

علمی - پژوهشی

بهینه‌سازی شکل دماغه نفوذگر در هدف بتنی تراکم‌پذیر و با هدف

دستیابی به بیشترین عمق نفوذ

ابودرملکیان^۱ خداداد واحدی^۲ روح اله حسینی^{۳*} علیرضا نداف اسکویی^۴

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶)

چکیده

در این پژوهش بهینه‌سازی شکل دماغه نفوذگر جنبشی، با هدف دستیابی به نفوذ حداکثری انجام شده است. جهت بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی تحلیلی لاگرانژ و از الگوریتم تکاملی ژنتیک، چندین نوع تابع مولد دماغه مختلف، دو تابع هدف مختلف ضریب شکل و عمق نفوذ، استفاده شده است. با مقایسه شکل و عمق نفوذ دماغه‌های بهینه‌سازی شده، مشاهده می‌شود که توافق خوبی میان نتایج حاصل از بهینه‌سازی در حالات مختلف وجود دارد. در بهینه‌سازی به روش تحلیلی، تابع هدف بهینه‌سازی ضریب شکل دماغه می‌باشد و از روش بهینه‌سازی لاگرانژ استفاده شده است. در بهینه‌سازی عددی، از دو تابع هدف مختلف عمق نفوذ و ضریب شکل دماغه و همچنین سه نوع تابع مولد دماغه جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. نزدیک بودن نتایج بهینه‌سازی در همه روش‌های ذکر شده نشان از دقت بالای بهینه‌سازی‌های انجام شده دارد. در این مقاله نشان داده شده است که، ضریب شکل دماغه، تابع هدفی مناسب، برای بهینه‌سازی دماغه نفوذگرهای جنبشی با هدف دستیابی به بیشترین عمق نفوذ می‌باشد. یکی از مشخصه‌هایی که در بهینه‌سازی شکل دماغه می‌بایست در نظر گرفته شود، نسبت شعاع ساقه به طول دماغه (τ) می‌باشد. در این مطالعه، نسبت (τ) در بهینه‌سازی به روش‌های مختلف، برابر با $0/3$ در نظر گرفته شده است. پس از بهینه‌سازی و بدست آمدن شکل دماغه پرتابه، عمق نفوذ پرتابه در سرعت‌های مختلف محاسبه و با عمق نفوذ دماغه‌های اجابو با نسبت (τ) برابر با $0/3$ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که عمق نفوذ دماغه‌های بهینه‌سازی شده، به میزان قابل توجهی از عمق نفوذ دماغه اجابو در سرعت‌های مختلف برخوردار، بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی دماغه نفوذگر، نفوذ حداکثری پرتابه، شکل بهینه دماغه نفوذگر، طراحی دماغه نفوذگر، بتن تراکم‌پذیر.

Optimizing the shape of the penetrator nose into Compressible Concrete in order to achieve the maximum penetration depth

A. Malekiyan¹ Kh. Vahedi² R. Hosseini^{3*} A. Naddaf Oskoyi⁴

Mechanical Engineering Department Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

(Received: 26/September/2020; Accepted: 6/December/2020)

ABSTRACT

In this study, the shape of the kinetic penetrator nose is optimized with the aim of achieving maximum penetration. For optimization, Lagrange analytical optimization method and genetic evolutionary algorithm, several types of different nose-generating functions, two different objective functions, and shape coefficient and penetration depth have been used. Comparing the shape and depth of penetration of the optimized noses, it is observed that there is a good agreement between the results of the optimization in different cases. In analytical optimization, the objective function is to optimize the shape of the nose and the Lagrange optimization method is used. In numerical optimization, two different objective functions of penetration depth and nose shape coefficient as well as three types of nose generating functions have been used for optimization. The proximity of the optimization results in all the mentioned methods shows the high accuracy of the optimizations performed. In this paper, it is shown that the nose shape coefficient is a suitable objective function to optimize the nose of kinetic penetrators in order to achieve the maximum penetration depth. One of the characteristics that should be considered in optimizing the shape of the nose is the ratio of the stem radius to the length of the nose (τ). In this study, the ratio (τ) in optimization by different methods is equal to 0.3. After optimizing and obtaining the shape of the projectile nose, the penetration depth of the projectile at different speeds was calculated and compared with the penetration depth of the oyster noses with a ratio (τ) equal to 0.3. It can be seen that the penetration depth of the optimized noses is significantly greater than the penetration depth of the ips in different collision velocities.

Keywords Penetration Nose Optimization, Maximum Projectile Penetration, Optimal Penetrator Nose Shape, Penetrator Nose Design, Compressible Concrete.

^۱ - دانشجوی دکتری: pishro1404@chmail.ir^۲ - استاد: vahedi1710@yahoo.com^۳ - استادیار (نویسنده پاسخگو): r.hosseini.mech@gmail.com^۴ - دانشیار: anadaf@eyc.ac.ir

۱- مقدمه

قابلیت نفوذ پرتابه رابطه بسیار نزدیکی با شکل دماغه آن دارد. تأثیر شکل دماغه بر عمق نفوذ، در نفوذگرهای جنبشی^۱، بسیار حائز اهمیت است. پارامترهای مختلفی از قبیل جرم پرتابه، سرعت برخورد، شکل دماغه و سطح مقطع پرتابه در میزان نفوذ پرتابه در اهداف تأثیر گزار می‌باشند. از میان پارامترهای ذکر شده، شکل دماغه یکی از مؤثرترین پارامترها جهت افزایش عمق نفوذ است. جونز^۲ [۱] تنش عمودی در سطح دماغه را به صورت معادله‌ای درجه دو برحسب سرعت گشایش ماده هدف، در نظر گرفت و نیروی اصطکاک را به صورت حاصل ضرب نیروی عمودی وارد بر دماغه در یک ضریب اصطکاک ثابت در نظر گرفت. سپس با انتگرال‌گیری از تنش وارد بر سطح دماغه در حین نفوذ، و استفاده از قانون دوم نیوتن، معادله‌ای برای عمق نفوذ برحسب خواص مادی هدف، سرعت پرتابه و شکل دماغه ارائه کرد. سپس با استفاده از روش‌های عددی بهینه‌سازی و در نظر گرفتن معادله‌ای توانی برای تابع مولد شکل دماغه، دماغه‌های بهینه را در سرعت‌های مختلف و ضرایب اصطکاک مختلف به دست آورد. چن^۳ [۲] با استفاده از ضریب شکل بی بعد S ارائه شده توسط فرستال [۳] و ضریب شکل N^* معادله‌ای برای عمق نفوذ دماغه با ضریب شکل‌های مختلف ارائه کرد. در این مقاله، مقایسه میان داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده عمق نفوذ، توافق خوبی را میان نتایج تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد. بن دور^۴ [۴] با توجه به نتایج جونز [۵]، فرض کرد که دماغه بهینه باید دارای یک قسمت تخت در قسمت نوک دماغه باشد. بن دور با فرض نوک دماغه تخت و صرف‌نظر از تأثیر نیروی اصطکاک، معادلاتی تحلیلی برای شکل دماغه ارائه کرد. همچنین با استفاده از حل عددی، شکل‌های بهینه‌ای نیز برای نسبت‌های مختلف T و سرعت و ضرایب اصطکاک مختلف، ارائه کرد. یانکویسکی و گلاک^۵ [۶] با استفاده از تقارن استوانه‌ای و انتگرال‌گیری از نیروی عمودی وارد بر دماغه پرتابه و صرف‌نظر از نیروی اصطکاک، معادله‌ای برای پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه با دماغه اجایو به دست آوردند.

