



حساسیت سنجی عمق مدفون مهار بر ظرفیت گسیختگی مخروطی مهار در بتن در کشش

سجاد بیژنوند^{۱*}، شاهین بیدمشکی^۲، علی اکبر جهانی تبار^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران. ایمیل: s.bijanvand@iamu.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران. ایمیل: sh.bidmeshki@iamu.ac.ir

۳- دانش آموخته دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. ایمیل: jahanitabar@gmail.com

* نویسنده مسئول

چکیده

مهارهای مدفون در بتن از اجزای مهم در انتقال بارهای کششی از روسازه یا تجهیزات فولادی به فونداسیون بتنی هستند و رفتار آنها به عوامل مختلفی از جمله عمق مؤثر مدفون و مشخصات مکانیکی بتن و فولاد وابسته است. در این پژوهش، رفتار غیرخطی مهارهای مدفون تحت بار کششی با استفاده از روش سه بعدی اجزای محدود بررسی شده است. هدف این مطالعه، ارزیابی تأثیر عمق مؤثر مدفون بر ظرفیت گسیختگی مخروطی مهار در بتن در کشش و بررسی توزیع تنش، توسعه خرابی و شکل گیری گوه گسیختگی بتن است. در این مطالعه ظرفیت گسیختگی مخروطی به دست آمده از شبیه سازی نرم افزاری با ظرفیت محاسبه شده از روابط آیین نامه ای مقایسه شده است. برای این منظور، علاوه بر ظرفیت گسیختگی کششی، کانتورهای خرابی کششی و فشاری و تنش معادل فون میسز در مدل هایی با عمق مدفون های مختلف مهار بررسی شدند. نتایج نشان داد که خرابی کششی ابتدا در مجاورت سرمهار آغاز شده و با افزایش بارگذاری به سمت سطح آزاد بتن گسترش می یابد. در نمونه های دارای گوه گسیختگی مشخص، بیشترین تمرکز تنش در ابتدای سرمهار مشاهده شد. همچنین، با افزایش عمق مؤثر ظرفیت گسیختگی مخروطی مهار به دست آمده از شبیه سازی نسبت به ظرفیت به دست آمده از آیین نامه افزایش یافت.

کلمات کلیدی: مهار در بتن، بار کششی، گوه گسیختگی، خرابی کششی، اجزای محدود

Sensitivity Analysis of Embedment Depth on the Concrete Cone Failure Capacity of Anchors under Tension

Sajad Bijanvand^{1,*}, Shaahin Bidmeshki², Aliakbar Jahanitabar³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran. Email: s.bijanvand@iamu.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran. Email: sh.bidmeshki@iamu.ac.ir

3- PhD graduated, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. Email: jahanitabar@gmail.com

* Corresponding Author

Abstract

Anchors embedded in concrete are critical components for transferring tensile loads from steel superstructures or equipments to concrete foundations, and their behavior depends on various factors, including the effective embedment depth and the mechanical properties of concrete and steel. In this study, the nonlinear behavior of embedded anchors under tensile loading is investigated using the three-dimensional finite element method. This study aims to evaluate the effect of effective embedment depth on the concrete breakout capacity of anchor in tension, as well as to examine stress distribution, damage propagation, and the formation of the concrete breakout cone. The concrete breakout capacity obtained from numerical simulations was compared with the capacity calculated using design code provisions. To this end, in addition to the tensile breakout capacity, tensile and compressive damage contours, along with von Mises equivalent stress distributions, were analyzed from models with different anchor embedment depths. The results revealed that tensile damage initiates adjacent to the anchor head and propagates toward the free concrete surface with increasing load. In specimens exhibiting a distinct



failure cone, the highest stress concentration in concrete was observed adjacent to the head of the anchor. Furthermore, with increasing the effective embedment depth, the concrete breakout capacity obtained from the simulations showed a higher increase compared to the code-predicted capacity.

Keywords: Concrete anchorage, tensile load, failure wedge, tensile failure, finite element method

۱- مقدمه

مهارهای مدفون و میلگردهای سردار از اجزای مهم در انتقال نیروهای کششی بین اجزا و سازه‌های فولادی و زیرسازه‌های بتنی به شمار می‌روند و در انواع اتصالات سازه‌ای، اعضای بتنی و سیستم‌های کف ستون مورد استفاده قرار می‌گیرند. در هنگام اعمال نیروی کششی، انتقال نیرو از سرمه‌ها به بتن موجب ایجاد یک میدان تنش پیچیده در اطراف مهار می‌شود. در صورتی که ظرفیت فولاد مهار کافی باشد، گسیختگی بتن می‌تواند به‌عنوان حالت بحرانی ظاهر شده و با تشکیل ناحیه گسیختگی در اطراف سرمه‌ها، ظرفیت نهایی اتصال را کنترل کند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که این فرآیند تحت تأثیر عوامل هندسی و مکانیکی مختلفی قرار دارد و نمی‌توان رفتار مهار را صرفاً بر اساس مقاومت فولاد ارزیابی کرد (Karmokar et al. 2021).

