد سختی مضاعف جلوگیری شود.

گام ۸- تخصیص قانون ناحیه چسبنده و اصطکاک

به هر جفت تماسی، مدل ناحیه چسبنده با قانون دوخطی تنش - جدایش به‌همراه اصطکاک کولمب تخصیص می‌یابد. پیش از آغاز آسیب، فصل مشترک انتقال پیوسته تنش را فراهم می‌کند و پس از رسیدن تنش به معیار آغاز آسیب، جدایش نرمال و لغزش مماسی بر اساس رابطه (الف-۱۱) محاسبه می‌شود:

$$T = \begin{bmatrix} T_n \\ T_s \end{bmatrix} = (1-D) \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \end{bmatrix} \quad (\text{الف-۱۱})$$

که در آن K_n و K_t به‌ترتیب سختی‌های اولیه نرمال و برشی فصل مشترک، و d متغیر آسیب است که مقدار آن بین صفر و یک تغییر می‌کند؛ در وضعیت سالم برابر صفر و پس از جدایش کامل برابر یک است. جدایش متناظر با جدایش کامل از انرژی شکست مود اول و تنش بیشینه نرمال، مطابق رابطه (الف-۱۲) تعیین می‌شود:

$$G_I = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_{nc} \Rightarrow \delta_{nc} = \frac{2G_I}{\sigma_{\max}} \quad (\text{الف-۱۲})$$

سختی اولیه فصل مشترک باید به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود تا پیش از آغاز آسیب، نرمی مصنوعی در پاسخ ایجاد نکند؛ و در عین حال نباید چنان بزرگ باشد که به بدحالتی ماتریس سختی و اختلال در همگرایی بینجامد. در این پژوهش، سختی اولیه بر مبنای نسبت تنش بیشینه به یک جدایش مرجع کوچک نسبت به جدایش کامل تعیین شد و استقلال پاسخ از این مقدار با تحلیل حساسیت کنترل گردید.

