

مدل‌سازی و تحلیل برخورد پرتابه صلب با دال بتنی غیر مسلح

احمد صالحی^۱، سید امیرالدین صدرنژاد^۲، امیر ساعدی داریان^۳

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۶/۰۷

چکیده

یکی از مواردی که در بحث مقاوم‌سازی سازه‌ها به منظور اجرای اصل پدافند غیرعامل ضروری است مدل‌سازی و تحلیل برخورد گلوله (پرتابه) با سازه‌ها می‌باشد. به منظور مطالعه پدیده نفوذ پرتابه در سازه‌ها لازم است عوامل مهم تأثیرگذار در این پدیده شناخته شود که در نهایت این شناخت منجر به پیش‌بینی عمق نفوذ و به حداقل رساندن آن می‌گردد. از عوامل بسیار مؤثر در میزان عمق نهایی نفوذ، نوع و میزان استهلاک انرژی در طی پدیده نفوذ می‌باشد. به طور کلی استهلاک انرژی در سه مرحله از پدیده نفوذ و به سه شکل مختلف صورت می‌گیرد که شامل مرحله برخورد، ناحیه تونل و مرحله خروج می‌باشد. در مرحله اول یعنی برخورد پرتابه با هدف بتنی، پارامتر مؤثر در استهلاک انرژی، مقاومت فشاری بتن است؛ در حالی که در خصوص مراحل دوم و سوم، به ترتیب: مقاومت برشی - اصطکاکی و مقاومت کششی بتن دارای اهمیت می‌باشد. در این مقاله با بررسی عوامل مختلف در میزان استهلاک انرژی در این سه مرحله نشان داده می‌شود که میزان انرژی مستهلک شده در مرحله تونل (برشی - اصطکاکی مابین پرتابه و بتن) به علت شکل هندسی نوک پرتابه نسبت به دو مرحله دیگر کمتر است؛ به عبارت دیگر بخش اعظمی از اتلاف انرژی در پدیده نفوذ در نقطه برخورد و نقطه خروج پرتابه از جوجه جلویی و پشتی دال صورت می‌پذیرد. در نهایت با توجه به نتایج بالا می‌توان گفت جهت افزایش کارایی و مقاومت در پدیده نفوذ یک راه‌حل اجرایی و کم هزینه، اجرای یک ضخامت مشخص بتن در چند لایه جداگانه و با فاصله کم می‌باشد که در مقایسه با بتن یکپارچه با همان ضخامت، جذب انرژی بالاتر و در نهایت، عمق نفوذ کمتر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بتن، پرتابه، عمق نفوذ، استهلاک انرژی، LS-DYNA

۱- کارشناس ارشد سازه

۲- استاد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Email: amir_saedi_d@yahoo.com

۱- مقدمه

پسماند پرتابه و میزان تخریب در محل‌های ورود و خروج پرتابه می‌باشند، که در این تحقیق نیز همین موارد به منظور بررسی‌های اصلی به کار گرفته شدند. در ادامه پس از معرفی مدل ماده، معادله حالت، الگوریتم فرسایش، و ضریب افزایش دینامیکی، مسئله اصلی معرفی و نتایج تحلیل‌های انجام گرفته ارائه می‌گردند.

۲- معادله حالت

معادله حالت، رابطه‌ای است که فشار را با دانسیته ماده (حجم مشخصه) و انرژی داخلی مشخصه ماده مرتبط می‌کند، که شکل کلی آن به صورت $p = p(e, \rho)$ می‌باشد که در آن، ρ دانسیته و e انرژی داخلی مشخصه می‌باشد. به طور کلی اگر نرم‌افزارهای اجزای محدود برای تحلیل‌های استاتیکی استفاده شوند، استفاده از مدل ماده به تنهایی و بدون تعریف یک معادله حالت مجزا می‌تواند توصیف کننده رفتار ماده باشد. اما برای حالت بارگذاری بسیار شدید از قبیل انفجار و یا نفوذ در بتن مقادیر فشارهای هیدرواستاتیک، آن‌قدر بالا هستند که رفتار غیر خطی ماده حتماً بایستی مدنظر قرار گیرد. در این تحقیق نیز با استفاده از معادله حالت Tabulated Compaction این مسئله لحاظ گردیده است که فرمول اصلی آن در مرحله بارگذاری به صورت $P = C(\epsilon_v) + \gamma T(\epsilon_v)E$ می‌باشد. در این معادله T بیانگر دماست که با توجه به عدم بررسی تغییرات دما در این تحقیق، جمله دوم سمت راست معادله حذف می‌گردد. ϵ_v کرنش حجمی و توسط لگاریتم طبیعی حجم نسبی تعریف می‌شود، و C نیز دارای بعد فشار می‌باشد که با توجه به آزمایش‌های انجام شده برای استحصال معادله حالت محاسبه می‌گردد. مرحله باربرداری در راستای مدول بالک باربرداری تا نقطه گسیختگی ادامه می‌یابد و بارگذاری مجدد، همیشه مسیر باربرداری قبلی را طی می‌کند تا به نقطه شروع باربرداری برسد و از آن به بعد از روی مسیر بارگذاری ادامه می‌یابد. برای تعریف معادله حالت حداکثر ۱۰ نقطه و حداقل ۲ نقطه را می‌توان تعریف نمود و مابقی نقاط را LS-DYNA به صورت خودکار با استفاده از نقاط داده شده استخراج می‌نماید. شکل شماتیک معادله حالت در شکل (۱) و نمودار معادله حالت اعمال شده در این مقاله در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشند [۲].

