

بررسی دقت شبیه‌سازی اثر انفجار بمب نفوذگر روی سازه‌های زیرزمینی با کمک روش عددی اختلاف محدود

سید محمد جواد سیدان^۱، سید احسان سیدی حسینی^۲ نیا

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران

خلاصه

در حمله‌های هوایی یا موشکی برای آسیب رساندن به سازه‌های زیرزمینی از بمب‌های نفوذگر استفاده می‌شود. در این مقاله، دقت شبیه‌سازی اثر انفجار بمب نفوذگر روی سازه زیرزمینی ساخته شده با روش عددی اختلاف محدود بررسی می‌گردد. برای این کار، از فشار میدان آزاد استفاده شد. شبیه‌سازی‌هایی برای بررسی اثر المان‌های کوچک، مقادیر متفاوت نسبت میرایی و فرکانس در دقت مدل عددی اجرا شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند استفاده از المان‌های کوچک تأثیر چندانی در بالا بردن دقت شبیه‌سازی ندارد. استفاده از نسبت میرایی و بسامدهای گوناگون در فاصله‌های متفاوت از مرکز انفجار بمب نفوذگر باعث افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: بمب نفوذگر، شبیه‌سازی انفجار، روش عددی اختلاف محدود، پدافند غیرعامل

۱. مقدمه

یکی از هدف‌های غیر اصلی در ساخت بسیاری از سازه‌های زیرزمینی، حفاظت از انسان‌ها و تجهیزات موجود در آن‌ها هنگام وقوع حملات هوایی یا موشکی است. در این شرایط سازه زیرزمینی بر اساس هدف اصلی ساخت آن طراحی می‌گردد. سپس کنترل‌های لازم برای بررسی مقاومت سازه در برابر انفجار انجام و در صورت لزوم طراحی تصحیح می‌شود. سلاح‌های مورد استفاده برای تخریب سازه زیرزمینی معمولاً توانایی نفوذ در زمین را دارند و با رسیدن به عمق مشخصی منفجر می‌گردند.

انفجارها انواع متفاوتی دارند و به شکل‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. یکی از روش‌های متداول در طبقه‌بندی انفجارها طبقه‌بندی بر اساس محیط وقوع انفجار است. در این طبقه‌بندی انفجارها به دو دسته اصلی انفجار غیر محصور و انفجار محصور تقسیم می‌شوند. انفجارهای غیر محصور سه نوع انفجار در هوای آزاد، انفجار در هوا و انفجار سطحی را شامل می‌شود. انفجار محصور نام عمومی سه دسته انفجار است. انفجار تخلیه‌شونده، انفجار نیمه‌محصور و انفجار کاملاً محصور این سه نوع اند. بار ناشی از این انفجارها، زمان لازم برای رسیدن به بیشینه فشار و زمان وارد شدن این بارها در محیط اطراف در هر سه نوع انفجار متفاوت است. تحقیق‌ها و آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند انفجار ناشی از بمب نفوذگر از نوع انفجارهای غیر محصور یا نیمه محصور است [۱].

پژوهش‌های بسیاری برای تعیین بار انفجار بمب‌های نفوذگر انجام گرفته است. بیشتر این تحقیقات فشار میدان آزاد این بمب‌ها را بررسی کرده‌اند. فشار میدان آزاد، بار انفجار بمب نفوذگر در خاک یا سنگ و در نبود سازه زیرزمینی تعریف می‌شود. فشار ایجاد شده در اثر انفجار بمب نفوذگر در مجاورت سازه زیرزمینی با فشار میدان آزاد متفاوت است. این تفاوت به دلیل برخورد امواج انفجار به سازه زیرزمینی و بازتاب موج‌های فشار از سطح این سازه است. Lampson [۲] بررسی‌های ابتدایی تعیین فشار میدان آزاد انفجار بمب نفوذگر را انجام داد. در سال‌های اولیه دهه ۱۹۸۰ آزمایش‌های

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و مهندسی پی دانشگاه فردوسی مشهد (mj.seyedan@gmail.com)