مکانیزم‌های شکست مهارها در بتن، از گذشته یکی از موضوعات مورد توجه در پژوهش‌های مهندسی سازه بوده است و مطالعات در این خصوص به‌طور نمایی گسترش یافته است (Kang et al. 2010 and Chun, et al. 2007).

یکی از مهم‌ترین حالت‌های گسیختگی مهار تحت کشش، حالت گسیختگی مخروطی بتن با تشکیل گوه یا مخروط گسیختگی است. در این حالت، با افزایش بارگذاری، ترک‌های کششی در ناحیه نزدیک به سرمه‌ها آغاز شده و به سمت سطح آزاد بتن گسترش می‌یابند. توسعه این ترک‌ها در نهایت موجب جدا شدن بخشی از بتن و تشکیل سطح گسیختگی می‌شود. مطالعات عددی سب‌بعدی نشان داده‌اند که شکل و ابعاد واقعی این ناحیه می‌تواند با هندسه ساده‌شده مخروط گسیختگی تفاوت داشته باشد و به پارامترهایی نظیر عمق مدفون و مشخصات مکانیکی بتن وابسته است (Ožbolt, et al. 1999). عمق مؤثر مدفون مهار یکی از پارامترهای اساسی در رفتار کششی مهارها محسوب می‌شود. افزایش این پارامتر ضمن تغییر ظرفیت کششی، می‌تواند بر نحوه گسترش ترک‌ها و ابعاد ناحیه گسیختگی نیز اثرگذار باشد. ازبولت و همکاران با استفاده از تحلیل سب‌بعدی اجزای محدود، رفتار مهارهای با عمق‌های مدفون بسیار زیاد را بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از مدل‌های عددی سب‌بعدی می‌تواند اطلاعات مناسبی درباره رفتار گسیختگی بتن در اطراف مهار فراهم کند (Ožbolt, et al. 2007). همچنین، نتایج مطالعات عددی مبتنی بر مدل خرابی پلاستیسیته نشان داده است که نسبت عمق مدفون به قطر مهار می‌تواند بر زاویه و مسیر گسترش ترک‌های pullout تأثیر داشته باشد (شافعی و تاروردیلو، ۲۰۲۱). علاوه بر عمق مدفون، ابعاد سرمه‌ها و ضخامت عضو بتنی نیز در نحوه انتقال نیرو و ظرفیت گسیختگی بتن مؤثر هستند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی مهارهای سردار نشان داده است که افزایش ضخامت عضو و استفاده از آرماتورهای سطحی می‌تواند موجب افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری مهار شود. همچنین اندازه سرمه‌ها نیز بر ظرفیت کششی و رفتار اتصال تأثیرگذار است؛ بنابراین، در ارزیابی مکانیزم گسیختگی لازم است پارامترهای هندسی مهار و محیط اطراف آن به‌صورت هم‌زمان مورد توجه قرار گیرند (نیل‌فروش و همکاران ۲۰۱۸). در شرایطی که مهار در مجاورت ترک‌های سطحی قرار داشته باشد، وضعیت تنش و مسیر گسترش ترک در بتن می‌تواند تغییر کند. مطالعات عددی انجام‌شده با استفاده از خرابی کششی در نرم‌افزار آباکوس نشان داده‌اند که موقعیت ترک سطحی، عمق مؤثر و اندازه سرمه‌ها می‌توانند بر ظرفیت مخروط گسیختگی و پاسخ بار-جابجایی اثرگذار باشند (Karmokar & Moyheddin, 2023).

در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های سب‌بعدی اجزای محدود برای بررسی رفتار مهارهای تحت کشش توسعه یافته است.

پیشرفت‌های اخیر در زمینه حساسیت مش و مدل‌های رفتاری، از جمله مدل‌های خرابی پلاستیسیته بتن (Trautwein, et al. 2018, Russell, et al. 2007, Lee & Fenves, 1998, and Cicekli, et al. 2007, Grassl, et al. 1995)، این امکان را فراهم کرده که شبیه‌سازی‌های عددی با دقت و اعتبار بالایی انجام شود.