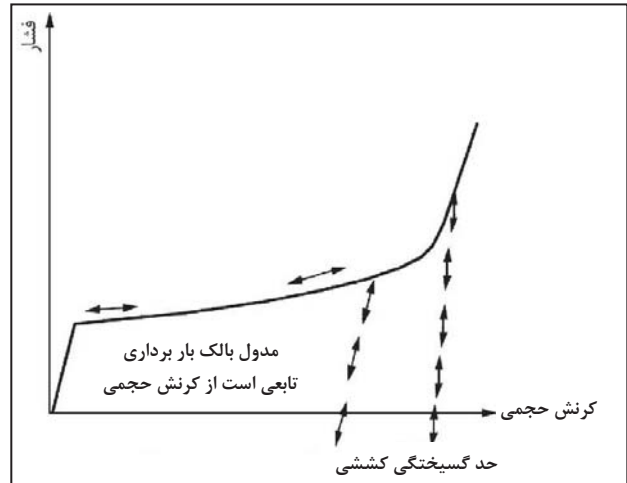
پاسخ بتن در برابر بارگذاری برخورد، بسیار متفاوت با بارگذاری استاتیکی می‌باشد و مقاومت‌های کششی، فشاری و سختی اولیه به دلیل تاثیرات ناشی از روند تغییر کرنش افزایش می‌یابند. وقتی پرتابه نفوذ می‌کند، خردشدگی در محل برخورد رخ داده و ممکن است برآمدگی یا حتی سوراخ در سمت دیگر نیز روی دهد. برای پیش‌بینی عمق نفوذ برخورد پرتابه در بتن با روش‌های عددی، مدل‌هایی از ماده که اثر تغییر روند کرنش، تغییر شکل‌های بزرگ و حالت تنش سه محوری را در نظر می‌گیرند، مورد نیاز می‌باشند. عمق نفوذ، بیشتر به مقاومت فشاری بتن بستگی دارد ولی برای مدل صحیح ترک خوردگی، خرد شدگی و برآمدگی در بتن، رفتار کششی بسیار مهم است. به طور کلی می‌توان گفت برای پیش‌بینی دقیق و موثر برخورد در سازه بتنی به سه جزء اصلی نیاز می‌باشد: (۱) تکنیک‌های مناسب عددی، (۲) معادلات ساختاری و (۳) خواص ماده برای استفاده در معادلات ساختاری. در این مقاله سه مورد فوق با استفاده از نرم افزار LS-DYNA [۱] و به کارگیری کامل‌ترین مدل و معادله حالت آن به منظور مدل‌سازی برخورد پرتابه به بتن محقق گردید، و کلیه مراحل تحلیل نیز به کمک الگوی لاگرانژی مورد بررسی قرار گرفتند. مسئله بسیار مهم دیگر، نحوه اعمال مقاومت بتن در شبیه‌سازی نفوذ است که از عواملی است که در میزان نفوذ پرتابه در بتن بیشترین تأثیر را دارد. واضح است که در مطالعات آزمایشگاهی که با خود بتن سر و کار داریم تأثیر مقاومت بتن کاملاً قابل درک و اندازه‌گیری است، اما در روش‌های عددی که بر مبنای مدل‌سازی رایانه‌ای استوار است، اعمال مقاومت بتن بخصوص در حالات دینامیکی و در نظر گرفتن تأثیر آن در معادلات تنها با استفاده از مدل ساختاری اعمال شده در نرم‌افزار قابل حصول است. حال این مدل ساختاری برای مقاومت بتن می‌تواند یکی از سه حالت: (۱) مقاومت تسلیم ثابت، (۲) مقاومت تسلیم وابسته به فشار و (۳) مقاومت تسلیم وابسته به فشار به همراه خسارات وارده ناشی از خستگی و سخت‌شدگی کرنشی را داشته باشد. در نتیجه با توجه به رفتار دینامیکی بتن در نرخ کرنش‌های مسائل برخورد و مقاومت بالاتر از نقطه تسلیم آن در این مسائل از الگوی سوم برای اعمال مقاومت استفاده گردید. از طرفی وقتی با شبیه‌سازی عددی نفوذ سر و کار داریم، پارامترهای اندازه‌گیری تأثیر مقاومت بتن بر نفوذ در مدل عددی سرعت

است، دارای بانک بسیار غنی از مدل ماده‌های مختلف می‌باشد که برای مدل سازی، گستره وسیعی از پدیده‌ها قابلیت استفاده دارند. مهمترین نکات در خصوص یک مدل ماده مناسب بتن برای پدیده نفوذ این است که علاوه بر امکان اعمال پوش مقاومت وابسته به فشار، امکان اعمال تأثیر نرخ کرنش‌های مختلف در مقاومت، پذیرش الگوریتم فرسایش، تخریب و... را نیز داشته باشد که نمای شماتیک آن در شکل (۳) آمده است [۳-۴].

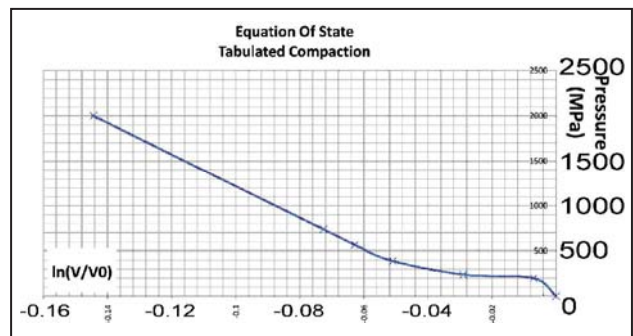
مدل ماده‌های مختلفی در نرم افزار LS-DYNA برای بتن در حالات مختلف وجود دارد که از آن جمله می‌توان به Soil Concrete، Pseudo Tensor و Concrete Damage اشاره نمود که در این مقاله از کامل ترین آنها یعنی مدل Concrete Damage استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که در این مدل ماده، مقاومت گسیختگی تا لحظه‌ای که تنش اصلی حداکثر در المان از حد مجاز تجاوز نکند از نمودار اعمال شده گسیختگی بر حسب فشار دورگیر استخراج می‌گردد؛ اما برای هر بازه زمانی که تنش اصلی از این حد تجاوز نماید آن گاه مقاومت گسیختگی با استفاده از پوش مقاومت پسماند محاسبه می‌گردد. در خصوص پرتابه نیز تنها به ذکر این نکته بسنده می‌شود که به دلیل بروز تغییر شکل‌های بسیار ناچیز در پرتابه‌های سنگین فولادی پس از نفوذ در بتن از مدل ماده صلب برای شبیه سازی آنها استفاده شده است.