^۲ - استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد (eseyedi@um.ac.ir)

متعدد در مرکز تحقیقات آب راه‌های آمریکا^۱ روی انفجار بمب‌های نفوذگر انجام گرفت. Drake & Little [۳] با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها روابطی برای تعیین بیشینه فشار میدان آزاد و چگونگی کاهش آن ارائه کردند. Westine & Friesenhahn [۴] نیز روابطی برای تعیین بیشینه فشار میدان آزاد در خاک اشباع و غیر اشباع پیشنهاد کردند. در میان این روش‌ها، رابطه‌های ارائه شده توسط Drake & Little کاربرد گسترده‌ای در پژوهش‌های محققان پیدا کردند و در آیین‌نامه 855-1- TM5 ارتش آمریکا نیز مورد استفاده قرار گرفتند. در ویرایش‌های بعدی این آیین‌نامه منتشر شده در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۸ میلادی [۵ و ۶] نیز همین روش برای تعیین فشار میدان آزاد انفجار بمب نفوذگر توصیه شده است. رابطه‌های (۱) و (۲) فرمول‌های فشار میدان آزاد بدست آمده توسط Drake & Little را نشان می‌دهند.

$$P = P_i \cdot e^{\frac{t}{t_a}} \quad (1)$$

$$P_i = 160 \cdot f \cdot \rho \cdot c \cdot \left(\frac{R}{W^{0.33}}\right)^{-n} \quad (2)$$

در رابطه (۱) P_i فشار بیشینه انفجار و t زمانی است که در آن فشار ناشی از انفجار محاسبه می‌گردد. t_a زمان رسیدن موج انفجار به نقطه مورد بررسی بوده و معادل $\frac{R}{c}$ است. R فاصله نقطه مورد بررسی تا مرکز انفجار و c سرعت موج انفجار در این خاک است. بررسی‌های انجام شده نشان داده است از لحظه رسیدن موج انفجار به یک نقطه تا زمان رسیدن به فشار بیشینه زمانی معادل $\frac{t_a}{10}$ طول می‌کشد. در رابطه (۲) f فاکتور وابسته به عمق انفجار، ρ جرم واحد حجم خاک، c سرعت موج انفجار در خاک، R فاصله از مرکز ماده منفجره، W وزن ماده منفجره، n ضریب کاهش^۲ است. مقدار f با توجه به عمق انفجار و مقدار ماده منفجره و مقدار c ، ρ و n با توجه به نوع خاک تعیین می‌گردد. برای تعیین این پارامترها از منابع معرفی شده در پاراگراف قبل استفاده می‌شود.

شبیه‌سازی‌های عددی یک روش بسیار مناسب برای بررسی اثر انفجار روی سازه زیرزمینی است. این شبیه‌سازی‌ها می‌توانند با هزینه کم و دقت قابل قبول به بررسی اثر انفجار روی سازه‌های زیرزمینی بپردازند. یک مشکل اصلی در استفاده از این شبیه‌سازی‌ها در دسترس نبودن نتایج آزمایش‌های تجربی برای بررسی دقت آن‌ها است. برای حل این مشکل می‌توان از فشار میدان آزاد و رابطه‌های تجربی موجود برای بدست آوردن این فشار استفاده کرد. در این مقاله از این روش برای بررسی دقت مدل عددی استفاده می‌شود.

۲. مدل عددی

مدل عددی با استفاده از روش تفاوت محدود و نرم‌افزار FLAC 2D ساخته شد. در این مدل سازه زیرزمینی به صورت تونل دایره‌ای شکل با قطر ۹/۱ متر و در عمق ۲۰ متری از سطح زمین در نظر گرفته شد. در این مدل‌سازی، خاک ماسه‌ای بصورت خشک و سست فرض شده و رفتار آن با مدل رفتاری مورکلمب شبیه‌سازی شد. مشخصات خاک مدل عددی در جدول ۱ مشاهده می‌شود. مدل عددی با استفاده از المان‌های مربعی یک متری شبکه‌بندی شد.