نتایج مطالعات تجربی و عددی نشان داده‌اند که مدل‌های سب‌بعدی می‌توانند شکل‌گیری مخروط گسیختگی، پاسخ بار-لغزش و حالت نهایی شکست را با دقت مناسبی بازتولید کنند. همچنین، تحلیل پارامتریک امکان بررسی هم‌زمان اثر مقاومت بتن، مشخصات هندسی سرمه‌ها، قطر مهار و شرایط مرزی را فراهم می‌کند (Santos, et al. 2024).

با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته در زمینه پیش‌بینی ظرفیت کششی مهارها، بررسی هم‌زمان توزیع تنش، کانتور خرابی کششی و نحوه شکل‌گیری ناحیه گسیختگی همچنان اهمیت دارد. به‌ویژه در مدل‌های دارای عمق‌های مختلف مدفون، ممکن است محل تمرکز تنش و مسیر توسعه ترک تغییر کند و در نتیجه مکانیزم گسیختگی متفاوتی شکل گیرد. بنابراین، تحلیل کانتورهای خرابی و تنش می‌تواند در شناسایی نواحی بحرانی و تبیین فرآیند گسیختگی بتن اطلاعات ارزشمندی فراهم کند (Santana, et al. 2022).

بر این اساس، پژوهش حاضر با استفاده از تحلیل غیرخطی سه بعدی اجزای محدود، رفتار مهارهای مدفون در بتن تحت بار کششی را با تمرکز بر اثر عمق مؤثر مدفون بر ظرفیت گسیختگی مخروطی، توزیع تنش، کانتور خرابی کششی و شکل گوه گسیختگی بتن بررسی می‌کند. در این راستا، کانتورهای خرابی کششی بتن و تنش معادل فون میسز مورد ارزیابی قرار گرفته و ارتباط میان عمق مدفون مؤثر و ظرفیت گسیختگی مخروطی در کشش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- ظرفیت گسیختگی مخروطی در آیین نامه

در این مطالعه ظرفیت گسیختگی مخروطی ارائه شده در مبحث نهم مقررات ملی ایران (۲۰۲۰) با ظرفیت به دست آمده از شبیه سازی نرم افزاری مقایسه می‌شود. طبق این آیین نامه مقاومت اسمی گسیختگی مخروطی بتن مهار در کشش، برای مهارهای تکی، نباید از مقدار زیر بیشتر در نظر گرفته شود:

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_b$$

مقاومت پایه‌ی گسیختگی بتن در کشش، برای مهار تکی در بتن ترک خورده، نباید از مقدار زیر بیشتر باشد:

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5}$$

۳- شبیه سازی نرم افزاری

در این مطالعه از نرم افزار آباکوس برای شبیه سازی رفتار مهار در بتن استفاده شده است. جهت بررسی رفتار پسااوج بتن و فرآیند گسیختگی آن لازم است رفتار غیر خطی بتن شبیه سازی شود. به این منظور از مدل خرابی پلاستیک همسانگرد موجود در نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

۳-۱- مدل خرابی پلاستیک

مدل خرابی پلاستیک بتن یک مدل خرابی بر پایه پلاستیسیته برای بتن است که قابلیت نشان دادن رفتار غیرخطی و خصوصیات خرابی مواد شبه ترد همانند بتن را دارد. این مدل فرض می‌کند که مهم‌ترین مکانیسم‌های خرابی برای بتن ترک خوردگی در کشش و خرد شدن در فشارند.

ترکیب خرابی همسانگرد و پلاستیسیته به صورت گسترده برای مدل سازی شکست کششی و فشاری استفاده شده است و مدل‌های زیاد و متفاوتی در این زمینه پیشنهاد شده‌اند (Grassl, et al. 2013).

ترکیب خرابی و پلاستیسیته به عنوان چارچوب استاندارد برای تحلیل غیرخطی سازه‌های بتنی پذیرفته شده است (Brünig & Michalski, 2017).

مدل خرابی پلاستیک لی و فنوس (Lee & Fenves, 1998) بر اساس کاهش سختی همسانگرد (اسکالر) فرمول بندی شده است. همچنین این مدل تنها یک سطح بارگذاری دارد که پلاستیسیته و خرابی همسانگرد را از طریق کرنش پلاستیک مؤثر مرتبط می‌کند.