۴- فرسایش

وقتی پرتابه در داخل بتن نفوذ می‌کند المان‌های موجود در مدل اجزاء محدودی هدف، دچار تغییر مکان‌های بزرگ می‌شوند. حال با توجه به اینکه از الگوی لاگرانژی برای تحلیل استفاده می‌شود، این تغییر شکل‌های بزرگ باعث در هم ریختگی شدید شبکه مش بندی می‌شوند و در نهایت، منجر به بروز اشکالاتی در حل می‌گردد و حتی ممکن است در حالاتی باعث توقف تحلیل و محاسبات شوند. به منظور غلبه بر مشکل در هم ریختگی شبکه باید از یک الگوریتم فرسایش استفاده نمود. بدین ترتیب که با تعریف ضابطه خاصی به عنوان حد فرسایش اگر در هر المانی ضابطه فوق ارضاء گردد، آن المان از مدل حذف می‌شود که این ضابطه در این تحقیق مقدار $0/9$ برای کمیت کرنش برشی تعریف گردیده است.



شکل ۱- منحنی شماتیک فشار بر حسب کرنش حجمی برای معادله حالت Tabulated Compaction

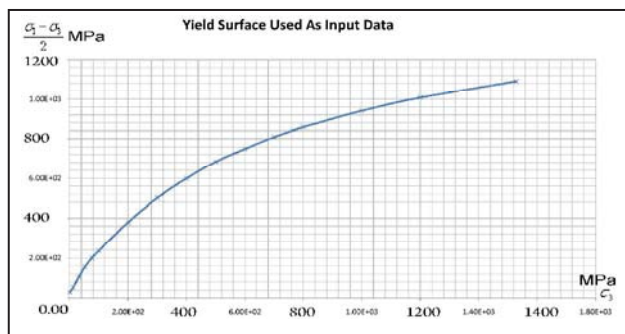


شکل ۲- منحنی دقیق فشار بر حسب کرنش حجمی برای معادله حالت Tabulated Compaction بر اساس اطلاعات استخراج شده از مراجع ذکر شده در انتهای مقاله

در حالت فشردگی مدول باربرداری بالک به حداکثر کرنش حجمی وابستگی دارد و البته لازم به ذکر است که در این معادله، تنش در حالت فشار مثبت فرض می‌شود در حالیکه کرنش حجمی در حالت کششی مثبت در نظر گرفته می‌شود.

۳- مدل ماده

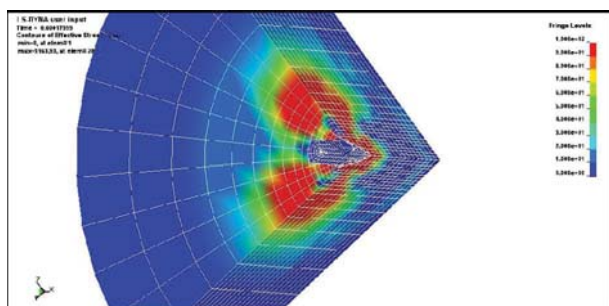
معادله ساختاری مدل ماده در واقع رابطه‌ای است که تنش را به کرنش ϵ ، نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ ، انرژی داخلی e و تخریب مرتبط می‌سازد که شکل کلی آن به صورت $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, e, D)$ می‌باشد. مدل ماده و داده‌های ورودی آن تقریباً مهمترین عامل در رسیدن به نتایج مناسب در تحلیل پدیده نفوذ می‌باشد. نرم‌افزار LS-DYNA که در این تحقیق از آن استفاده شده



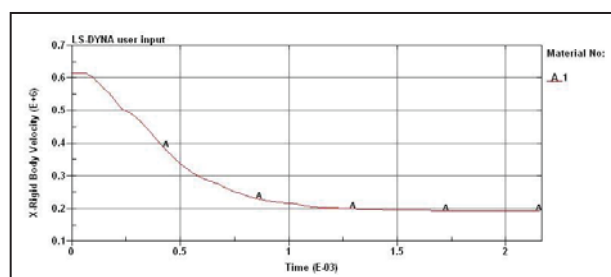
شکل ۴- پوش مقاومت سه محوری اعمال شده برای بتن

۶- تحلیل و ارائه نتایج

پس از مدل سازی و پایان تحلیل که نمایی از آن در شکل (۵) دیده می شود، نمودار سرعت پرتابه مطابق شکل (۶) نشان دهنده سرعت خروجی در حدود 195 m/s می باشد.



شکل ۵- مدل شبیه سازی شده در نرم افزار

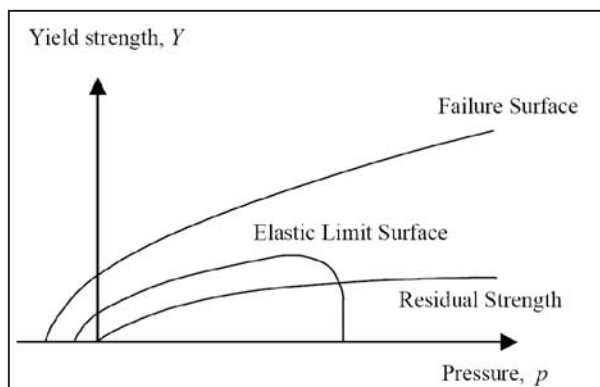


شکل ۶- نمودار سرعت پرتابه

از طرفی همان طور که در شکل های (۷) و (۸) دیده می شود، نحوه توزیع تنش ها و تغییر شکل های صورت پذیرفته در بتن مؤید این مطلب است که المان های نزدیک به مرکز دچار تغییر شکل ها و تنش های بسیار بالایی شده اند؛ حال آن که با دور شدن از مرکز، این تأثیر بسیار کاهش یافته و به عنوان مثال، المان های نزدیک به پیرامون تحت کمترین تنش های ممکن (در حد صفر) قرار می گیرند، در حالی که تنش های ثبت شده

۵- معرفی مسئله

پرتابه مدل شده، از جنس فولاد و دارای قطر 75mm با نوک مرمی شکل و وزن کلی حدود 6kg می باشد که با سرعت 620m/s به هدف برخورد می نماید. هدف نیز مرکب از یک استوانه بتنی به ضخامت 400mm و قطر 1400mm انتخاب شد که دارای دانسیته جرمی 2770 kg/m^3 ، مقاومت فشاری تک محوری 150MPa، مقاومت کششی تک محوری 8MPa، مدول الاستیسیته 58GPa و ضریب پواسون 0.16 می باشد که نمودار مربوط به آزمایش سه محوری آن نیز که پوش های مقاومت حداکثر و پسماند بر اساس آن محاسبه می گردند، در شکل (۴) آمده است.