جدول ۱- مشخصات خاک در مدل عددی

$\rho(\frac{kg}{m^3})$	$E(MPa)$	$C(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	$c(\frac{m}{s})$	n
1300	125	10	0.35	35	0	192	3.25

حفره ماسوره^۳ تونل کوچکی است که در اثر انفجار بمب نفوذگر در خاک ایجاد می‌شود. در مدل عددی این حفره در عمق ۲۰ متری با شعاع ۱/۵ متر و در فاصله هفت متری سازه زیرزمینی در نظر گرفته شد. در پایین و در دو طرف مدل از المان‌های خاموش^۴ استفاده شد. این المان‌ها در نرم‌افزار

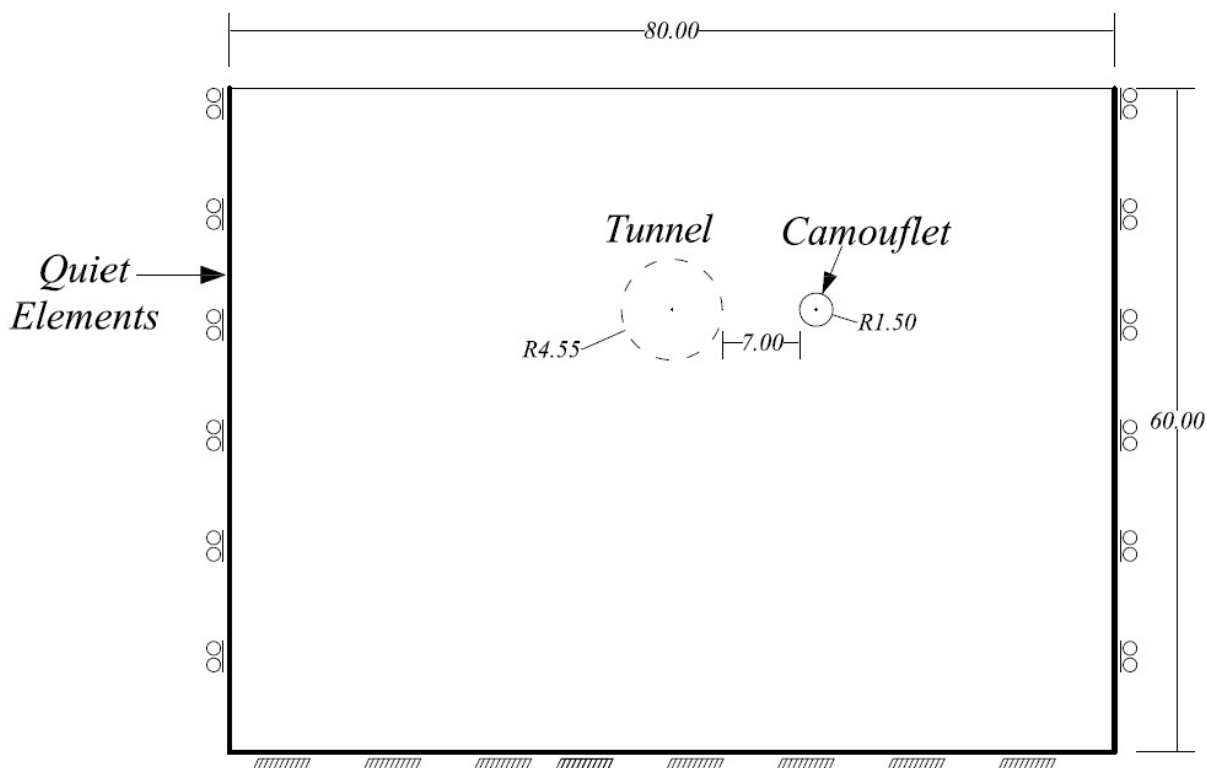
^۱ - US Waterways Experiment Station

^۲ - Attenuation Coefficient

^۳ - Camouflet

^۴ - Quiet Element

FLAC 2D تعریف شده‌اند که از بازتاب امواج انفجار به داخل مدل جلوگیری می‌کنند و مانع ایجاد خطا در نتایج می‌شوند. در شکل ۱ مدل عددی ساخته شده دیده می‌شود.