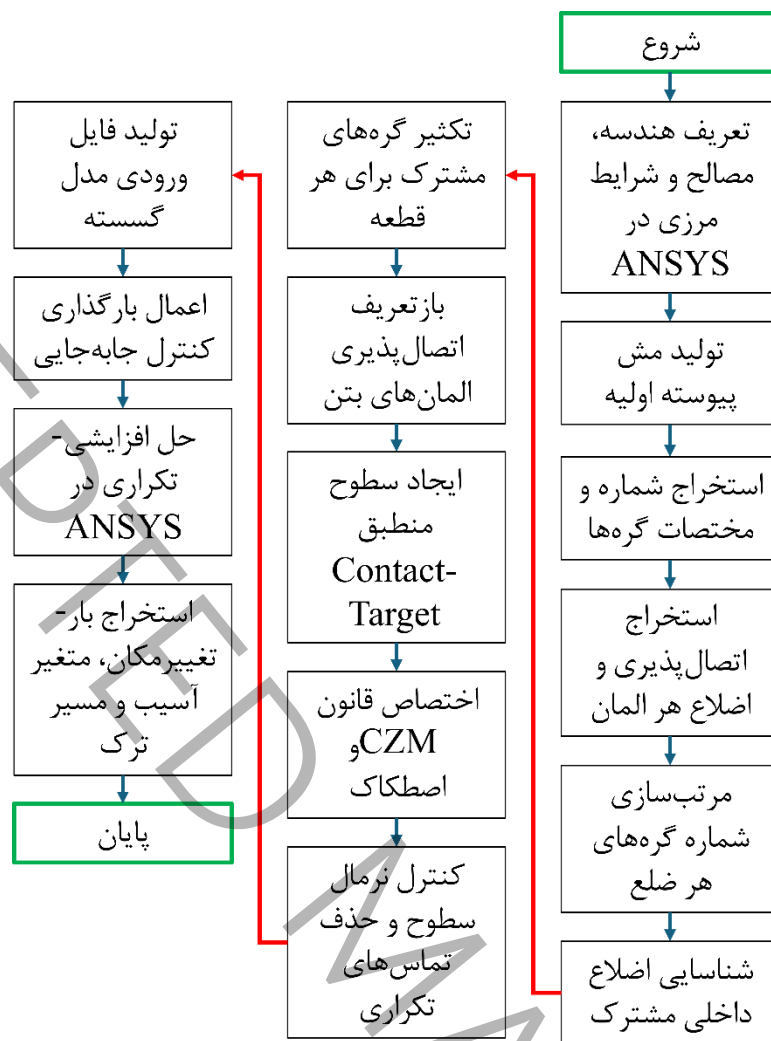
گام ۹- تولید فایل ورودی، بارگذاری و حل

خروجی گام‌های پیشین در قالب یک فایل ورودی APDL نوشته می‌شود که شامل تعریف گره‌های تکثیرشده، اتصال‌پذیری المان‌های حجمی، جفت‌های تماسی و ثابت‌های واقعی متناظر، و تخصیص مدل‌های رفتاری است. سپس شرایط مرزی، بارگذاری کنترل جابه‌جایی، و تنظیمات حل غیرخطی شامل روش نیوتن - رافسون اصلاح‌شده، جستجوی خطی، گام‌بندی خودکار زمانی و معیارهای همگرایی هم‌زمان نیرو و جابه‌جایی اعمال می‌شود. در نهایت، منحنی بار - تغییر مکان، توزیع متغیر آسیب در فصل مشترک‌ها و مسیر ترک استخراج می‌گردد.

الف-۴- شبه‌کد الگوریتم و فلوچارت

```
Input : continuum mesh (node list N , element list E)
Output: fragmented model input file (.inp)

1.  read  Xi = {xi , yi}                for all i in N
2.  read  Ee = {n1 ... nne}            for all e in E
3.  EdgeList = empty
4.  for each element e in E do
5.      for each edge s in Se do
6.          k = ( min(na,nb) , max(na,nb) )    // sorted key
7.          append (k , e) to EdgeList
8.      end for
9.  end for
10. Gamma_int = { k : k appears in EdgeList for two distinct elements }
11. Gamma_ext = { k : k appears in EdgeList for one element only }
12. remove duplicate keys from Gamma_int
13. for each element e in E do          // node duplication
14.     for each node ni in Ee do
15.         create new node n*i with X*i = Xi
16.         replace ni by n*i in Ee
17.     end for
18. end for
19. for each interface k in Gamma_int do
20.     identify the two coincident edges (e_i , e_j)
21.     compute L , t , n                // Eq. (A-9) , (A-10)
22.     orient normal outward w.r.t. owner element
23.     create TARGE / CONTA pair on (e_i , e_j)
24.     assign CZM bilinear law + Coulomb friction
25. end for
26. re-apply boundary conditions on Gamma_ext
27. apply displacement-controlled loading
28. write APDL input file
29. solve (modified Newton-Raphson + line search)
30. post-process: load-displacement, damage variable, crack path
```