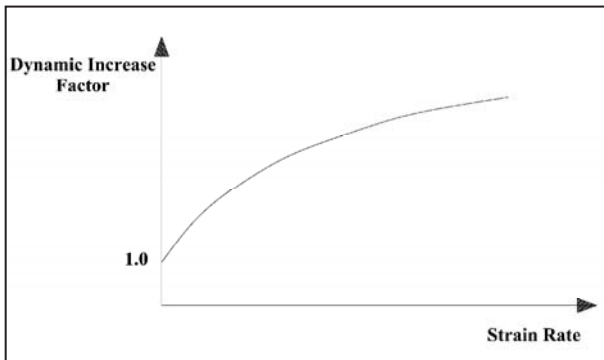


شکل ۳- الگوی مقاومت مدل ماده وابسته به فشار

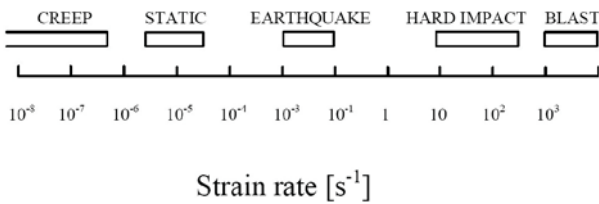
مدل سازی به صورت یک چهارم و با اعمال ۲ صفحه تقارن انجام گرفت. روش تحلیل استفاده شده نیز در مختصات لاگرانژی تعریف گردید. به منظور ثابت نگه داشتن هدف، آزادی حرکت کلیه گره های موجود بر پیرامون آن در راستای محور x بسته شده و برای انتقال نیروها بین هدف و پرتابه از الگوریتم تماس سه بعدی Eroding surface to surface استفاده گردیده است. المان های هدف از نوع Solid ۸ گره ای با یک نقطه انتگراسیون و ضریب کنترل Hourglass از نوع Flangan-Belytschko stiffness with exact volume integration انتخاب گردیدند. همان طور که قبلاً ذکر گردید، مدل ماده پرتابه از نوع RIGID و هدف بتنی نیز با استفاده از مدل ماده Concrete Damage مدل سازی شده است.

۷- تأثیر نرخ کرنش

اعمال تأثیر نرخ کرنش در بتن به صورت نموداری افزایشی می باشد که اصطلاحاً به آن DIF یا Dynamic Increase Factor می گویند، که مؤلفه قائم آن ضریب افزایش مقاومت و مؤلفه افقی آن عدد نرخ کرنش می باشد. الگوی شماتیک مقادیر DIF در نرخ کرنش های مختلف در شکل (۹) به نمایش در آمده است. فلذا مشاهده می گردد که با اعمال این پارامتر به بتن شاهد مقدار قابل توجهی افزایش مقاومت در آن خواهیم بود که منجر به کاهش سرعت خروجی می گردد. گستره مقادیر نرخ کرنش برای مسائل نفوذ و برخورد شدید، با توجه به شکل (۱۰)، در بازه تقریبی 10^{-10} تا 10^3 s^{-1} دسته بندی می شود. در مسئله مورد بررسی در این مقاله به منظور اعمال تأثیر نرخ کرنش از مقادیر DIF موجود در گستره نرخ کرنش های فوق الاشاره که شکل دقیق آن به صورت نمودار لگاریتمی دو خطی در شکل (۱۱) قابل مشاهده می باشد استفاده گردیده است.

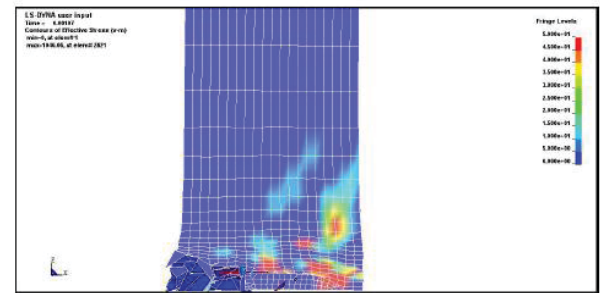
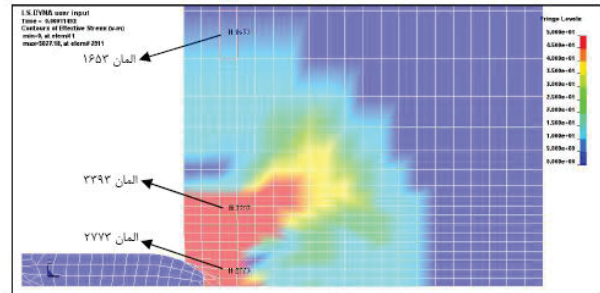