سپس با مقایسه نتایج آزمایشگاهی توافق خوبی میان نتایج پیش‌بینی شده و نتایج آزمایشگاهی به دست آمد. معادلات به دست آمده نشان می‌دهد که تأثیر شکل دماغه در عمق نفوذ با افزایش سرعت برخورد بیشتر می‌شود. بن دور [۷] معادله ارائه شده توسط فرستال و تزو [۸] که برای پیش‌بینی عمق نفوذ دماغه اجایو ارائه شده است را به صورت معادله‌ای برای پیش‌بینی عمق نفوذ انواع دماغه ارائه کرد و سپس شکل دماغه را با هدف بهینه شدن عمق نفوذ، بهینه‌سازی کرد. بن دور و همکاران [۹] مقاله‌ای مروری در زمینه بهینه‌سازی شکل دماغه نفوذگرهای جنبشی ارائه کرده‌اند. در این مقاله، مدل‌های استفاده شده در بهینه‌سازی از قبیل تقارن استوانه‌ای یا کروی، شکل دماغه از نظر سه بعدی و یا حاصل از دروان یک‌شکل دوبعدی، در نظر گرفته شدن اصطکاک، روش بهینه‌سازی و تابع هدف، به صورت خلاصه از کارهای انجام شده آورده شده است. بن دور [۱۰] از مباحث دینامیک گازها و آئرو دینامیک و کمینه کردن نیروی درگ وارد بر دماغه شکل بهینه دماغه را به دست آورده است. مقایسه نیروی درگ وارد بر دماغه بهینه به دست آمده از روش آئرو دینامیک و روش‌های مکانیک نفوذ، توافق خوبی را نشان می‌دهد. یو شان^۶ و همکاران [۱۱] با استفاده از مدل‌های ساختاری الاستیک-پلاستیک ایدئال، مدل (TCK)^۷، مدل (HJC)^۸ و تئوری گشایش حفره و شبیه‌سازی عددی، نمودارهای سرعت-زمان و شتاب-زمان پرتابه‌هایی با سرعت‌های برخورد مختلف و اهدافی از جنس فولاد و بتن با مقاومت‌های مختلف به دست آوردند. جیانچنگ لیو^۹ و همکاران [۱۲] دماغه پرتابه را به صورت سه بخش، که هر کدام می‌توانند دارای شکل خاص مربوط به خود باشند، در نظر گرفتند. سپس بدون استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و با تکیه به دانش مهندسی و با هدف کمینه شدن ضریب شکل N^* ، شکل‌های متناسب با هر یک از سه بخش را ارائه کردند. دماغه پیشنهادی ایشان، ضریب شکل بالاتری نسبت به دماغه‌های مخروطی با قطر ساقه و طول دماغه یکسان و دماغه بهینه شده توسط جونز که در همان قطر ساقه دارای طولی برابر با دماغه ارائه شده در مرجع [۱۲] است، دارد و نسبت به دماغه با کالیبر ۴/۵

¹ Kinematic penetrator² Jones³ Chen⁴ Ben dor⁵ Yankelevsky and Gluck⁶ Yu Shan⁷ Taylor-Chen-Kuzmaul⁸ Holmquist-Johnson-Cook⁹ Jiancheng Liu

مدل ارائه شده توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. کنگ^۴ و همکاران [۱۸]، مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه در حالت صلب و در حالتی که سایش پرتابه در نظر گرفته شود، ارائه کردند در مطالعه آنها از تئوری گشایش استوانه‌ای ماده برای ساده‌سازی محاسبات استفاده شده است. رفتار پلاستیک ماده با استفاده از مدل مورگان^۵ مدل شده است. نتایج پیش‌بینی مدل‌های ارائه شده، با نتایج مدل‌های تئوری پیشین و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط فرستال [۱۹] مقایسه شده است و توافق خوبی میان داده‌های مقایسه شده مشاهده می‌شود. چن و همکاران^۶ [۲۰] آزمایش‌های نفوذ پرتابه‌هایی با شکل‌های مختلف دماغه را در اهدافی از جنس شن انجام دادند. در این آزمایش‌ها از پرتابه‌هایی با دماغه‌های کروی، نیمه کروی، اجیو، مخروطی و تخت استفاده شد. اهداف استفاده شده، از شن‌هایی با چگالی‌های متوسط و بالا ساخته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که پرتابه با دماغه اجیو دارای سرعت حد بالستیک کمتری نسبت به سایر پرتابه‌ها می‌باشد و انرژی کمتری را در حین نفوذ به اهداف ساخته شده از شن از دست می‌دهد و پرتابه دارای دماغه تخت بیشترین انرژی را در حین نفوذ از دست می‌دهد و دارای بالاترین سرعت حد بالستیک است. همچنین این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که اهداف ساخته‌شده از شن، در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک نیز قدرت جذب انرژی خود را حفظ می‌کنند. چن و شای [۲۱]، با استفاده از معادله عمق نفوذ ارائه‌شده در مرجع [۱۳] و در نظر گرفتن شتاب ثابت در ناحیه تونلی نیروی وارد بر دماغه اجیو را تخمین زدند. همچنین سرعت حدی که پس‌ازاین سرعت، شتاب از حالت ثابت خارج می‌شود و نیروی وارد بر دماغه دچار تغییرات قابل توجه می‌شود را تخمین زدند. نیلی هورتون^۷ و همکاران [۲۲]، تأثیر سایش و از دست رفتن جرم پرتابه در حین نفوذ را به صورت یک پارامتر توانی که در پروفیل دماغه ضرب می‌شود در نظر گرفتند. در غالب مطالعات صورت گرفته در زمینه نفوذ پرتابه جنبشی از تغییر شکل و سایش پرتابه در حین نفوذ صرف‌نظر شده است. این فرض امکان استفاده از تئوری‌های مختلف مانند تئوری تقارن کروی و

ضریب شکل پایین‌تری دارد. چن و لای [۱۳]، عمق نفوذ انواع دماغه را به صورت معادلاتی برحسب ضریب شکل دماغه، خواص مادی هدف و سرعت پرتابه ارائه کردند. هنگ^۱ و همکاران [۱۴]، پرتابه‌هایی با سطح مقطع دایره‌ای و بیضوی را مورد آزمایش نفوذ قرار دادند. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که پرتابه‌هایی با سطح مقطع بیضوی در مقایسه با پرتابه‌های دارای سطح مقطع دایره پایداری حرکتی و عمق نفوذ بهتری دارند. در این مطالعه همچنین با استفاده از شبیه‌سازی عددی عمق نفوذ هر دو گروه پرتابه محاسبه شده است و معادله‌ای برای محاسبه عمق نفوذ پرتابه‌های بیضوی ارائه شده که دارای توافق خوبی با داده‌های حاصل از حل عددی می‌باشد. فن^۲ و همکاران [۱۵] تأثیر جدایش را در نیروی محوری وارد بر پرتابه در حال نفوذ و عمق نفوذ پرتابه اجیو و صلب در هدفی فلزی را بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن تأثیر جدایش در سرعت‌های برخورد بالا، عمق نفوذ را محاسبه کردند. در مدل ارائه‌شده، به منظور ساده‌سازی محاسبات، هدف تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. نتایج پیش‌بینی شده عمق نفوذ توسط ایشان، توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. رابین و یارین^۳ [۱۶]، مدلی برای محاسبه عمق نفوذ پرتابه انعطاف‌پذیر در اهداف فولادی ارائه کردند. مدل آنها برای پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه بلند و در حالت کرنش‌های بزرگ پلاستیک در هدف ارائه شده است. در مدل آنها برای تطابق با داده‌های آزمایشگاهی از یک پارامتر تجربی استفاده شده است مدل ارائه شده کارایی خوبی در طیف سرعت‌های برخورد متوسط و بالا و پرتابه‌هایی از جنس فولاد و تنگستن دارد اما کارایی آن در سایر برخوردها مشخص نیست. شای و همکاران [۱۷]، بیان می‌کنند که مدل‌های تجربی موجود برای پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه در اهدافی از جنس شن، برای طیف محدودی از شرایط آزمایش صادق هستند. ایشان با استفاده از تقارن کروی برای گسترش ماده و در نظر گرفتن تراکم‌پذیری ماده که در اهدافی از جنس شن خشک با توجه به تراکم‌پذیری بالای این اهداف از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد، مدلی برای محاسبه عمق نفوذ ارائه کردند. نتایج پیش‌بینی با استفاده از

⁴ Kong

⁵ Murnaghan

⁶ Siau Chen Chian

⁷ Neely-Horton

¹ Heng

² R.fan

³ Rubin and yarin

نسبت به دماغه‌های ارائه شده در سایر مقالات، به ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده بستگی دارد. لیاقت و همکاران [۳۱] نفوذ پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلزی نازک تحت برخورد مایل مورد بررسی تحلیلی قرار دادند و یک مدل تحلیلی برای آن پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله با نتایج تحلیلی و تجربی ارائه شده توسط محققان دیگر مقایسه گردیده و همخوانی نتایج کاملاً مشهود است. این نتایج و روش حل آن‌ها برای بهینه‌سازی کاربرد دارد. واحدی و مشتاقیان [۳۲] یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه‌های سرعت بالا به اهداف سرامیک/کامپوزیت ارائه کردند که پس از تأمین داده‌های ورودی می‌توان سرعت باقی‌مانده، جرم باقی‌مانده، سرعت لحظه‌ای پرتابه و عمق نفوذ در هر لحظه را به عنوان خروجی از مدل استخراج نمود. واحدی و قاسمی‌نیا [۳۳] در یک پژوهش به تحلیل و مقایسه مدل‌های نفوذ پرتابه میله‌ای در اهداف نیمه بی‌نهایت فلزی پرداختند. در این مقاله روش‌ها و مدل‌های نفوذ جهت بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، جهت بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی تحلیلی لاگرانژ و از الگوریتم تکاملی ژنتیک، چندین نوع تابع مولد دماغه مختلف، دو تابع هدف مختلف ضریب شکل و عمق نفوذ، استفاده شده است. با مقایسه شکل و عمق نفوذ دماغه‌های بهینه‌سازی شده، مشاهده می‌شود که توافق خوبی میان نتایج حاصل از بهینه‌سازی در حالات مختلف وجود دارد. در بهینه‌سازی به روش تحلیلی، تابع هدف بهینه‌سازی ضریب شکل دماغه می‌باشد و از روش بهینه‌سازی لاگرانژ استفاده شده است. پس از بهینه‌سازی و بدست آمدن شکل دماغه پرتابه، عمق نفوذ پرتابه در سرعت‌های مختلف محاسبه و با عمق نفوذ دماغه‌های اجیو با نسبت (τ) برابر با $0/3$ مقایسه شده است.