شکل پیوست ۱-فلوچارت ساخت مدل عددی و تحلیل

Appendix Figure 1. Flowchart of numerical model development and analysis

الف-۵- ملاحظات پیاده‌سازی

- حذف جفت‌های تکراری: هر فصل مشترک داخلی دو بار در فهرست اضلاع ظاهر می‌شود؛ تعریف نشدن این پالایش منجر به دو برابر شدن سختی فصل مشترک و بیش‌برآورد ظرفیت می‌گردد.
- کنترل جهت بردار نرمال: نرمال هر سطح باید به سمت خارج المان مالک باشد تا نفوذ کاذب اولیه و واگرایی در نخستین گام بارگذاری رخ ندهد.
- اضلاع مرزی: اضلاع متعلق به یک المان (مرز خارجی) گسسته نمی‌شوند و شرایط مرزی پس از تکثیر گره‌ها بر گره‌های جدید متناظر با اعمال می‌گردد.
- فصل مشترک بتن- فولاد: علاوه بر فصل مشترک‌های داخلی بتن، سطح تماس میان بتن و بولت فولادی نیز با همین روند و با پارامترهای چسبندگی مربوط به لایه چسب تعریف می‌شود.
- افزایش درجات آزادی: تکثیر گره‌ها تعداد درجات آزادی مدل را نسبت به مدل پیوسته متناظر افزایش می‌دهد؛ این افزایش هزینه محاسباتی، بهای حذف وابستگی مسیر ترک به پیوستگی سینماتیکی المان‌ها است.

الف-۶- تولید چهار آرایش المان

برای تولید چهار آرایش مورد مطالعه، تنها گام ۱ الگوریتم تغییر می‌کند و گام‌های ۲ تا ۹ به صورت کاملاً یکسان اجرا می‌شوند. بدین ترتیب، نوع المان، اندازه المان، مشخصات مصالح، پارامترهای فصل مشترک، شرایط مرزی، گام‌های بارگذاری و تنظیمات حل در تمامی مدل‌ها ثابت نگه داشته می‌شود و تنها متغیر مستقل، جهت‌گیری هندسی المان نسبت به مسیر مورد انتظار گسترش ترک است:

- مدل مربعی: المان‌های چهارگرمی با آرایش قائم - افقی و راستای اضلاع در امتداد محورهای مختصات.
 - مدل موازی: المان‌های مثلثی منظم با زاویه غالب مثبت ۴۵ درجه نسبت به افق، هم‌راستا با مسیر مورد انتظار ترک.
 - مدل غیرموازی: المان‌های مثلثی منظم با زاویه غالب منفی ۴۵ درجه نسبت به افق، خلاف راستای مسیر مورد انتظار ترک.
 - مدل نامنظم: المان‌های مثلثی با جهت‌گیری تصادفی و بدون راستای غالب.
- مدل پنجم، یعنی مدل مبتنی بر اجزای محدود محیط پیوسته، تنها مدلی است که گام‌های ۵ تا ۸ در آن اجرا نمی‌شود و مدل در وضعیت پیوسته اولیه حل می‌گردد.

الف-۷- راستی آزمایی کد پیش‌پردازش

پیش از اجرای تحلیل‌های اصلی، عملکرد کد در سه سطح کنترل شد. نخست، صحت هندسی مدل گسسته با کنترل انطباق مختصات گره‌های تکثیرشده و صفر بودن ضخامت اولیه تمامی فصل مشترک‌ها بررسی گردید. دوم، تعداد جفت‌های تماسی تولیدشده با تعداد اضلاع داخلی محاسبه‌شده به صورت مستقل مقایسه شد تا از نبود جفت تکراری یا جاافتاده اطمینان حاصل شود. سوم، مدل گسسته در وضعیتی که پارامترهای فصل مشترک با مقادیر بسیار بزرگ و بدون فعال‌سازی آسیب تعریف شده بودند تحلیل شد؛ در این حالت پاسخ مدل گسسته با پاسخ مدل پیوسته متناظر در محدوده الاستیک منطبق گردید که نشان‌دهنده نبود نرمی یا سختی مصنوعی ناشی از فرایند گسسته‌سازی است.

افزون بر این، صحت قانون تنش - جدایش تخصیص‌یافته با آزمون‌های تک‌المانی کشش خالص (مود اول) و برش خالص (مود دوم) کنترل شد؛ نتایج این آزمون‌ها در شکل ۵ متن اصلی ارائه شده و سطح زیر منحنی تنش - جدایش عددی با مقدار هدف انرژی شکست مطابقت داشته است.