شکل ۹- الگوی ضریب افزایش دینامیکی

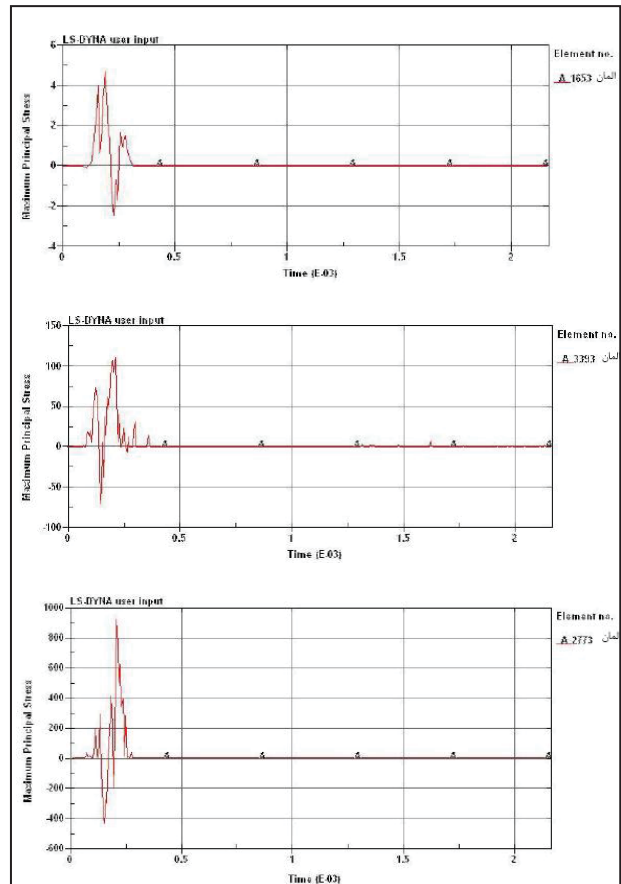


شکل ۱۰- الگوی ضریب افزایش مقاومت در نرخ کرنش های مختلف

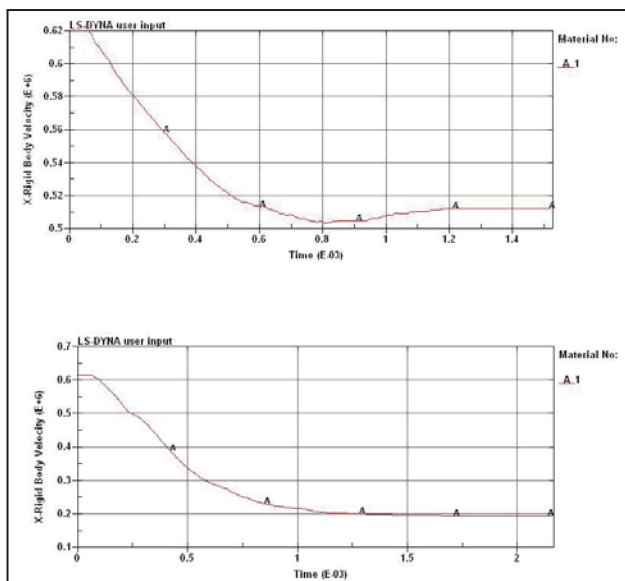
در نقاط نزدیک به نوک پرتابه تا دو هزار مگاپاسگال نیز می رسد.



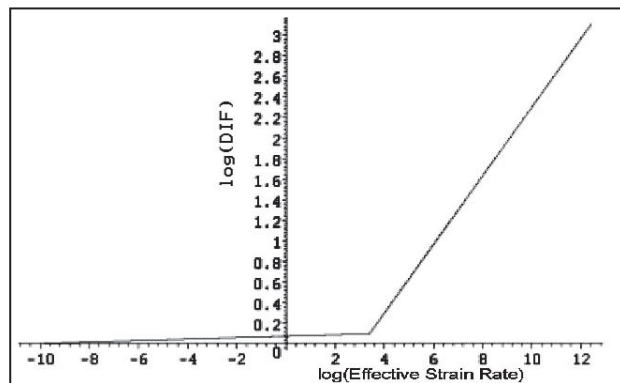
شکل ۷- تغییر شکل های ایجاد شده در مرحله نفوذ



شکل ۸- تنش های ایجاد شده در المان های مشخص شده در شکل (۷) (MPa)



شکل ۱۲- بالا، سرعت پرتابه قبل از اعمال DIF و پائین، بعد از اعمال DIF



شکل ۱۱- نمودار لگاریتمی اعمال شده برای DIF

همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود ضریب افزایش مقاومت برای گستره نرخ کرنش‌های پدیده نفوذ (یعنی نرخ‌های موجود در بازه $10_{-1} s^{-1}$ تا $1000_{-1} s^{-1}$) در نرخ کرنش $10_{-1} s^{-1}$ برابر با 1.09 است که تا 3.555 برای نرخ کرنش $1000_{-1} s^{-1}$ ادامه می‌یابد که در واقع بدین معنی است که پوش مقاومت بتن حدود 3.5 برابر بزرگتر شده و به تعبیری مقاومت هدف بتنی 3.5 برابر بیشتر می‌شود. از طرف دیگر در نمودارهای سرعت خروجی پرتابه که در شکل (۱۲) آمده، مشاهده می‌گردد در حالتی که تاثیر DIF در نظر گرفته نشده سرعت خروجی برابر با 512m/s می‌باشد، اما پس از اعمال DIF این مقدار به حدود 195m/s می‌رسد که با توجه به رابطه تقریبی زیر مشاهده می‌گردد که نسبت کاهش سرعت در حالت اخیر 3.93 برابر حالت قبل بوده و این نسبت با مقدار 3.55 برای ضریب DIF

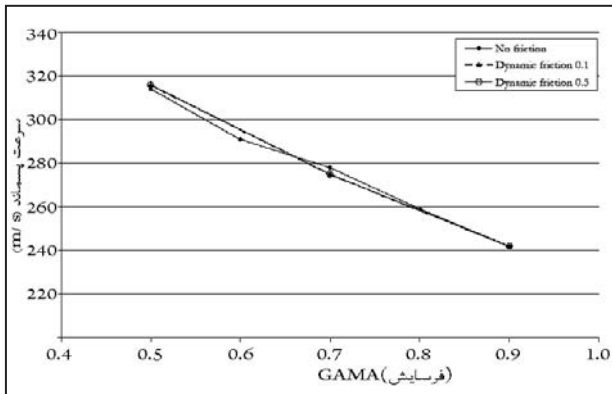
$$\frac{620 - 195}{620 - 512} = 3.93 \text{ دارد.}$$

۸- تأثیر فرسایش

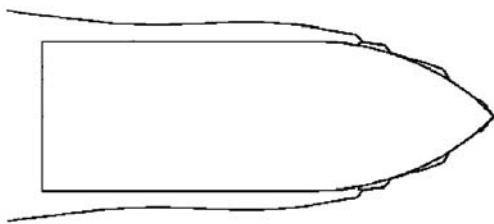
همان‌طور که قبلاً اشاره شد کرنش برشی 0.9 به عنوان ضابطه فرسایش انتخاب گردید. بدیهی است که اعمال الگوریتم فرسایش تاثیر محدودی بر نتایج داشته باشد و سرعت خروجی را تا حدی تحت تاثیر قرار دهد که در ادامه به بررسی میزان و نوع این تاثیر می‌پردازیم. به منظور بررسی تأثیر فرسایش بر سرعت خروجی، تحلیل‌های مختلفی با مقادیر مختلف ضابطه فرسایش انجام گردید که نتایج حاصله از آنها در شکل (۱۳) آمده است. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌گردد با افزایش ضابطه فرسایش که در این مسئله حداکثر کرنش برشی در لحظه حذف المان تعریف گردیده است، میزان سرعت خروجی کاهش می‌یابد. در توجیه این امر اینگونه بیان می‌شود