۲- بهینه‌سازی دماغه نفوذگر

در شکل ۱، نمودار درختی روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده در مقاله حاضر نمایش داده شده است. به‌طور کلی پنج روش بهینه‌سازی برای به دست آوردن شکل بهینه دماغه در این مقاله استفاده شده است که در تابع مولد یا تابع هدف استفاده شده برای بهینه‌سازی یا هر دوی تابع با یکدیگر تفاوت دارند.

استوانه‌ای گشایش ماده را فراهم می‌آورد [۲۳-۲۵]. مو^۱ و ژنگ^۲ [۲۶] آزمایش‌های نفوذ با استفاده از دماغه‌های اجیو ساخته شده از آلیاژ فولاد ۳۸CrSi در اهدافی بتنی و در طیف سرعتی ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ m/s انجام دادند. مشاهده شده است که دماغه پرتابه‌های مورد آزمایش قرار گرفته، از یک سرعت مشخص به بعد، پس از برخورد تغییر شکل می‌دهند در برخوردهای بالاتر از سرعت ۱۵۰۰ m/s، دماغه‌های اجیو پس از برخورد به دماغه‌های نیم کرومی شبیه شده‌اند. کونگ^۳ و همکاران [۲۷] آزمایش‌های نفوذ با استفاده از پرتابه‌ای با دماغه تخت و ساخته شده از فولادی با سختی HRC ۱۱/۵ و هدفی بتنی انجام دادند. آن‌ها آزمایش‌های نفوذ را طیف سرعت ۵۱۰ تا ۱۸۵۰ m/s انجام دادند. همانند فرستال [۲۸] که آزمایش‌های نفوذ در هدفی فلزی را انجام داده است، آن‌ها نیز مشاهده کردند که صحیح بودن فرض صلب، شکل‌پذیر و یا سایشی بودن پرتابه، به سرعت برخورد بستگی دارد. با فرض صلب بودن پرتابه در حین نفوذ می‌توان تنها با مطالعه رفتار ماده هدف، نیروی وارد بر پرتابه و عمق نفوذ آن را محاسبه نمود.

لطیفی و واحدی^۴ [۲۹] با استفاده از مدل (HJ)^۵، رفتار ماده را شبیه‌سازی و عمق نفوذ پرتابه‌هایی با دماغه اجیو را محاسبه و با داده‌های تجربی مقایسه کردند. در مدل ایشان، رابطه میان فشار و کرنش حجمی با استفاده از معادله‌ای درجه سه بیان شده است. مقایسه میان داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی در این مقاله توافق خوبی را نشان می‌دهند. الکن^۶ و همکاران [۳۰]، دماغه پرتابه را به‌صورت توابع خطی تقسیم کردند. در این مقاله پس از بررسی مشاهده کردند که در تعداد بخش‌های بالاتر از ۵۰۰ تغییرات دماغه بسیار اندک می‌باشد. اما برای اطمینان از همگرایی نتایج، دماغه را به ۱۰۰۰ قسمت خطی با فواصل یکسان تقسیم کردند. سپس دماغه حاصل را بهینه‌سازی کردند. با مقایسه عمق نفوذ این دماغه بهینه، با دماغه اجیو و دماغه‌های بهینه ارائه‌شده در سایر مراجع، مشخص شد که بیشتر یا کمتر بودن عمق نفوذ دماغه ارائه‌شده در این مقاله

¹ Mu

² Zhang

³ Kong

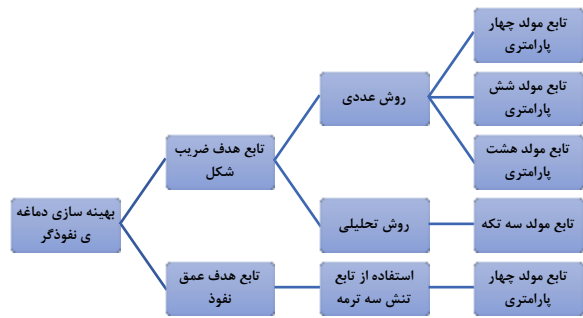
⁴ Latifi and Vahedi

⁵ Johnson Holmquist

⁶ Olcmen

در مقاله حاضر، در حالت استفاده از ضریب شکل به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی، چهار نوع تابع مولد استفاده شده است که عبارت‌اند از:

- تابع مولد سه تکه
- تابع مولد یک تکه و چهار پارامتری
- تابع مولد یک تکه و شش پارامتری
- تابع مولد یک تکه و هشت پارامتری



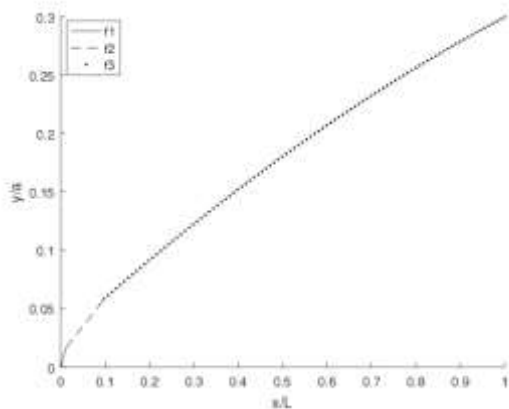
شکل (۱): نمودار درختی روش‌های بهینه‌سازی استفاده‌شده در این مقاله

۲-۲- بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تابع مولد دماغه سه‌تکه و تابع هدف ضریب شکل

تابع مولد دماغه سه تکه استفاده شده در روش شبه‌تحلیلی به صورت شکل (۲) خواهد بود. این تابع از سه تابع درجه دو به صورت معادله (۴)، تشکیل شده است.

$$f_i = a_i x^2 + b_i x + c_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

دماغه سه تکه بهینه‌سازی شده مذکور با نسبت شعاع ساقه به طول دماغه $\tau = 0.3$ نمایش داده شده است.



شکل (۲): نمای شماتیک از توابع مولد دماغه سه تکه شرایط مرزی معادله (۵) در مرز مشترک قسمت‌های تابع مولد دماغه و در ابتدا و انتهای دماغه برقرار می‌باشند.

$$\begin{cases} x=0 \rightarrow y = a_1 x^2 + b_1 x + c_1 = 0 \\ x=L_1 \rightarrow a_1 x^2 + b_1 x + c_1 = a_2 x^2 + b_2 x + c_2 \\ x=L_2 \rightarrow a_2 x^2 + b_2 x + c_2 = a_3 x^2 + b_3 x + c_3 \\ x=L \rightarrow a_3 x^2 + b_3 x + c_3 = a \end{cases} \quad (5)$$

با داشتن این چهار شرط مرزی تعداد متغیرهای مسئله از یازده متغیر به هفت متغیر معادله (۶) کاهش می‌یابد. متغیرهای مسئله عبارت‌اند از:

$$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, L_1, L_2 \quad (6)$$

۱-۲- بهینه‌سازی با استفاده از ضریب شکل دماغه به عنوان تابع هدف

جونز [۱]، با در نظر گرفتن معادله تنش در سطح دماغه به صورت تابعی درجه دو (معادله (۱)) و انتگرال‌گیری از آن در سطح دماغه، معادله نیروی وارد بر دماغه را به صورت تابعی از سرعت و شکل هندسی پرتابه و خواص مادی هدف به دست آورد.

$$P = AV^2 + B \quad (1)$$

در معادله فوق A و B ثوابت مادی هستند و به خواص هدف بستگی دارند و V سرعت برخورد پرتابه است. نیروی محوری وارد بر دماغه به صورت معادله (۲) محاسبه شده است.

$$F = 2\pi \int_0^b yy' (Av^2 \frac{y'^2}{1+y'^2} + B) dx \quad (2)$$

$$= 2\pi Av^2 \int_0^b \frac{yy'^3}{1+y'^2} dx + \pi a^2 B$$

$$= \pi a^2 (ANv^2 + B)$$

y محور عرضی تابع مولد دماغه پرتابه و x محور طولی این تابع می‌باشد. در سرعت‌های برخورد متوسط و بالا، با توجه به تأثیر بالای پارامتر N از این پارامتر به عنوان تابع هدف جهت بهینه‌سازی شکل دماغه به منظور نفوذ حداکثری در هدف بتنی استفاده شده است. در معادله (۲)، a شعاع ساقه و N ضریب شکل دماغه می‌باشد و به صورت معادله (۳) بیان شده است.