منابع

- [1] Y. Zhan, G. Meschke, Adaptive Crack Modeling with Interface Solid Elements for Plain and Fiber Reinforced Concrete Structures, Materials, 10(7) (2017).
- [2] A. Permanoon, A.h. Akhaveissy, Failure of existing structures with semi-brittle mechanical properties on meso scale and reduction of computational cost using non-linear topology optimization, Construction and Building Materials, 319 (2022).
- [3] A. Permanoon, A.H. Akhaveissy, An investigation of meso-scale crack propagation process in concrete beams using topology optimization, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(12) (2022) 5281-5306.
- [4] B. Sun, X. Wang, Z. Li, Meso-scale image-based modeling of reinforced concrete and adaptive multi-scale analyses on damage evolution in concrete structures, Computational Materials Science, 110 (2015) 39-53.
- [5] L.A.G. Bitencourt, O.L. Manzoli, Y.T. Trindade, E.A. Rodrigues, D. Dias-da-Costa, Modeling reinforced concrete structures using coupling finite elements for discrete representation of reinforcements, Finite Elements in Analysis and Design, 149 (2018) 32-44.
- [6] L.A.G. Bitencourt, O.L. Manzoli, P.G.C. Prazeres, E.A. Rodrigues, T.N. Bittencourt, A coupling technique for non-matching finite element meshes, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 290 (2015) 19-44.
- [7] S. Tastani, S.J. Pantazopoulou, Behavior of corroded bar anchorages, ACI Structural Journal, 104(6) (2007) 756.
- [8] A.O. Abdelatif, J.S. Owen, M.F.M. Hussein, Modelling the prestress transfer in pre-tensioned concrete elements, Finite Elements in Analysis and Design, 94 (2015) 47-63.
- [9] A.T. Ramirez-Garcia, C.N. Dang, W. Micah Hale, J.R. Marti-Vargas, A higher-order equation for modeling strand bond in pretensioned concrete beams, Engineering Structures, 131 (2017) 345-361.