که اگر المان‌هایی که ضابطه اصلی گسیختگی در مورد آنها ارضا شده است (در حقیقت حالت تنش آنها از پوش گسیختگی نمودار شکل (۴) فراتر رفته) از مدل حذف نگردند، هدف بتنی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد که علت آن نیز مقاومت کاذبی است که این المان‌ها در برابر پرتابه از خود نشان می‌دهند. فلذا با اعمال ضابطه فرسایش و حذف این المان‌ها این مقاومت کاذب از بین می‌رود. اما همان‌طور که می‌بینیم هر چه مقدار عددی کرنش برشی حداکثر که به عنوان ضابطه فرسایش در نظر گرفته شده افزایش می‌یابد، سرعت خروجی نیز کاهش یافته و به مقدار واقعی نزدیک می‌شود و این بدان معنی است که مثلاً وقتی γ که معرف ضابطه فرسایش است برابر با 0.5 فرض گردد سرعت خروجی در حدود 310m/s می‌باشد. اما وقتی γ مقدار 0.9 فرض می‌شود و در حقیقت به المان‌ها اجازه داده می‌شود تا پس از تغییر شکل بیشتری از سیستم حذف گردند، بتن اندکی افزایش مقاومت پیدا کرده و سرعت خروجی به حدود 195m/s کاهش می‌یابد و همین‌طور با افزایش γ سرعت خروجی کاهش می‌یابد. یعنی اگر γ به سمت بی‌نهایت فیزیکی میل کند سرعت خروجی به حالتی نزدیک می‌شود که گویا اصلاً ضابطه کرنشی تعریف نشده و المان‌ها حتی پس از تحمل کرنش‌های بسیار بالا نیز از سیستم حذف نمی‌شوند.

عمده انتقال نیرو و اینرسی در این ناحیه از طریق فشارهای نرمال انجام می‌گیرد، پس طبیعی است که ضریب اصطکاک دینامیکی تأثیر چندانی بر سرعت خروجی نداشته باشد.



شکل ۱۴- تأثیر ضریب اصطکاک دینامیکی بر سرعت خروجی



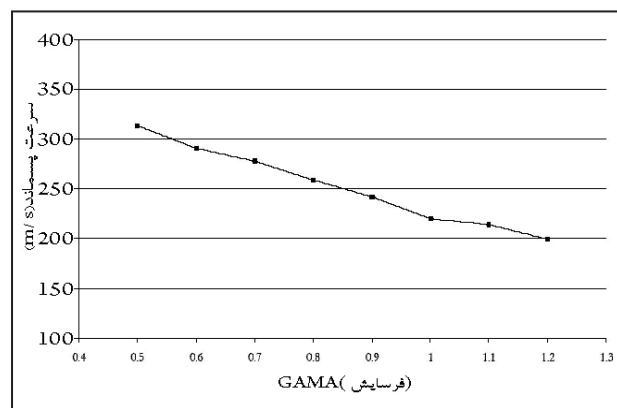
شکل ۱۵- نمای شماتیک نفوذ پرتابه در هدف و تأثیر محدود ضریب اصطکاک دینامیکی بر سرعت خروجی

۱۰- تأثیر دو لایه بودن بتن

یکی از اهداف اصلی تحقیقات در حوزه نفوذ پرتابه در بتن، افزایش کارایی و مقاومت سازه‌های بتنی می‌باشد. در نتیجه هر راهکاری که منجر به بهبود مقاومت هدف بتنی در برابر نفوذ پرتابه شود، بسیار با اهمیت و مثمر ثمر می‌باشد. یکی از این عوامل را می‌توان در حوزه ایجاد تغییرات در هندسه سیستم مقاوم در برابر پرتابه جستجو نمود. در این بخش به بررسی تأثیر دو لایه کردن بتن بر مقاومت مجموعه هدف در مقابل نفوذ پرتابه می‌پردازیم و در این مسیر از همان صورت مسئله اصلی که قبلاً معرفی شد بهره می‌بریم؛ با این تفاوت که هدف مذکور با ضخامت 400 mm را به دو هدف متفاوت که در شکل (۱۶) نمایش داده شده‌اند و ضخامت هر یک 200 mm است، تقسیم کرده و تأثیر آن را بررسی می‌نماییم.

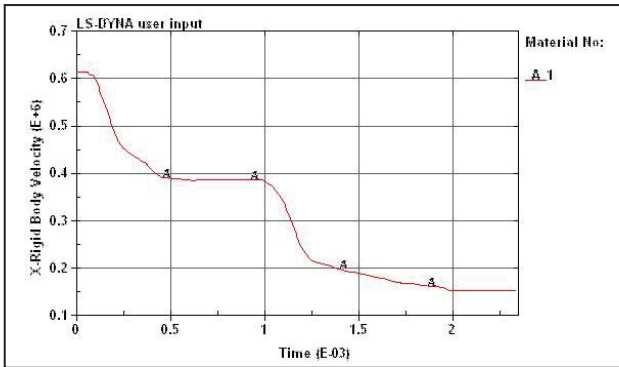
۹- تأثیر اصطکاک دینامیکی

اصطکاک بین جداره پرتابه و هدف بتنی یکی از عوامل استهلاک انرژی در ناحیه تونل می‌باشد. در داده‌های ورودی، الگوریتم تماس دو ضریب تحت عناوین ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی تعریف می‌گردند. همان‌طور که از نام آن‌ها مشخص است این ضرایب تعیین کننده مقدار اصطکاک در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی می‌باشند. اما با توجه به اینکه مسئله مورد بررسی در موضوع این مقاله دارای ماهیت کاملاً دینامیکی می‌باشد، در نتیجه بدیهی است که ضریب اصطکاک استاتیکی (که همیشه مقدار آن بزرگ‌تر از ضریب دینامیکی است) تأثیر چندانی بر جواب‌ها نداشته باشد. فلذا از بررسی تأثیر آن چشم‌پوشی گردید. اما به‌منظور بررسی تأثیر ضریب اصطکاک دینامیکی، ۳ دسته تحلیل با مقادیر مختلف ضریب اصطکاک دینامیکی انجام گرفت که یکی از آن‌ها بدون اصطکاک و در یکی ضریب اصطکاک دینامیکی برابر با 0.1 و در دیگری برابر 0.5 در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به این تحلیل‌ها در شکل (۱۴) قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود تغییر ضریب اصطکاک دینامیکی تأثیر چندانی بر نتایج حاصله ندارد و مقادیر بسیار نزدیکی از سرعت خروجی برای این ۳ دسته تحلیل به‌دست آمده است.