$$N = \frac{2}{a^2} \int_0^b \frac{yy'^3}{1+y'^2} dx \quad (3)$$

$$y = a_1 x^{x_1} + a_2 x^{2x_1} + a_3 x^{3x_1} \quad (۸)$$

سه متغیر a_1 ، a_2 و x_1 با بهینه‌سازی و متغیر a_3 با استفاده از شرایط مرزی محاسبه می‌شود. با استفاده از شرایط مرزی رابطه (۹) برای متغیر a_3 به دست می‌آید.

$$a_3 = a - a_1 - a_2 \quad (۹)$$

تابع مولد شش پارامتری به صورت معادله (۱۰) تعریف می‌شود.

$$y = a_1 x^{x_1} + a_2 x^{x_2} + a_3 x^{x_3} \quad (۱۰)$$

پنج متغیر a_1 ، a_2 ، x_1 ، x_2 و x_3 با بهینه‌سازی و متغیر a_3 با استفاده از شرایط مرزی محاسبه می‌شود. با استفاده از شرایط مرزی رابطه (۱۱) برای متغیر a_3 به دست می‌آید.

$$a_3 = a - a_1 - a_2 \quad (۱۱)$$

تابع مولد هشت پارامتری به صورت معادله (۱۲) تعریف می‌شود.

$$y = a_1 x^{x_1} + a_2 x^{x_2} + a_3 x^{x_3} + a_4 x^{x_4} \quad (۱۲)$$

هفت متغیر a_1 ، a_2 ، a_3 ، x_1 ، x_2 ، x_3 و x_4 با بهینه‌سازی و متغیر a_4 با استفاده از شرایط مرزی محاسبه می‌شود. با استفاده از شرایط مرزی، رابطه (۱۳) برای متغیر a_4 به دست می‌آید.

$$a_4 = a - a_1 - a_2 - a_3 \quad (۱۳)$$

در روابط فوق a شعاع ساقه دماغه می‌باشد. با قرار دادن روابط تابع مولد در معادله ضریب شکل (معادله (۳))، تابع هدف بهینه‌سازی به دست می‌آید. با قرار دادن هر یک از توابع مولد در تابع ضریب شکل، تابع هدف بهینه‌سازی متناظر با همان تابع مولد حاصل می‌شود. با استفاده از تابع هدف بهینه‌سازی مذکور و قرار دادن قیود مناسب بهینه‌سازی، پارامترهای مجهول حاصل می‌شوند. با داشتن این پارامترها شکل بهینه دماغه به دست می‌آید.

در بهینه‌سازی با استفاده از تابع مولد سه تکه، از روش تحلیلی لاگرانژ استفاده شده است. در این بهینه‌سازی همان‌طور که ذکر گردید، ضریب شکل دماغه به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. ضریب شکل دماغه از جمع جبری ضرایب شکل سه تکه به دست می‌آید.

$$N^* = N_1^* + N_2^* + N_3^*, \quad (۷)$$

در معادله (۷)، اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ نشانگر قسمت‌های اول، دوم و سوم دماغه هستند. با در نظر گرفتن ضریب شکل به عنوان تابع هدف و استفاده از روش لاگرانژ پارامترهای مجهول تابع مولد دماغه به دست می‌آیند. هفت متغیر مسئله از بهینه‌سازی با هدف کمینه شدن ضریب شکل دماغه حاصل می‌شوند. با داشتن این هفت متغیر شکل بهینه دماغه حاصل می‌شود.

۳-۲- بهینه‌سازی با استفاده از توابع یک تکه به عنوان تابع مولد دماغه و ضریب شکل دماغه به عنوان تابع هدف

در این بخش برای بهینه‌سازی از الگوریتم تکاملی ژنتیک استفاده شده است. در مقاله [۱] بهینه‌سازی دماغه با استفاده از تابع مولد توانی چهار پارامتری و هدف کمینه شدن ضریب شکل انجام شده است. دماغه‌های حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از توابع مولد چهار، شش و هشت پارامتری بسیار شبیه به دماغه‌های ارائه شده توسط جونز هستند و ضریب شکل این دماغه‌ها در برخی از نسبت‌های شعاع ساقه به قطر دماغه T اندکی نسبت به دماغه‌های ارائه شده توسط جونز بهبود (کاهش) یافته‌اند. بهینه‌سازی با استفاده از توابع چهار، شش و هشت پارامتری دارای کلیات یکسانی از نظر روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده می‌باشند و تنها در تعداد پارامترهای معادله مولد دماغه متفاوت می‌باشند.

۴-۲- معادله مولد چهار پارامتری

تابع مولد چهار پارامتری به صورت معادله (۸) تعریف می‌شود.

دیفرانسیل مربوط مدل‌های گشایش مختلف ماده، پارامترهای این معادله را محاسبه نمود.

$$\frac{\sigma_r}{Y} = A + B \left[\frac{V}{(Y / \rho_0)^{1/2}} \right] + C \left[\frac{V}{(Y / \rho_0)^{1/2}} \right]^2 \quad (14)$$

المان نیروی عمودی وارد بر دماغه به صورت معادله (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$dF_N = \sigma_N (V_Z, x) dA, dA = 2\pi y ds, \quad (15)$$

سپس المان نیروی محرک وارد بر دماغه به صورت معادله (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} dF_x &= dF_N \sin \theta + \mu dF_N \cos \theta, \\ dF_x &= \sigma_N (V_Z, x) 2\pi y ds [\sin \theta + \mu \cos \theta], \\ dF_x &= \sigma_N (V_Z, x) 2\pi y ds \left[\frac{dy}{ds} + \mu \frac{dx}{ds} \right], \end{aligned} \quad (16)$$

$$V = V_Z \cos \theta,$$

$$dF_x = \sigma_N (V) 2\pi y \left[\frac{dy}{dx} + \mu \right] dx, \quad (17)$$

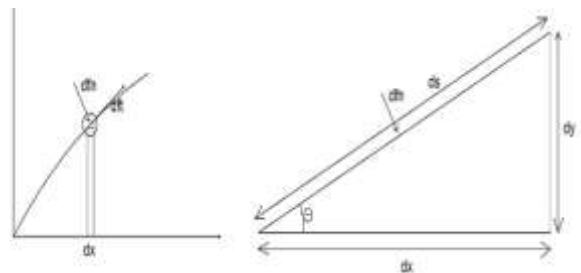
dF_N المان نیروی عمودی وارد بر دماغه، m جرم پرتابه، σ_n تنش عمودی در سطح دماغه، V_Z سرعت محوری پرتابه و μ ضریب اصطکاک میان دماغه پرتابه و هدف می‌باشد. نیروی محوری وارد بر دماغه با انتگرال‌گیری از معادله (۱۷) حاصل می‌شود. با استفاده از قانون دوم نیوتن، معادلات دیفرانسیل (۱۸) حاصل می‌شوند که با حل عددی این معادلات، عمق نفوذ پرتابه به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} ma &= -F, \\ mV_x \frac{dV_x}{dx} &= -F, \\ \frac{dV_x}{dx} &= \frac{-F}{mV_x}, \\ \frac{dx}{dx} &= \frac{mV_x}{-F}, \\ \frac{dx}{dV_x} &= \frac{-F}{-F}, \end{aligned} \quad (18)$$

در جدول شماره ۱، مدل ۱، مربوط به حالت گشایش پلاستیک-الاستیک تراکم‌ناپذیر، مدل ۲ پلاستیک-ترک خورده-الاستیک تراکم‌ناپذیر، مدل ۳ پلاستیک-الاستیک

۲-۵- بهینه‌سازی با استفاده از عمق نفوذ به عنوان تابع هدف

بن دور [۴] با الهام گرفتن از نتایج جونز [۱] از ابتدا نوک تخت برای دماغه پرتابه در نظر گرفت و سپس با استفاده از تابع تنش ارائه شده توسط فرستال [۸] و محاسبه نیروی وارد بر دماغه با هدف بیشینه شدن عمق نفوذ و استفاده از دو روش مختلف تحلیلی و عددی شکل بهینه دماغه را محاسبه کرده است.