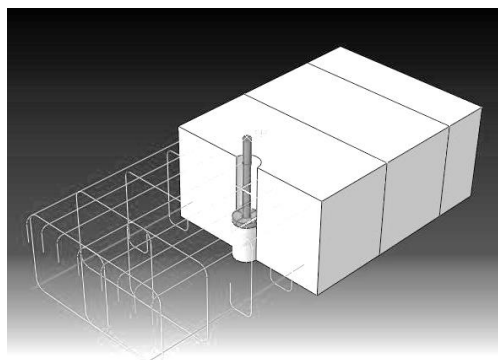
۳-۲- صحت سنجی مدل

با توجه به پیچیدگی رفتار غیرخطی بتن و حساسیت آنالیزهای دینامیکی به پارامترهای ورودی، اطمینان از صحت عملکرد مدل عددی پیش از انجام تحلیل‌ها و حساسیت سنجی پارامترها ضروری است. بدین منظور، در این مطالعه نتایج آزمایشگاهی موجود در مقاله‌ی سانتانا و همکاران که در سال ۲۰۲۲ انجام شده، توسط مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. لذا بر اساس داده‌های آزمایشگاهی موجود در مقاله مرجع، یک نمونه شاخص (H-110-1: قطر ۱۶ میلی‌متر، عمق ۱۱۴ میلی‌متر، بتن معمولی)، طبق شکل (۱) برای فرآیند صحت سنجی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت.

مطابق شکل (۲)، مدل سازی سه بعدی و دقیق میلگرد سردار، بلوک بتنی و شبکه آرماتوربندی بر اساس ابعاد دقیق هندسی ذکر شده در جدول (۱) مقاله مرجع صورت گرفت.

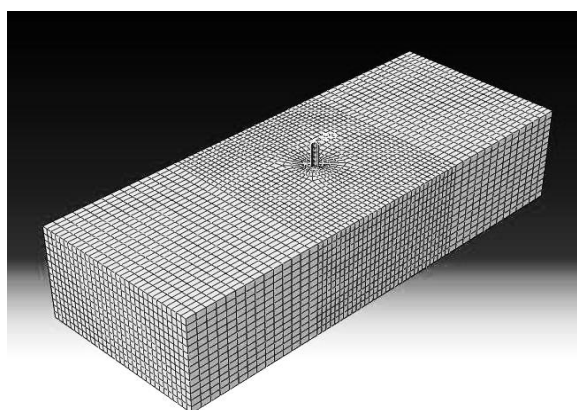


شکل ۱ نمونه آزمایشگاهی قبل از بارگذاری



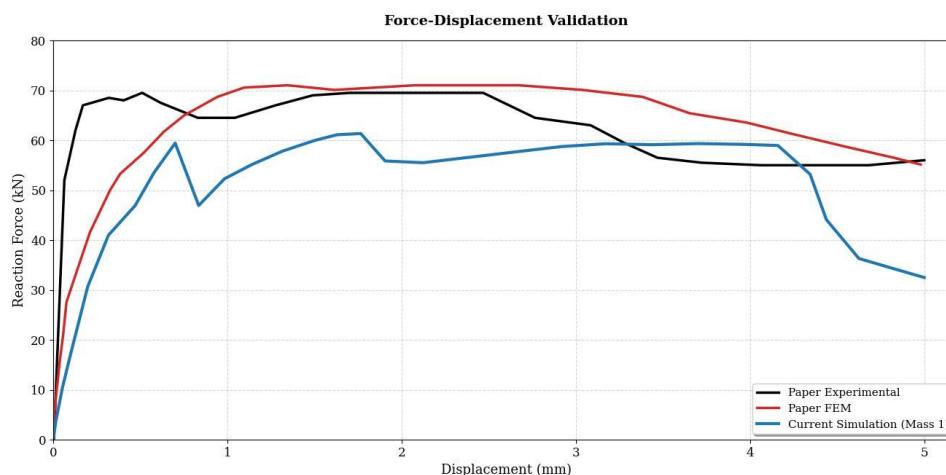
شکل ۲- مدل سازی سه بعدی و دقیق میلگرد سردار، بلوک بتنی و شبکه آرماتوربندی

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، از المان‌های مکعبی کاهش یافته (C3D8R) برای بتن و (C3D8) برای میلگرد سردار و ناحیه $3h_{ef}$ از بتن، جهت پیشگیری از قفل شدگی برشی، و المان‌های خرابایی (T3D2) برای آرماتورهای تقویتی استفاده شده است. همچنین تراکم و ریزدانه‌گی مش در ناحیه اطراف سر انکر برای ثبت دقیق تمرکز تنش افزایش یافت. تماس از نوع Tie بین بتن و میلگرد سردار تعریف شد و از قید مدفون ۱ برای آرماتورهای تقویتی داخل بتن استفاده شد.