شکل ۱۳- تأثیر فرسایش بر سرعت خروجی پرتابه

در توجیه و درک علت این مطلب بایستی به صورت واقعی و شهودی به فرایند نفوذ پرتابه در ناحیه تونل توجه داشته باشیم. همان‌طور که در شکل (۱۵) دیده می‌شود، در حین نفوذ پرتابه در بتن، سطح تماس بین بتن و جداره پیرامونی پرتابه دارای مقدار بسیار کمی بوده، و در عوض عمده تماس بین پرتابه و بتن معطوف به ناحیه نوک پرتابه می‌باشد. فلذا از آنجا که بخش



شکل ۱۷- نمودار سرعت و تأثیر دو لایه بودن بتن بر سرعت خروجی

۱۱- نتیجه گیری

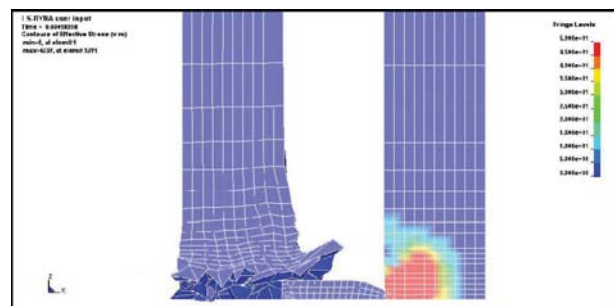
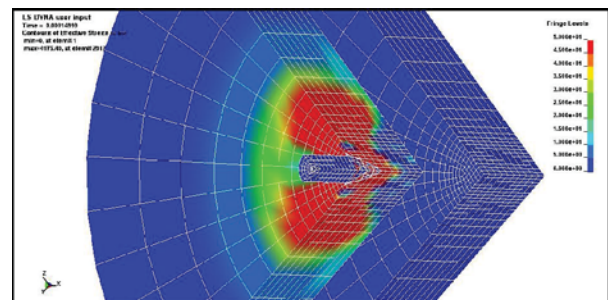
پس از رسیدن به نحوه ایده آل مدل سازی نفوذ در این مقاله، تأثیر بسیار عمده اعمال ضریب افزایشی مقاومت در نرخ کرنش های بالا و همچنین تأثیرات محسوس اثر فرسایش و نیز اثر بسیار ناچیز ضریب اصطکاک دینامیکی به عنوان یکی از عوامل اصلی استهلاک انرژی در ناحیه تونل مورد بررسی قرار گرفت، و در آخر با دو لایه کردن بتن هدف، این راه حل به عنوان راهکاری بسیار کم هزینه و آسان و با تأثیر محدود در افزایش کارایی سیستم معرفی گردید.

لازم به ذکر است که اصلی ترین نتیجه گیری حاصله در این تحقیق، روش صحیح مدل سازی نفوذ پرتابه صلب در اهداف بتنی غیر مسلح می باشد، که با استفاده از نمودارهای دقیق رفتار مدل ماده مناسب پدیده نفوذ و همچنین معادله حالت حاکم بر آن به دست آمده است. این نتیجه حاصله در کنار سایر عوامل ترکیبی ذیل که بررسی هر یک از آنها به صورت جداگانه نکات قابل توجهی در فرایند نفوذ را بیان می نماید، می تواند کمک شایانی در پیش بینی عمق نفوذ و یا سرعت پسماند پرتابه در هنگام خروج از هدف بتنی بنماید.

نرخ کرنش

در خصوص نرخ کرنش می توان اینگونه نتیجه گرفت که اعمال تأثیرات نرخ کرنش در بارگذاری های دینامیکی و به خصوص پدیده نفوذ، تأثیر کاملاً محسوسی بر نتایج به دست آمده در تحلیل ها داشته و این تأثیر به صورت افزایش مقاومت هدف پس از اعمال ضریب افزایش مقاومت دینامیکی (DIF) به عنوان پارامتر معرف تأثیر نرخ کرنش خواهد بود که در کاهش

همان طور که در شکل های (۱۶) و (۱۷) مشاهده می گردد این دو لایه کردن بتن باعث بهبود نسبی کارایی مجموعه هدف و در نتیجه، کاهش سرعت خروجی به میزان حدود 40 m/s بیشتر از حالتی که هدف به صورت یک لایه مدل گردیده، شده است و به عبارت دیگر، سرعت خروجی ۱۹۵ در مدل اول به سرعت خروجی ۱۵۵ در مدل دوم تبدیل شده است. در تفسیر این مسئله نگاهی به کلیت مسئله نفوذ می تواند راهگشا باشد. پدیده نفوذ را می توان به سه بخش اصلی تقسیم نمود که این سه بخش عبارتند از: (۱) ناحیه برخورد که منجر به تشکیل یک حفره (Spalling) در محل برخورد می گردد، (۲) ناحیه تونل (Tunnel Zone)، و (۳) ناحیه خروج که در این بخش نیز خروج پرتابه باعث ایجاد یک حفره (Scabbing) و کنده شدن بخشی از بتن می گردد. از طرفی می دانیم که به طور کلی ایجاد تغییر شکل در ماده، معادل جذب و مستهلک نمودن انرژی می باشد. با توجه به توضیحاتی که در بالا ارائه شد واضح است که دو لایه نمودن بتن منجر به دو برابر شدن تعداد Spalling ها و Scabbing ها و در نتیجه، مستهلک شدن مقدار بیشتری انرژی می گردد که در نهایت، سرعت خروجی را تا 10% کاهش می دهد. به عبارت دیگر در صورت دو لایه بودن بتن در مقابل پرتابه، می توان کارایی سیستم با همان حجم بتن را بهبود بخشید و مقاومت مجموعه سیستم را در برابر نفوذ پرتابه افزایش داد.