شکل (۳): المان نیروهای عمودی و مماسی وارد بر دماغه پرتابه

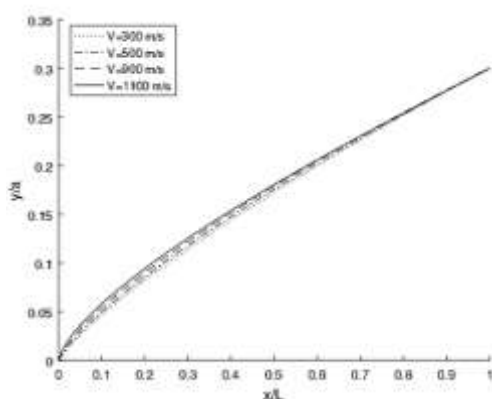
بن دور، در به دست آوردن تحلیلی شکل بهینه دماغه از اصطکاک صرف نظر کرده است و در بهینه‌سازی به روش عددی نیروی اصطکاک را به صورت حاصل ضرب یک ضریب اصطکاک ثابت در نیروی عمودی وارد بر پرتابه در نظر گرفته است. در این مطالعه نیز از تابع تنش ارائه شده توسط فرستال [۸] برای محاسبه عمق نفوذ به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی استفاده شده است. تفاوت اصلی روش استفاده شده در مطالعه حاضر با روش استفاده شده توسط بن دور در تابع مولد در نظر گرفته شده برای دماغه می‌باشد. در تابع مولد استفاده شده در مطالعه حاضر، نوک تخت برای دماغه در نظر گرفته نشده است و تابع مولد در نظر گرفته شده قابلیت نزدیک شدن به دماغه‌ای با نوک تخت را دارد و نزدیک بودن نوک دماغه به دماغه تخت، به نتیجه بهینه‌سازی بستگی خواهد داشت.

۲-۶- محاسبه نیروی محوری وارد بر دماغه و عمق نفوذ پرتابه

فرستال [۸] تنش عمودی وارد بر دماغه پرتابه در حین نفوذ را به صورت معادله‌ای در جهه دو (معادله (۱۴)) در نظر گرفت. سپس با برآزش داده‌های حاصل از حل معادلات

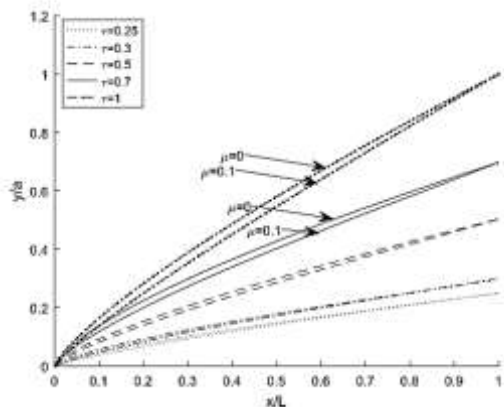
مشاهده می‌شود که شکل بهینه دماغه در سه نوع تابع مولد یک تکه، خصوصاً در مقادیر پایین نسبت T ، شباهت بسیاری به یکدیگر دارند.

در شکل ۵ دماغه‌های بهینه‌سازی شده با قرار دادن عمق نفوذ به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی و استفاده از تابع تنش سه ترمه و تابع مولد دماغه شش ترمه در سرعت‌های مختلف و نسبت شعاع ساقه به طول دماغه $\tau=0.3$ و ضریب اصطکاک 0.1 نمایش داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برخورد شکل بهینه دماغه به دماغه‌ای با نوک تخت نزدیک‌تر می‌شود. این مشاهده با نتایج ارائه شده توسط جونز [۵] نیز منطبق است.



شکل (۵): دماغه‌های حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از عمق نفوذ به عنوان تابع هدف، در سرعت‌های برخورد مختلف

در شکل (۱۰)، مقایسه دماغه‌های بهینه‌سازی شده با استفاده از تابع هدف عمق نفوذ و در دو ضریب اصطکاک مختلف و نسبت‌های متفاوت τ انجام شده است.



شکل (۶): دماغه‌های حاصل از بهینه‌سازی با در نظر گرفتن عمق نفوذ به عنوان تابع هدف در نسبت‌های مختلف T .

تراکم پذیر و مدل ۴ مربوط به حالت گشایش پلاستیک-ترک خورده-الاستیک تراکم پذیر می‌باشد.

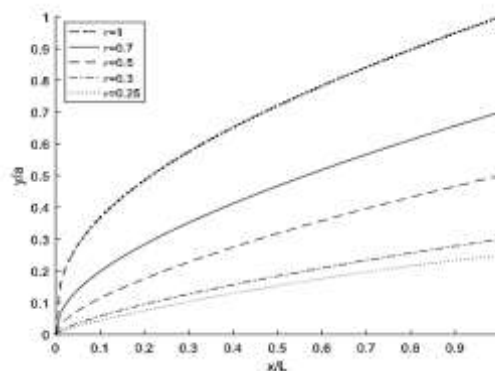
جدول (۱): مقدار پارامترهای تابع تنش، در مدل‌های مختلف گشایش ماده [۸]

مدل	A	B	C
۱	۵/۱۸	۰	۳/۸۸
۲	۴/۰۵	۱/۳۶	۳/۵۱
۳	۴/۵۰	۰/۷۵	۱/۲۹
۴	۳/۴۵	۱/۶۰	۱/۱۲

با حل عددی معادله دیفرانسیل (۱۶)، عمق نفوذ دماغه حاصل می‌شود. با استفاده از عمق نفوذ محاسبه شده به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی، شکل بهینه دماغه حاصل خواهد شد. در بهینه‌سازی با استفاده از عمق نفوذ، از تابع مولد یک تکه و شش پارامتری (معادله (۱۰)) استفاده شده است.

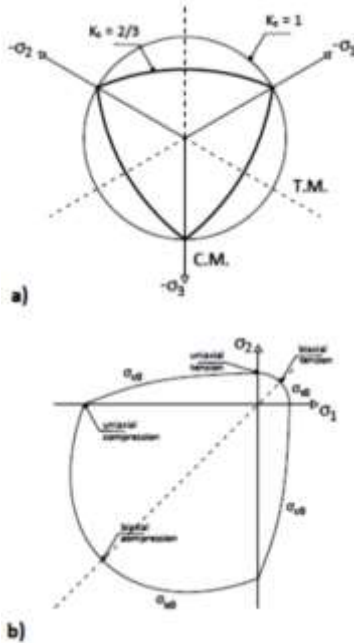
۳- نتایج بهینه‌سازی

در شکل‌های ۶-۴ دماغه‌های بهینه‌سازی شده با استفاده از تابع مولد دماغه یک تکه نمایش داده شده است. در بهینه‌سازی این دماغه‌ها هدف کمینه کردن ضریب شکل دماغه می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت شعاع ساقه به طول دماغه، نوک دماغه به دماغه تخت نزدیک می‌شود. در شکل ۴ دماغه‌های بهینه‌سازی شده با استفاده از تابع مولد چهار پارامتری، در شکل ۵ دماغه‌های بهینه‌سازی شده با استفاده از تابع مولد شش پارامتری و در شکل ۶ دماغه‌های بهینه‌سازی شده با استفاده از تابع مولد هشت پارامتری نمایش داده شده است.

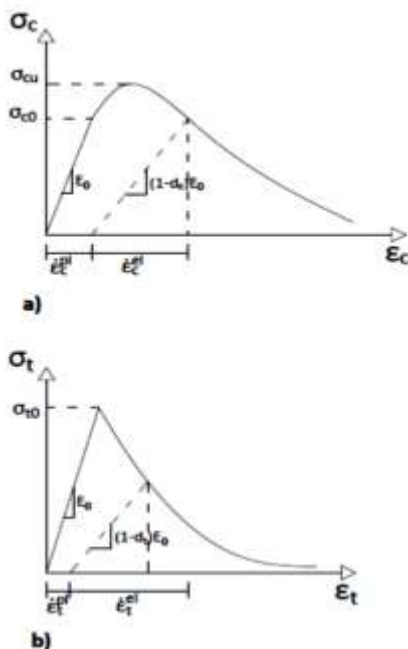


شکل (۴): دماغه‌های حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از تابع مولد دماغه یک تکه و چهار پارامتری.

کششی نهایی σ_{t0} و تا رسیدن به این تنش نهایی ناحیه پلاستیک آغاز نمی‌شود.



شکل (۷): سطوح تسلیم در مدل CDP تصویر a سطوح هشت‌وجهی^۲ و تصویر b سطوح تنش دو بعدی



شکل (۸): نمودار تنش- کرنش، نمودار a تنش-کرنش تک‌محوره فشاری و نمودار b تنش کرنش تک‌محوره کششی را نمایش می‌دهد.

در شکل ۶ نتایج بهینه‌سازی دماغه‌هایی با نسبت‌های مختلف شعاع ساقه به طول دماغه T و در دو ضریب اصطکاک ۰ و ۰/۱ نمایش داده است. مشاهده می‌شود که در ضریب اصطکاک صفر، شکل دماغه بهینه به دماغه‌ای با نوک تخت نزدیک می‌شود. در مرجع [۵] نیز مشاهده می‌شود که در ضرایب اصطکاک پایین‌تر، دماغه بهینه‌سازی شده، شباهت بیشتری به دماغه‌ای با نوک تخت دارد.