شکل ۳- مش بندی مدل با المان‌های C3D8 و C3D8R

برای ثبت نیروی واکنش ۲ از خروجی RF2 در نقطه مرجع ۳ اعمال بار استفاده شد. این پارامتر نشان دهنده مقاومت کل سیستم در برابر بیرون کشیده شدن مهار است. برای ثبت جابجایی، از خروجی U2 در همان گره استفاده شد. به منظور تایید عملکرد مدل خرابایی و رفتار الاستو-پلاستیک ماده، نمودار نیرو-جابجایی حاصل از شبیه سازی حاضر با نتایج تجربی و عددی مقاله مرجع مقایسه شده است. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، همگرایی بسیار خوبی میان نتایج وجود دارد.

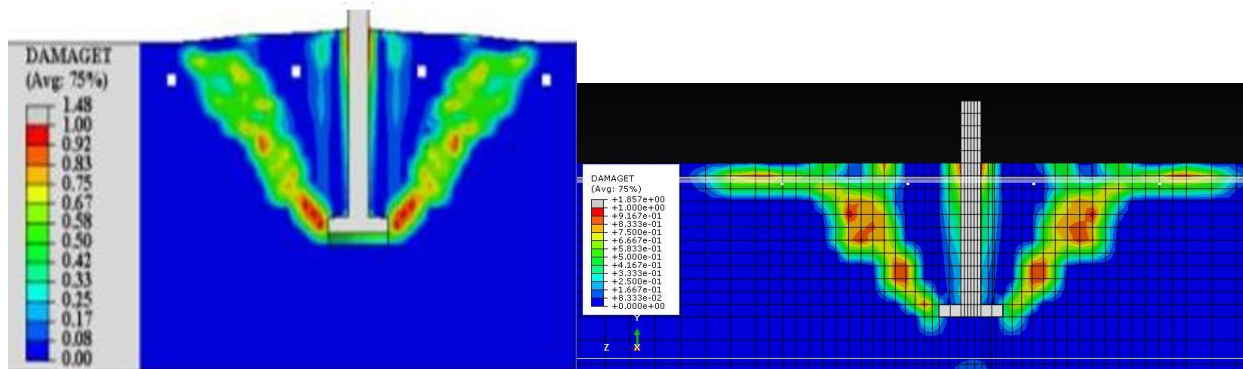

¹Embedded Region

² Reaction Force

³ Reference Point

شکل ۴- مقایسه منحنی نیرو-جابجایی مدل H110-1 برای کار حاضر، مرجع آزمایشگاهی و مرجع المان محدود

با استفاده از تنظیمات دقیق جرمی، مدل شبیه‌سازی می‌تواند روند افزایش نیرو را بسیار خوب بازتولید کند. شیب صعودی نمودار تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد که نشان‌دهنده دقت مدل در ناحیه الاستیک و پلاستیک اولیه است. صعود نمودار به صورت یکنواخت تا نقطه اوج و سپس نزول آن در ناحیه شکست، نشان‌دهنده برقراری کامل تعادل استاتیکی در تمام گام‌های زمانی است. یکی از نقاط قوت این شبیه‌سازی، پیش‌بینی رفتار ماده پس از نقطه تسلیم است. همان‌طور که در نمودار مشهود است، پس از رسیدن به پیک در جابه‌جایی ۱/۶ میلیمتر، نیرو دچار افت ناگهانی نمی‌شود و تا جابه‌جایی ۴ میلیمتر در سطح بالایی (حدود ۵۸ کیلو نیوتن) باقی می‌ماند. این پیک نیرو تطابق خوبی با رفتار شکل پذیر مشاهده شده در آزمایش تجربی دارد. شبیه‌سازی اگرچه هزینه محاسباتی بالایی داشت، اما نتایجی با پایداری فیزیکی بالا و همگرایی مناسب در شکل نمودار ارائه کرده است. مدل حاضر به خوبی قادر است رفتار سازه را در هر سه فاز سختی اولیه، ظرفیت باربری (با حاشیه اطمینان) و رفتار پس از شکست پیش‌بینی نماید. پارامتر DAMAGET در مدل رفتاری CDP بیانگر میزان پارامتر خرابی کششی بتن است که مقدار صفر نشان‌دهنده بتن سالم و مقدار یک (یا نزدیک به آن) نشان‌دهنده ترک خوردگی کامل است. در شکل (۵)، کانتور خرابی مدل حاضر در لحظه بار نهایی در کنار الگوی شکست مقاله مرجع نمایش داده شده است.