شکل ۱۶- نمای شماتیک تأثیر دو لایه بودن بتن بر سرعت خروجی

نظر این مطالعه صورت پذیرفت، نشان می‌دهد که با دو لایه شدن بتن تأثیرات محدود اما محسوس (حدود ۱۰ درصد) در کاهش سرعت خروجی پرتابه مشاهده می‌گردد که مجدداً توجیه فیزیکی این پدیده را باید در شکل شماتیک پدیده نفوذ مورد بررسی قرار داد. به طوری که با افزایش تعداد حفره‌های تخریب در محل‌های ورود و خروج پرتابه و به تعبیر دیگر با افزایش میزان تغییر شکل‌های پلاستیک ماده هدف به عنوان اصلی‌ترین عامل جذب انرژی، قسمت بیشتری از انرژی جنبشی پرتابه مستهلک گردیده و در نهایت، سرعت خروجی پرتابه کاهش خواهد یافت.

مراجع

1. "LS-DYNA, User Manual and Theory Manual, Version 971.
2. L. As Gardh, L. Laine "3D FE-Simulation of High-Velocity Fragment Perforation of Reinforced Concrete Slabs," International Journal of Impact Engineering 22 (1999) 911-922
3. Joosef Leppanen, "Dynamic Behavior of Concrete Structures Subjected to Blast and Fragment Impacts" Ph.D Thesis Department of Structural Engineering Concrete Structures. Chalmers University of Technology Goteborg, Sweden (2002).
4. Eirik Svinsas, Cathy O'Carroll, Cyril M. Wentzel, Andres Carlberg "Benchmark Trial Designed to Provide Validation Data for Modeling" Swedish Defense Research Agency 30 (2004) 435-468

محسوس سرعت خروجی پرتابه و نزدیک شدن آن به مقدار واقعی قابل مشاهده می‌باشد.

فرسایش

اما در خصوص الگوریتم فرسایش که در این مقاله به صورت کرنش برشی تعریف گردید، باید بیان داشت که این الگوریتم هرگز به عنوان ضابطه اصلی گسیختگی در فرایند عددی پدیده نفوذ ایفای نقش نمی‌نماید، بلکه نقش این الگوریتم حذف فیزیکی المان‌هایی از مدل است که ضابطه فرسایش در مورد آنها ارضا شده باشد، تا بدین ترتیب فرایند تحلیل دچار مشکل نگشته و المان‌ها پس از متحمل شدن تغییر شکلی خاص از مدل حذف گردند. البته بدیهی است که اعمال الگوریتم فرسایش، تأثیر محدودی بر نتایج داشته باشد و سرعت خروجی را تا حدی تحت تأثیر قرار دهد به طوری که با افزایش کرنش برشی (به عنوان الگوریتم فرسایش در این مقاله) سرعت خروجی پرتابه تا حدی کاهش و یا به عبارت دیگر مقاومت هدف تا حدی افزایش می‌یابد.

اصطکاک

با توجه به تحلیل‌های مختلف عددی صورت گرفته در این تحقیق این نتیجه حاصل گردید که ضریب اصطکاک دینامیکی بین ماده هدف و پرتابه، در تحلیل کلی فرایند نفوذ و نتایج حاصله به هیچ وجه تأثیر محسوس ندارد که این مطلب از سرعت‌های بسیار مشابه خروجی پرتابه با ضریب اصطکاک‌های مختلف قابل مشاهده می‌باشد. توجیه فیزیکی این پدیده را باید در نمای شماتیک حرکت پرتابه در داخل هدف جستجو کرد، و به طوری که در شکل (۱۵) قابل مشاهده است سطح تماس ناچیز و هم‌چنین تنش‌های نرمال اندک فیما بین جداره خارجی پرتابه و سطح داخلی سوراخ، نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک بین پرتابه و هدف را تا حد چشمگیری کاهش می‌دهد. فلذا ضریب اصطکاک دینامیکی تأثیر چندانی بر نتایج سرعت خروجی پرتابه ندارند.

دو لایه شدن

نویسنده متذکر می‌گردد در خصوص نتیجه‌گیری کلی در مبحث دو لایه نمودن بتن و بررسی تأثیر آن در نتایج به دست آمده تحقیقات وسیع‌تری لازم است. اما آنچه در گستره مورد

Simulation and Analysis of Collision Between Rigid Projectile and Unreinforced Concrete Target

Ahmad Salehi¹

Seyyed Amir Odin Sadr Nezhad²

Amir Saedi Darian³

Abstract

Simulation and analysis of bullet (projectile) impact to structures is one of the needed subjects in retrofit of structures. To study the penetration phenomenon in structures, the affecting parameters should be identified and this identification leads to prediction of penetration depth and then, to minimizing it. One of the main affecting parameters on the final penetration depth is the type and amount of energy dissipation during the penetration process. Generally, energy dissipation occurs in three steps of penetration process including impact, tunnel and exit steps in three different forms. In the first step, i.e. the projectile impact on concrete target, the compressive strength of concrete is the affecting parameter on energy absorption. However, the shear-frictional strength and concrete tensile strength are respectively the main affecting parameters in the second and third steps. In this paper, the affecting parameters on energy dissipation during these three steps are studied and it will examine that the energy dissipation during the tunnel (shear-frictional between projectile and concrete) is lower than that of the two other steps because of the geometrical shape of projectile head. In other words, the main portion of energy dissipation during the penetration phenomenon occurs when the projectile clashes the front surface and when it exits the back face of slab. Considering the above results, it can be said that to increase the strength and efficiency in penetration phenomenon, an applicable and inexpensive method is to implement a specific thickness of multilayer concrete with small clearance between the layers. The energy dissipation of this assembly is higher than that of a single layer concrete of the same thickness and thus, the penetration depth will be reduced.

Key Words: *Concrete, Projectile, Penetration Depth, Energy Dissipation, LS-DYNA*

1- BS. in Structure

2- PhD Candidate in Khaje Nasiredin Toosi University of Technology

3- PhD Candidate of Structure in Khaje Nasiredin Toosi University (Email: amir_saedi_d@yahoo.com)