۳-۱- محاسبه عمق نفوذ با استفاده از روش‌های المان محدود

همان‌طور که بیان شد، در به دست آوردن شکل بهینه دماغه از دو تابع هدف مختلف ضریب شکل دماغه و عمق نفوذ پرتابه استفاده شد. در این بخش جهت مقایسه عمق نفوذ دماغه‌های بهینه‌سازی شده از روش‌های المان محدود (FEM) استفاده شده است. با توجه به تقارن محوری موجود در مسئله، از حل دو بعدی استفاده شده است. سه نوع پرتابه Ogive3، ONS3 و DOPM-500 جهت مقایسه عمق نفوذ انتخاب شده‌اند. خواص بتن با استفاده از مدل CDP^۱ اعمال شده است و پرتابه صلب در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ پرتابه صلب در حال نفوذ در هدف بتنی نمایش داده شده است. تصویر نمایش داده شده از دوران مدل دوبعدی استفاده شده با استفاده از ابزارهای گرافیکی به دست آمده است.

۳-۲- مدل ساختاری استفاده شده در مدل سازی هدف بتنی

این مدل ساختاری استفاده شده در نرم‌افزار ABAQUS، عمدتاً برای تحلیل سازه‌های بتنی و سایر مواد شبه شکننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. سطوح تسلیم CDP در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.

در شکل a مشاهده می‌شود که یک رژیم الاستیک اولیه وجود دارد که با یک خط مستقیم مطابق با مدول یانگ رفتار می‌کند. پس از تنش فشاری σ_{c0} رژیم پلاستیک شروع می‌شود تا اینکه به فشار استرس فشاری نهایی رسید و در نهایت، بتن نرم می‌شود. در b رفتار مشابه با a مشاهده می‌شود به‌استثنای اینکه تنش تسلیم برابر است با تنش

² Deviatoric plane

¹ Concrete damage plasticity

۳-۳- شرایط مرزی اعمال شده به پرتابه و هدف

در شکل ۱۱ شرایط مرزی اعمال شده در سطح بیرونی هدف بتنی نمایش داده شده است. حرکت در تمامی جهتها در مرز بیرونی هدف برابر با صفر در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن محوری مسئله، و ناچیز در نظر گرفتن جابه‌جایی در سطح جانبی هدف استوانه‌ای در جهت شعاعی، جابه‌جایی در این سطوح در تمامی جهات برابر با صفر خواهد بود. در آزمایش‌های برخورد استفاده شده در این مطالعه جهت مقایسه نتایج حل از روش‌های مختلف، اهداف بتنی به روش قالب‌گیری در قالب‌های استوانه‌ای فلزی تولید شده‌اند. نتایج مطالعات فرستال [۳۴] نشان می‌دهد که در نسبت‌های قطر هدف به قطر پرتابه بزرگ‌تر از ۲۵، افزایش قطر پرتابه تأثیری در نتایج آزمایش‌های عمق نفوذ نخواهد گذاشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نسبت‌های بزرگ‌تر از مقدار ذکر شده، سطح بیرونی هدف قالب‌گیری در استوانه فلزی از برخورد تأثیر نمی‌پذیرد.



شکل (۹): شرایط مرزی اعمال شده به هدف بتنی

در شکل ۱۰ قیود اعمال شده به پرتابه صلب نمایش داده شده است. حرکت پرتابه در تمامی جهتها به جز محور طولی پرتابه محدود شده است. با توجه به صلب در نظر گرفتن پرتابه، تمامی قیود به نقطه‌ای مرجع واقع در نوک پرتابه اعمال می‌شود. همان‌طور که ذکر شد، هندسه پرتابه و اهداف دارای تقارن محوری می‌باشند و شرایط مرزی و بارگذاری (برخورد) نیز دارای این نوع تقارن هستند، بنابراین مسئله به صورت تقارن محوری مدل شده است. با توجه به این مسئله، تمامی درجات آزادی پرتابه به جز حرکت در راستای محور طولی محدود شده است.



شکل (۱۰): شرایط مرزی اعمال شده به پرتابه

در جدول ۲ مشخصات هندسی و خواص مادی هدف استفاده شده در تحلیل المان محدود عمق نفوذ ذکر شده است. قطر هدف به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که با توجه به مطالعات فرستال [۳۱] در جدول ۳ مشخصات هندسی پرتابه استفاده شده در تحلیل المان محدود عمق نفوذ آورده شده است. همان‌طور که ذکر شد، پرتابه استفاده شده در تحلیل صلب در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مشخصات هندسی و خواص مادی هدف

استفاده شده در تحلیل المان محدود عمق نفوذ

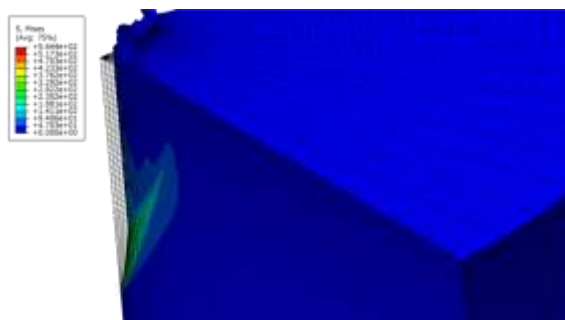
۱۸۰	قطر هدف (mm)
۷۰۰	طول هدف (mm)
۳۰	مقاومت فشاری (MPa)
۲۴۰۰	چگالی (kg/m^3)

جدول (۳): مشخصات هندسی پرتابه‌های استفاده شده در

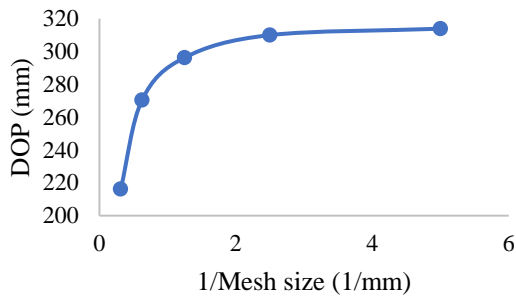
تحلیل المان محدود عمق نفوذ

نوع دماغه	Ogive-3	ONS-3	DOPM-500
جرم پرتابه (gr)	۱۰	۱۰	۱۰
قطر پرتابه (mm)	۷	۷	۷
طول پرتابه (mm)	۴۱	۴۴/۶	۴۲/۷

در شکل ۱۲ بخشی از مش‌بندی هدف بتنی نمایش داده شده است. طول کوچک‌ترین المان برابر با 0.2 mm در نظر گرفته شده است.



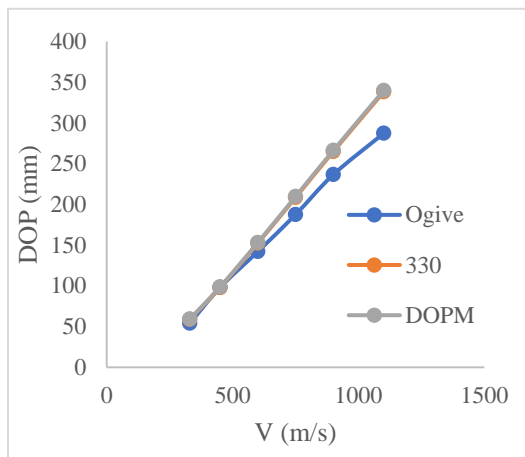
شکل (۱۱): پرتابه صلب در حال نفوذ در هدف بتنی.



شکل (۱۴): حساسیت‌سنجی به اندازه المان در نمونه اجایو با سرعت ۱۱۰۰ m/s.

در جدول ۴ عمق نفوذ پرتابه با دماغه‌های Ogive، ONS و DOPM آورده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو نوع تحلیل عددی و المان محدود عمق نفوذ دماغه‌های بهینه‌سازی‌شده در پژوهش حاضر، به مقدار قابل توجهی از عمق نفوذ دماغه اجایو بیشتر می‌باشد.

در شکل ۱۵ عمق نفوذ سه نوع دماغه DOPM، ONS و Ogive که با حل عددی معادلات دیفرانسیل حاصل از تئوری‌های گشایش مواد به دست آمده‌اند، مقایسه شده‌اند.



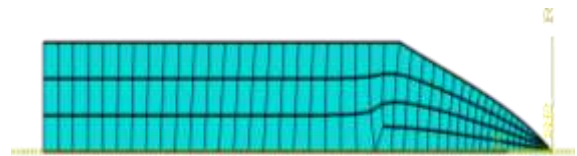
شکل (۱۵): مقایسه عمق نفوذ محاسبه‌شده با استفاده از حل عددی معادلات حاصل از تئوری‌های گشایش در سه نوع دماغه DOPM، ONS و Ogive

در شکل ۱۶ عمق نفوذ سه نوع دماغه DOPM، ONS و Ogive که با استفاده از روش‌های المان محدود به دست آمده‌اند، مقایسه گشته‌اند. در این نمودار نیز مانند روش محاسبه عددی عمق نفوذ مشاهده می‌شود عمق نفوذ دماغه‌های ONS و DOPM بسیار نزدیک به هم هستند.