- [10] B.H. Oh, S.N. Lim, M.K. Lee, S.W. Yoo, Analysis and prediction of transfer length in pretensioned, prestressed concrete members, *ACI Structural Journal*, 111(3) (2014) 549.
- [11] C.N. Dang, C.D. Murray, R.W. Floyd, W. Micah Hale, J.R. Martí-Vargas, Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by Standard Test for Strand Bond, *Engineering Structures*, 72 (2014) 152-159.
- [12] R. Eligehausen, R.A. Cook, J. Appl, Behavior and design of adhesive bonded anchors, *ACI structural journal*, 103(6) (2006) 822.
- [13] K.L. Coogler, K.A. Harries, M. Gallick, Experimental study of offset mechanical lap splice behavior, *ACI Structural Journal*, 105(4) (2008) 478.
- [14] E.A. Rodrigues, O.L. Manzoli, L.A.G. Bitencourt Jr, T.N. Bittencourt, 2D mesoscale model for concrete based on the use of interface element with a high aspect ratio, *International Journal of Solids and Structures*, 94-95 (2016) 112-124.
- [15] E.A. Rodrigues, O.L. Manzoli, L.A.G. Bitencourt Jr, P.G.C.d. Prazeres, T.N. Bittencourt, Failure behavior modeling of slender reinforced concrete columns subjected to eccentric load, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(3) (2015) 520-541.
- [16] A. Permanaon, M. Pouraminian, N. Khorami, S. GanjiMorad, H. Azarkhosh, I. Sadrinejad, S. Pourbakhshian, Improving Mixed-Mode Fracture Properties of Concrete Reinforced with Macrosynthetic Plastic Fibers: An Experimental and Numerical Investigation, *Buildings*, 14(8) (2024).
- [17] L. Macorini, B.A. Izzuddin, A non-linear interface element for 3D mesoscale analysis of brick-masonry structures, *International Journal for numerical methods in Engineering*, 85(12) (2011) 1584-1608.
- [18] B.B. Aydin, K. Tuncay, B. Binici, Overlapping Lattice Modeling for concrete fracture simulations using sequentially linear analysis, *Structural Concrete*, 19(2) (2017) 568-581.
- [19] K.-H. Yang, A. Ashour, Mechanism analysis for concrete breakout capacity of single anchors in tension, (2008).
- [20] S. Cattaneo, Wedge-type expansion anchors in high-performance concrete, *ACI Materials Journal*, 104(2) (2007) 191.
- [21] M. Yazdani, N. Khaji, Development of a new semianalytical approach for 2D analysis of crack propagation problems, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(6) (2018) 1344-1363.
- [22] H. Haeri, A. Khaloo, M.F. Marji, Experimental and numerical analysis of Brazilian discs with multiple parallel cracks, *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8) (2015) 5897-5908.
- [23] H. Haeri, V. Sarfarazi, P. Ebneabbasi, A. Shahbazian, M.F. Marji, A. Mohamadi, XFEM and experimental simulation of failure mechanism of non-persistent joints in mortar under compression, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117500.
- [24] E. Emami Meybodi, S.K. Hussain, M. Fatehi Marji, V. Rasouli, Application of machine learning models for predicting rock fracture toughness mode-I and mode-II, *Journal of Mining and Environment*, 13(2) (2022) 465-480.
- [25] M.F. Marji, H. Yousofian, H. Soltanian, Y. Pourmazaheri, A. Abdollahipour, Superior crack propagation inhibitory effectiveness of MWCNT reinforced SBS toward improving oil/gas well cement integrity, *Construction and Building Materials*, 403 (2023) 133171.
- [26] A. Committee, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05), in, American Concrete Institute, 2005.
- [27] K. Park, G.H. Paulino, Cohesive zone models: a critical review of traction-separation relationships across fracture surfaces, *Applied Mechanics Reviews*, 64(6) (2011) 060802.
- [28] V.P. Nguyen, H. Lian, T. Rabczuk, S. Bordas, Modelling hydraulic fractures in porous media using flow cohesive interface elements, *Engineering Geology*, 225 (2017) 68-82.
- [29] H. Wang, M. Marongiu-Porcu, M.J. Economides, Poroelastic and poroplastic modeling of hydraulic fracturing in brittle and ductile formations, *SPE Production & Operations*, 31(01) (2016) 47-59.
- [30] Z. Chen, A. Bungler, X. Zhang, R.G. Jeffrey, Cohesive zone finite element-based modeling of hydraulic fractures, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22(5) (2009) 443-452.
- [31] T. Belytschko, W.K. Liu, B. Moran, K. Elkhodary, *Nonlinear finite elements for continua and structures*, John Wiley & sons, 2014.
- [32] P. Menetrey, Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 1994.
- [33] P. Menétrey, Synthesis of punching failure in reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, 24(6) (2002) 497-507.
- [34] A. Dmitriev, Y. Novozhilov, D. Mikhalyuk, V. Lalin, Calibration and validation of the Menetrey-Willam constitutive model for concrete, *Stroitel'stvo Unikal'nyh Zdanij i Sooruzenij*, (3) (2020) 1-22.
- [35] C. Chen, O. Kolednik, I. Scheider, T. Siegmund, A. Tatschl, F. Fischer, On the determination of the cohesive zone parameters for the modeling of micro-ductile crack growth in thick specimens, *International journal of fracture*, 120(3) (2003) 517-536.

- [36] N. Simha, F.D. Fischer, G. Shan, C. Chen, O. Kolednik, J-integral and crack driving force in elastic–plastic materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56(9) (2008) 2876-2895.
- [37] A. Permanoon, A.H. Akhaveissy, A computational study of effect of thickness on mild steel fracture, *Advances in Civil Engineering Materials*, 9(1) (2020) 340-357.
- [38] B. Henry, A. Luxmoore, The stress triaxiality constraint and the Q-value as a ductile fracture parameter, *Engineering Fracture Mechanics*, 57(4) (1997) 375-390.

ACCEPTED MANUSCRIPT