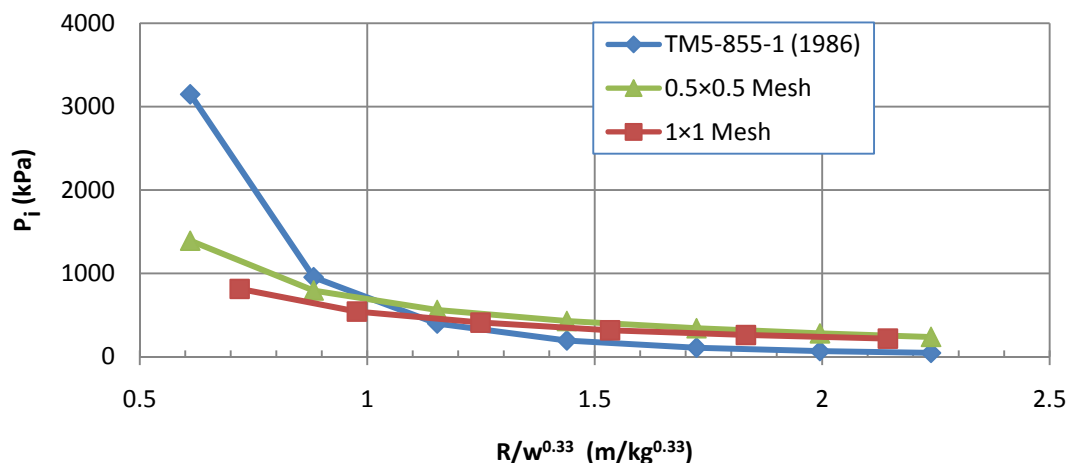


شکل ۱- مدل عددی اختلاف محدود

اندازه‌گیری دقت مدل با استفاده از فشار میدان آزاد انجام می‌گیرد. برای این منظور سازه زیرزمینی در مدل عددی در نظر گرفته نشد. در شبیه‌سازی فرض شد قدرت بمب نفوذگر معادل ۵۰ کیلوگرم TNT است. فشار انفجار ۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱/۵ متری با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه گردید و به محیط حفره ماسوره اعمال شد. این کار با توجه به مشخصات خاک انجام گرفت. همچنین مقدار پارامتر f با توجه به عمق حفره ماسوره و مقدار ماده منفجره و با کمک نمودار موجود در آیین‌نامه 1-TM5-855 معادل یک به دست آمد. شبیه‌سازی اجرا و فشار بیشینه ایجاد شده در چند نقطه از مدل اندازه‌گیری شد. بیشینه فشار میدان آزاد این نقاط با استفاده از رابطه ۲ نیز اندازه‌گیری گردید. با مقایسه این نتایج می‌توان دقت مدل عددی را بررسی کرد.

۳. بررسی دقت مدل

استفاده از المان‌های کوچک‌تر یکی از روش‌های معمول افزایش دقت در شبیه‌سازی‌های عددی است. ایراد اصلی این روش افزایش حجم محاسبات و زمان اجرای شبیه‌سازی است. برای بررسی اثر اندازه المان‌ها بر افزایش دقت، مدل عددی جدیدی با المان‌های مربعی ۰/۵ متری و سایر مشخصات مشابه مدل عددی اصلی ساخته شد. انفجار ۵۰ کیلوگرم TNT در این مدل، شبیه‌سازی شد و با نتایج حاصل از مدل اصلی و روابط تجربی مقایسه شد. این نتایج در شکل ۲ مشاهده می‌شود. در بسیاری از منابع و مرجع‌های مرتبط با مبحث انفجار [۲، ۴، ۵ و ۶] فاصله نقطه مورد نظر از مرکز انفجار بر جرم ماده منفجره به توان منفی سه تقسیم می‌شود. به این صورت، اثر جرم ماده منفجره از نتایج حذف می‌گردد و می‌توان نتایج را به انفجارهایی با مقدار متفاوت ماده منفجره گسترش داد. در شکل ۲ و سایر شکل‌های این مقاله از این روش استفاده شد.