شکل (۱۲): نمای مش‌بندی هدف بتنی در حالت تقارن محوری.

در شکل ۱۳ مش‌بندی پرتابه نمایش داده شده است. طول کوچک‌ترین المان که در قسمت نوک دماغه قرار دارد برابر با ۰/۳ mm در نظر گرفته شده است.



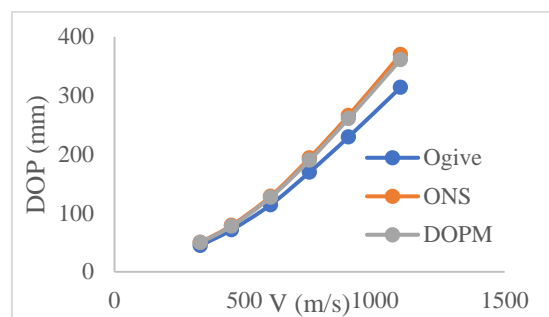
شکل (۱۳): مش‌بندی استفاده‌شده در مدل کردن پرتابه

۳-۴- حساسیت‌سنجی به اندازه المان

در مدل پرکاربرد و شناخته شده‌ی CDP، تنها با داشتن مقاومت فشاری بتن، نمودار تنش کرنش آن را پیش‌بینی کرد. بنابراین در این مطالعه، تنها از خواص مقاومت فشاری و چگالی بتن جهت محاسبه عمق نفوذ به روش المان محدود استفاده شده است. مقاومت فشاری بتن برابر با ۳۰ MPa و چگالی بتن برابر با ۲۴۰۰ kg/m³ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۴ حساسیت‌سنجی به اندازه المان انجام گرفته در نمونه پرتابه اجایو ۱۰ گرمی که با سرعت ۱۱۰۰ m/s به هدف بتنی با مقاومت فشاری ۳۰ MPa برخورد می‌کند، نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف میان نتایج عمق نفوذ در حالت استفاده از المان با طول ۰/۲ mm (نسبت نمایش داده شده در محور طولی نمودار برابر با ۵) و در حالت استفاده از المان با طول ۰/۴ mm (نسبت نمایش داده شده در محور طولی نمودار برابر با ۲/۵) اندک می‌باشد و شیب نمودار به سمت افقی شدن میل کرده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

جهت ارزیابی عمق نفوذ دماغه‌های بهینه‌سازی‌شده، عمق نفوذ دماغه‌های مذکور، با دماغه اجایو با نسبت τ مشابه مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۴ ذکر شده است. بهینه‌سازی دماغه نفوذگر جنبشی، با هدف پیشینه شدن عمق نفوذ، در چند روش مختلف بهینه‌سازی انجام گرفت. دو نوع تابع هدف عمق نفوذ پرتابه و ضریب شکل دماغه جهت بهینه‌سازی انتخاب شدند. توابع مولد که از دوران پروفیل این توابع حول محور طولی شکل دماغه حاصل می‌شود، جهت بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. جهت محاسبه عمق نفوذ، از تابع تنش ارائه شده توسط فرستال [۸] برای بتن تراکم پذیر در حالت گشایش پلاستیک-تراکم‌پذیر-الاستیک (مدل شماره (۴) در جدول ۱) استفاده شد. این تابع تنش، از برآزش داده‌های حاصل از حل عددی معادلات دیفرانسیل حاصل از تئوری گشایش کروی ماده هدف به دست آمده است. در جدول ۲ عمق نفوذ دماغه اجایو کالیبر (۳)، دماغه ارائه شده توسط جونز [۱] با نسبت $\tau=0/3$ ، دماغه بهینه‌سازی شده (ONS) و دماغه‌های بهینه‌سازی شده با تابع هدف عمق نفوذ در سرعت‌های برخورد متفاوت ارائه شده است. در نمودار ۱۱ نتایج جداول ۲ جهت مقایسه بهتر نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف اندکی میان عمق نفوذ دماغه‌های DOPM و ONS وجود دارد. اختلاف اندک میان نتایج عمق نفوذ دماغه‌های ONS و DOPM و بیشتر بودن عمق نفوذ دماغه‌های (ONS) و (JONES) در نسبت $\tau=0/3$ با توجه به کمتر بودن تابع شکل دماغه (ONS) نسبت به دماغه (JONES) در این نسبت τ و همچنین شباهت بسیار زیاد دماغه‌های بهینه‌سازی شده با تابع هدف عمق نفوذ و ضریب شکل، همگی نشان از مناسب بودن تابع ضریب شکل برای بهینه‌سازی دماغه پرتابه و همخوانی نتایج بهینه‌سازی با استفاده از تابع هدف ضریب شکل و تابع هدف عمق نفوذ دارد.



شکل (۱۶): مقایسه عمق نفوذ محاسبه‌شده با استفاده از روش‌های المان محدود در سه نوع دماغه Ogive و ONS, DOPM

با توجه به نمودار و داده‌های نشان داده‌شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود که عمق نفوذ دماغه‌های بهینه‌سازی شده در هر دو روش استفاده از ضریب شکل دماغه و عمق نفوذ، در شرایط برخورد یکسان، نسبت به دماغه اجایو با نسبت شعاع ساقه به طول دماغه یکسان، افزایش قابل توجهی داشته است. با مقایسه عمق نفوذ دماغه‌های ONS و DOPM، مشاهده می‌شود که در هر دو روش محاسبه عمق نفوذ با استفاده از حل عددی معادلات حاصل از تئوری گشایش حفره ارائه‌شده توسط فرستال [۸] و محاسبه عمق نفوذ دماغه با استفاده از روش‌های المان محدود، عمق نفوذ این دو دماغه بسیار نزدیک به هم می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تابع هدف ضریب شکل، می‌تواند در بهینه‌سازی شکل دماغه با هدف پیشینه شدن عمق نفوذ، کاملاً جایگزین مناسبی برای تابع هدف عمق نفوذ باشد و با توجه به ساده‌تر بودن محاسبه ضریب شکل با استفاده از این تابع به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی هزینه‌های محاسباتی به‌طور مؤثری کاهش می‌یابند. در جدول ۵ مقایسه‌ای میان ضرایب شکل محاسبه شده برای دماغه‌های ارائه شده توسط جونز، دماغه اجایو با کالیبر (۳) و دماغه‌های بهینه‌سازی شده در این پژوهش انجام گرفته است. مشاهده می‌شود که ضرایب شکل محاسبه شده برای دماغه‌های بهینه‌سازی ارائه‌شده جونز و دماغه‌های بهینه‌سازی شده در این پژوهش مقادیر بسیار نزدیکی به یکدیگر دارند و مقادیر ضریب شکل در نسبت $\tau=3$ بسیار نسبت به دماغه اجایو با همین نسبت τ دارای ضریب شکل پایین‌تری می‌باشند.

جدول (۴): عمق نفوذ پرتابه با دماغه‌های ONS و DOPM حاصل از تحلیل عددی و المان محدود

ردیف	نوع دماغه	جرم پرتابه (gr)	قطر پرتابه (mm)	طول پرتابه (mm)	نسبت شعاع ساقه به طول دماغه	سرعت برخورد (m/s)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	قطر هدف (mm)	عمق نفوذ حل - عددی $Miu=0.2$	عمق نفوذ - المان محدود (mm)
۱	OG-3	۱۰	۷	۴۱	۰/۳	۳۳۰	۳۰	۱۷۵	۵۴/۱	۴۴/۸
۲	OG-3	۱۰	۷	۴۱	۰/۳	۴۵۰	۳۰	۱۷۵	۹۷/۹	۷۱/۵
۳	OG-3	۱۰	۷	۴۱	۰/۳	۶۰۰	۳۰	۱۷۵	۱۴۲/۱	۱۱۴/۲
۴	OG-3	۱۰	۷	۴۱	۰/۳	۷۰۰	۳۰	۱۷۵	۱۸۷/۱	۱۶۹/۸
۵	OG-3	۱۰	۷	۴۱	۰/۳	۹۰۰	۳۰	۱۷۵	۲۳۶/۶	۲۲۹/۶
۶	OG-3	۱۰	۷	۴۱	۰/۳	۱۱۰۰	۳۰	۱۷۵	۲۸۷/۳	۳۱۳/۹
۷	ONS(3)	۱۰	۷	۴۴/۶	۰/۳	۳۳۰	۳۰	۱۷۵	۵۸/۷	۵۰/۱
۸	ONS(3)	۱۰	۷	۴۴/۶	۰/۳	۴۵۰	۳۰	۱۷۵	۹۷/۹	۷۹/۱۸
۹	ONS(3)	۱۰	۷	۴۴/۶	۰/۳	۶۰۰	۳۰	۱۷۵	۱۵۲/۳	۱۲۸/۵
۱۰	ONS(3)	۱۰	۷	۴۴/۶	۰/۳	۷۰۰	۳۰	۱۷۵	۲۰۸/۵	۱۹۳/۹
۱۱	ONS(3)	۱۰	۷	۴۴/۶	۰/۳	۹۰۰	۳۰	۱۷۵	۲۶۵	۲۶۶/۲
۱۲	ONS(3)	۱۰	۷	۴۴/۶	۰/۳	۱۱۰۰	۳۰	۱۷۵	۳۳۸/۲	۳۷۰
۱۳	DOPM-500	۱۰	۷	۴۲/۷	۰/۳	۳۳۰	۳۰	۱۷۵	۵۹/۲	۵۰
۱۴	DOPM-500	۱۰	۷	۴۲/۷	۰/۳	۴۵۰	۳۰	۱۷۵	۹۸/۶	۷۷/۸
۱۵	DOPM-500	۱۰	۷	۴۲/۷	۰/۳	۶۰۰	۳۰	۱۷۵	۱۵۳/۱	۱۲۶/۸
۱۶	DOPM-500	۱۰	۷	۴۲/۷	۰/۳	۷۰۰	۳۰	۱۷۵	۲۰۹/۷	۱۹۰
۱۷	DOPM-500	۱۰	۷	۴۲/۷	۰/۳	۹۰۰	۳۰	۱۷۵	۲۶۶/۳	۲۶۰/۹
۱۸	DOPM-500	۱۰	۷	۴۲/۷	۰/۳	۱۱۰۰	۳۰	۱۷۵	۳۳۹/۸	۳۶۱/۲