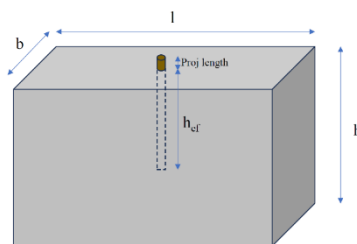
شکل ۵- مقایسه توزیع خرابی کششی در بتن مدل H110-1 با استفاده از المان محدود در مقاله و در کار حاضر

۴- حساسیت سنجی عمق مدفون مهار

در این مطالعه، سه مدل از مهارهایی با عمق مؤثر مدفون مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی مدل‌ها، مهار و سرمه‌ار در مرکز بلوک بتنی قرار گرفتند و ابعاد بلوک بتنی مطابق شکل (۶) و براساس مقادیر ارائه‌شده در جدول (۱) تعیین شدند. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، پارامترهای l ، b و h به‌ترتیب بیانگر طول، عرض و عمق بلوک بتنی هستند که مقادیر آن‌ها بر مبنای عمق مؤثر مدفون مهار (h_{ef}) محاسبه شده‌اند. همچنین d_a ، d_{ep} پارامترهای و به‌ترتیب نشان‌دهنده قطر سرمه‌ار و قطر مهار هستند. به‌منظور سهولت در معرفی و ارجاع به نمونه‌ها، از یک روش نام‌گذاری اختصاری استفاده شده است. در این روش، هر نمونه با نمادی مانند H50 معرفی می‌شود؛ به‌طوری‌که حرف H بیانگر عمق مؤثر مدفون مهار (h_{ef}) و عدد ۵۰ نشان‌دهنده مقدار این عمق بر حسب میلیمتر است. به‌عنوان مثال، نمونه H50 معرف مهاری با عمق مؤثر مدفون برابر با ۵۰ میلیمتر است. باتوجه به اینکه ابعاد نمونه برحسب میلیمتر است، خواص الاستیک و پلاستیک برحسب مگاپاسکال وارد شده است. مدول یانگ، ۱۷۹۰۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون، ۰/۳ است. همچنین برای بلوک بتنی $f'_c = 30\text{Mpa}$ و مدول یانگ ۲۶۹۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ است. شرایط مرزی و نحوه اعمال بارگذاری در تمامی مدل‌های مورد مطالعه مشابه مدل صحت‌سنجی شده در بخش قبلی بوده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و هندسی مهار و سرمه‌ار

مدل‌ها	عمق مدفون (mm)	قطر مهار (mm)	قطر سر (mm)	ضخامت سر (mm)
H50	50	10	30	10
H250	250	20	80	20
H1000	1000	42	300	60



$$b=6h_{ef} \quad l=10h_{ef} \quad h=3h_{ef}$$

Projection length= two times the Anchor Diameter d_a

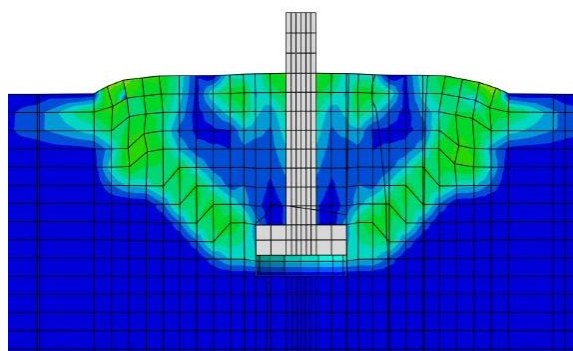
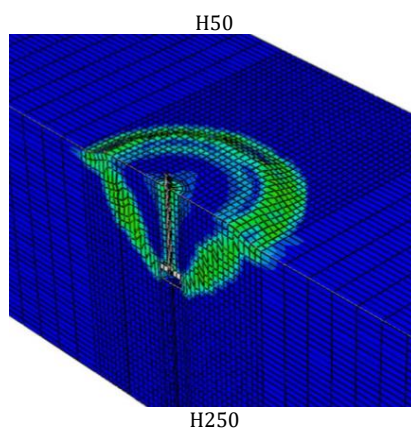
شکل ۶- جزییات هندسی قرارگیری مهار و بلوک بتنی

۴-۱- تفسیر نتایج

در ادامه به منظور ارزیابی دقیق مدل های مورد مطالعه در دوبخش نتایج مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در ابتدا برای مشاهده ترک ها و نواحی تخریب شده، از کانتور پارامتر خرابی کششی ۱ استفاده شد. سپس کانتور تنش فون میسز ۲ جهت بررسی تمرکز تنش گزارش می شود.