جدول (۵): مقایسه ضرایب شکل دماغه‌های مختلف، در نسبت‌های مختلف شعاع ساقه به طول دماغه (T).

نوع دماغه	τ	۰/۱	۰/۲۵	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۹	۱
ONS(6)	-	۰/۰۴۸۵۲۴	۰/۰۶۸۰۷	۰/۱۶۱۱۷۳	۰/۲۶۴۴۶	۰/۳۷۳۵	۰/۳۸۳۱۶	
ONS(8)	-	۰/۰۴۸۵	۰/۰۶۶۷	۰/۱۶۲۹	۰/۲۶۰۷	-	۰/۳۸۲۴	
ONS(4)	-	۰/۰۴۸	۰/۰۶۸۸۸۸۸۸۹	۰/۱۶۳۲	۰/۲۶۳۶۷۳۴۶۹	۰/۳۴۰۵	۰/۳۳۳۸	
TP	۰/۰۰۸۶	۰/۰۴۹۶	۰/۰۶۹۵	۰/۱۶۶۳	۰/۲۶۷۶	-	۰/۳۹۶۵	
DOPM	-	-	-	-	-	-	-	
JONES	۰/۰۰۸۳	-	۰/۰۶۸۷	۰/۱۶۷۲	۰/۲۶۱۹	۰/۳۴۴۶	-	
OGIVE (3)	-	-	۰/۱۰۶۵	-	-	-	-	

۵- مراجع

11. Yu Shan H. W., Fenglei Huang, and Jinzhu Li, "On the Inertia Term of Projectile's Penetration Resistance," 2013.
12. Liu J., Pi A., and Huang F., "Penetration performance of double-ogive-nose projectiles," *International Journal of Impact Engineering*, Article Vol. 84, pp. 13-23, 2015.
13. Chen X. W. and Li Q. M., "Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, No. 6, pp. 619-637, 2002/07/01.
14. Dong H., Liu Z., Wu H., Gao X., Pi A., and Huang F., "Study on penetration characteristics of high-speed elliptical cross-sectional projectiles into concrete," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 132, p. 103311, 2019/10/01.
15. Fan R. and Li Q. M., "Penetration resistance and the critical cavitation velocity for an ogive-nosed rigid projectile penetrating into a semi-infinite metallic target," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 134, p. 103391, 2019/12/01.
16. Rubin M. B. and Yarin A. L., "A generalized formula for the penetration depth of a deformable projectile," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 387-398, 2002/04/01.
17. Shi C., Wang M., Li J., and Li M., "A model of depth calculation for projectile penetration into dry sand and comparison with experiments," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 73, pp. 112-122, 2014/11/01.
18. Kong X. Z., Wu H., Fang Q., and Peng Y., "Rigid and eroding projectile penetration into concrete targets based on an extended dynamic cavity expansion model," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 100, No. Supplement C, pp. 13-22, 2017/02/01.
19. Forrestal M. J., Frew D. J., Hickerson J. P., and Rohwer T. A., "Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 479-497, 2003/05/01.
1. Jones S. E., Rule W. K., Jerome D. M., and Klug R. T., "On the optimal nose geometry for a rigid penetrator," pp. 413-417, 1998.
2. Li Q. M. and X. W. Chen, "Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 93-116, 2003/01/01/ 2003.
3. Forrestal M. J., Altman B. S., Cargile J. D., and Hanchak S. J., "An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 395-405, 1994/08/01.
4. Ben-Dor G., *Applied High-Speed Plate Penetration Dynamics*. 2006.
5. Jones S. E. and Rule W. K., "On the optimal nose geometry for a rigid penetrator, including the effects of pressure-dependent friction," *International Journal of Impact Engineering - Int J Impact Eng.*, Vol. 24, pp. 403-415, 04/01 2000.
6. Yankelevsky D. Z. and Gluck J., "Nose shape effect on high velocity soil penetration," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 22, No. 5, pp. 297-311, 1980/01/01.
7. Dubinsky A. and Elperin T., "Modeling of High-Speed Penetration Into Concrete Shields and Shape Optimization of Impactors AU - Ben-Dor, G," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 34, No. 2, pp. 139-156, 2006/07/01.
8. Forrestal M. J. and Tzou D. Y., "A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, No. 31, pp. 4127-41.
9. Ben-Dor G., Dubinsky A., and Elperin T., "Shape optimization of high-speed penetrators: a review," *Central European Journal of Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 473-482, 2012/12/01.
10. Ben-Dor G., Dubinsky A., and Elperin T., "Shape optimization of penetrator nose," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 35, No. 3, pp. 261-270, 2001/05/01/ 2001.

- Engineering, Vol. 106, pp. 18-29, 2017/08/01.
28. Forrestal M. J. and Piekutowski A. J., "Penetration experiments with 6061-T6511 aluminum targets and spherical-nose steel projectiles at striking velocities between 0.5 and 3.0km/s," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 57-67, 2000/01/01.
 29. Vahedi K., Latifi M., and Khosravi F., "Investigation and Analysis of ogive-shape nose steel projectile into concrete target," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 32, No. 5, pp. 295-302, 2009.
 30. Ölçmen S., Jones S. E., and Weiner R. H., "A numerical analysis of projectile nose geometry including sliding friction for penetration into geological targets." 2016.
 31. Liyaghat. G., and Pol, M. H. "Analysis of the penetration of inclined projectiles in thin metal plates", *J Aerospace Mechanics*, Vol. 5, No. 2, 2009. (In Persian)
 32. Vahedi. K., and Moshtaghian M., "Investigation and analysis of projectile penetration in a ceramic / composite target", *J Aerospace Mechanics*, Vol. 6, No. 4, 2011. (In Persian)
 33. Vahedi K. and Ghaseminia A., "Analysis and comparison of rod projectile penetration models in semi-infinite targets", *J Aerospace Mechanics*, Vol. 1, No. 3, 2005. (In Persian)
 34. Frew D. J., Forrestal M. J., and Cargile J. D., "The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 10, pp. 1584-1594, 2006/10/01.
 20. Chian S. C., Tan B. C. V., and Sarma A., "Reprint of: Projectile penetration into sand: Relative density of sand and projectile nose shape and mass," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 105, pp. 88-0.
 21. Chen X.-w. and Li J.-c., "Analysis on the resistive force in penetration of a rigid projectile," *Defence Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 285-293, 2014/09/01.
 22. Neely-Horton R. N. D. S. E. J. A. M., "Design of hard-target penetrator nose geometry in the presence of high-speed, velocity-dependent friction, including the effects of mass loss and blunting," 2004.
 23. Wen H. M., Yang Y., and He T., "Effects of abrasion on the penetration of ogival-nosed projectiles into concrete targets," *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 7, pp. 413-422, 2010.
 24. Silling S. A. and Forrestal M. J., "Mass loss from abrasion on ogive-nose steel projectiles that penetrate concrete targets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 11, pp. 1814-1820, 2007/11/01.
 25. Chen X., He L., and Yang S., "Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator," *European Journal of Mechanics A-solids- Eur J Mech A-Solid*, Vol. 29, pp. 7-17, 02/28 2010.
 26. Mu Z. and Zhang W., "An investigation on mass loss of ogival projectiles penetrating concrete targets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 8, pp. 770-778, 2011/08/01.
 27. Kong X. Z., Wu H., Fang Q., Zhang W., and Xiao Y. K., "Projectile penetration into mortar targets with a broad range of striking velocities: Test and analyses," *International Journal of Impact*