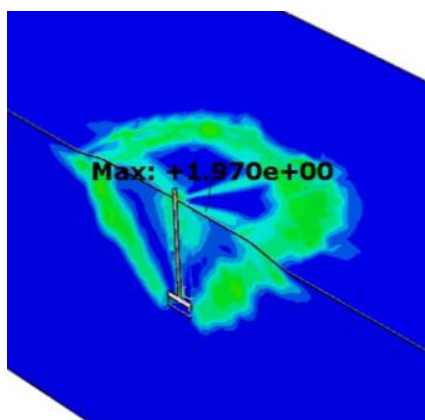
۴-۲- کانتور خرابی کششی و فشاری

مطابق شکل (۷) که برای نمونه های با ارتفاع ۵۰، ۲۵۰ و ۱۰۰۰ نشان داده شده است، در مدل های شبیه سازی شده با عمق های مدفون مؤثر مختلف، مکانیزم شکست به صورت تشکیل گوه گسیختگی بتن مشاهده می شود. روند توسعه خرابی در این مدل ها به این صورت است که ترک های کششی ابتدا در مجاورت لبه سرمه‌ار مدفون آغاز شده و با افزایش بارگذاری، در امتداد مسیرهای مشخصی توسعه می یابند. این ترک ها به صورت نوارهای نسبتاً باریک با الگوی تقریبی V شکل تشکیل دهنده اضلاع گوه گسیختگی بوده و در نهایت تا سطح آزاد بتن ادامه پیدا می کنند. این الگوی خرابی نشان دهنده تمرکز خرابی کششی در مسیر مشخص بین سرمه‌ار و سطح آزاد بتن است.



¹ DAMAGET

² von mises



H1000

شکل ۷- کانتور پارامتر خرابی کششی

۴-۳- بررسی کانتورهای تنش فون میسز

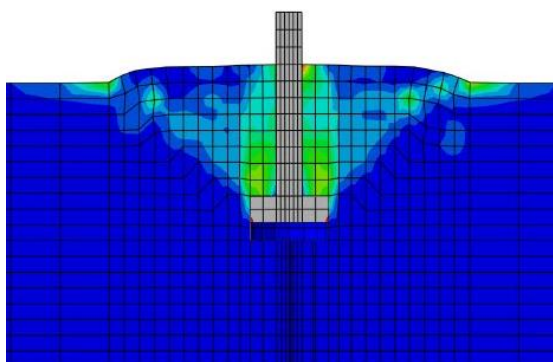
تحلیل غیرخطی مواد با روش المان محدود نیاز به معیار تسلیم دارد. معیار تسلیم تابعی از متغیرهای تنش چند محوری تعریف می‌گردد و این تابع به نام سطح تسلیم معرفی می‌شود. از معیارهای متداول تسلیم، سطح تسلیم فون میسز را می‌توان نام برد. این معیار به دلیل شکل بیضی تابع ریاضی آن، یکی از بهینه‌ترین و اقتصادی‌ترین سطوح تسلیم است. تنش معادل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad \frac{1}{\sqrt{2}}$$

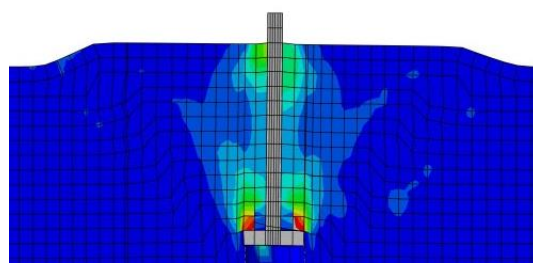
در این رابطه s_1 و s_2 و s_3 تنش‌های اصلی می‌باشند.

در شکل (۸) کانتورتنش ارایه شده است. با توجه به نتایج، بیشترین تنش در هر سه نمونه که گوه گسیختگی تشکیل می‌شود در ابتدای سر مهار مدفون رخ

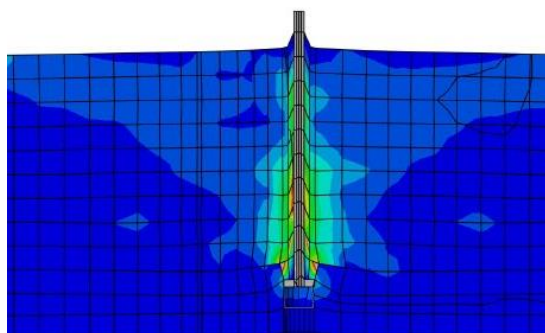
می‌دهد



H50



H250



H1000
شکل ۸- کانتور تنش

۵- بحث و نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که افزایش عمق مؤثر مدفون مهار بر توزیع تنش و خرابی و همچنین ظرفیت گسیختگی کششی مهار تأثیر مستقیم دارد. در نمونه‌های مختلف در ابتدای تشکیل گوه گسیختگی، تمرکز اصلی تنش در ابتدای سرمه‌بار مشاهده شد. با گسترش ترک‌ها در توده بتن، تنش‌ها در عمق بیشتری از بلوک بتن توزیع گردید. همچنین، ترک‌ها ابتدا در مجاورت سرمه‌بار ایجاد شده و با افزایش بار به‌صورت V شکل به سمت سطح آزاد توسعه یافتند. این نتایج نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین تمرکز تنش، توسعه خرابی کششی و شکل‌گیری گوه گسیختگی است.

منابع

- مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۹۹). طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه. وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، دفتر مقررات ملی و کنترل ساختمان.
- Karmokar, T., Mohyeddin, A., Lee, J., & Paraskeva, T. (2021). Concrete cone failure of single cast-in anchors under tensile loading – A literature review. *Engineering Structures*, 243, 112615. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112615>
- Kang, T. H., Ha, S. S., & Choi, D. U. (2010). Bar pullout tests and seismic tests of small-headed bars in beam-column joints. *ACI Structural Journal*, 107(1), 32-42.
- Chun, S. C., Lee, S. H., Kang, T. H. K., & Oh, B. (2007). Mechanical anchorage in exterior beam-column joints subjected to cyclic loading. *ACI Structural Journal*, 104(1), 102-112.
- Ožbolt, J., Eligehausen, R., & Reinhardt, H. W. (1999). Size effect on the concrete cone pullout load. *Fracture Scaling*, 95, 391-404.
- Ožbolt, J., Eligehausen, R., Periškić, G., & Mayer, U. (2007). 3D FE analysis of anchor bolts with large embedment depths. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(1-2), 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.01.019>
- Shafei, E., & Tariverdilo, S. (2021). Seismic pullout behavior of cast-in-place anchor bolts embedded in plain concrete: Damage plasticity based analysis. *Structures*, 34, 479-486. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.085>
- Nilforoush, R., Nilsson, M., & Elfgrén, L. (2018). Experimental evaluation of influence of member thickness, anchor-head size, and orthogonal surface reinforcement on the tensile capacity of headed anchors in uncracked concrete. *Journal of Structural Engineering*, 144(4), 04018012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001976](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001976)
- Karmokar, T., & Moyheddin, A. (2023). Influence of surface cracking, anchor head profile, and anchor head size on cast-in headed anchors in geopolymer concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 17, 1163-1187. <https://doi.org/10.1007/s11709-023-0987-5>
- Trautwein, L. M., Marinho, A. M., & Gomes, R. B. (2018). Anchor bolts – influence of supplementary reinforcement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), 679-687.
- Russell, H. G., Volz, J., & Bruce, R. N. (1995). Applications and limitations of high strength concrete in prestressed bridge girders. In *Proceedings, Fourth International Bridge Engineering Conference*, Washington DC.
- Grassl, P., Xenos, D., Nyström, U., Rempling, R., & Gylltoft, K. (2013). CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 50(24), 3805-3816.
- Lee, J., & Fenves, G. L. (1998). A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27(9), 937-956.
- Cicekli, U., Voyiadjis, G. Z., & Abu Al-Rub, R. K. (2007). A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete. *International Journal of Plasticity*, 23(10-11), 1874-1900.
- Santos, J. P. B., Oliveira, M. H., Lima, N. W. B., Pereira Filho, M. J. M., & Ferreira, M. P. (2024). A parametric finite element study of concrete cone failure in headed bars under tensile loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 21(2). <https://doi.org/10.1590/1679-78257940>
- Santana, P. F. M., Silva, P. C. S., Ferreira, M. P., Bezerra, L. M., & Oliveira, M. H. (2022). Experimental and numerical study of headed bars embedded in RC members under tension. *Structural Engineering and Mechanics*, 84(4), 531-546. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.84.4.531>

- Grassl, P., Xenos, D., Nyström, U., Rempling, R., Gylltoft, K., 2013. CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *Int J Solids Struct*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008>
- Brünig, M., Michalski, A., 2017. A stress-state-dependent continuum damage model for concrete based on irreversible thermodynamics. *Int J Plast* 90, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.12.002>
- Lee, J., Fenves, G.L., 1998. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. *Earthq Eng Struct Dyn* 27, 937–956. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199809\)27:9<937::AID-EQE764>3.0.CO;2-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199809)27:9<937::AID-EQE764>3.0.CO;2-5).