شکل ۲- بررسی اثر اندازه المان‌ها در دقت مدل عددی

با مقایسه نمودارهای بدست آمده، می توان گفت استفاده از المان‌های مربعی ۰/۵ متری در $\frac{R}{w^{0.33}}$ های کم تر از یک باعث افزایش دقت شبیه سازی و در $\frac{R}{w^{0.33}}$ های بین یک تا دو باعث کاهش دقت می شود. با این حال، افزایش و کاهش دقت در هر دو قسمت چندان زیاد نیست. مدت زمان اجرای شبیه سازی‌ها با اندازه المان یک متر و ۰/۵ متری، به ترتیب سه و ۱۲ دقیقه طول کشید. با توجه به افزایش قابل توجه زمان اجرای شبیه سازی در استفاده از المان‌های کوچک تر و کاهش ناچیز دقت مدل، می توان گفت که اندازه اولیه در نظر گرفته شده برای المان‌ها مناسب به نظر می رسد. در ادامه شبیه سازی‌های انجام گرفته در این مقاله، از اندازه المان یک متر استفاده شده است.

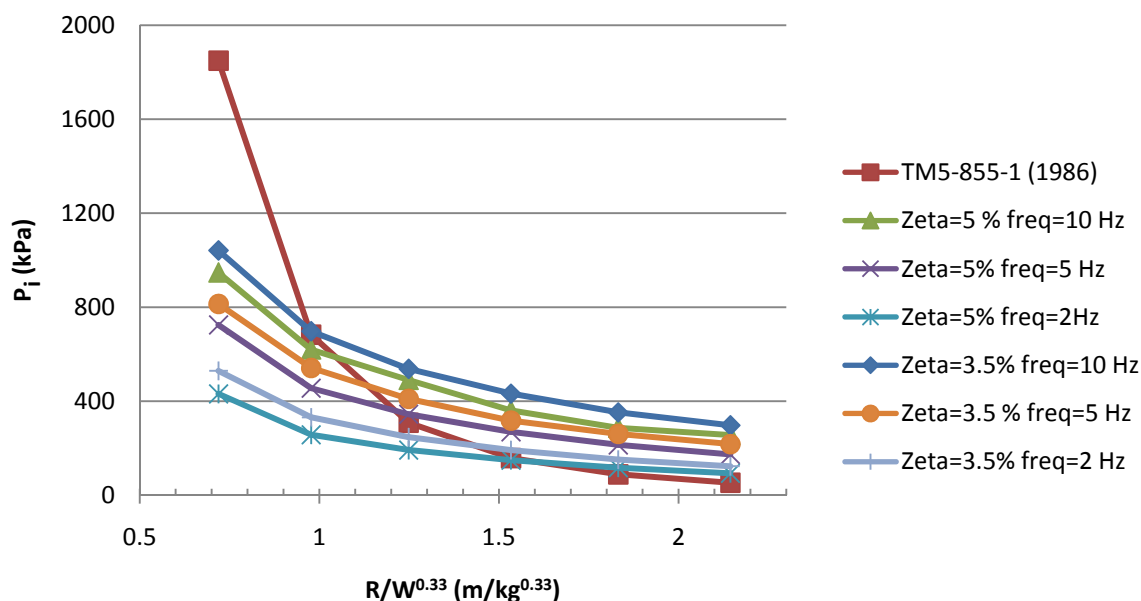
سیستم‌های دینامیکی میرا هستند و انرژی در آن‌ها تلف می شود. در این شبیه سازی عددی از مدل میرایی رایلی برای اعمال میرایی در سیستم استفاده شد. میرایی رایلی معمولاً برای تحلیل سازه‌ها استفاده می شود و دارای دو پارامتر اصلی آلفا (ضریب ماتریس جرم) و بتا (ضریب ماتریس سختی) است. نرم افزار FLAC 2D دو پارامتر نسبت میرایی (ξ) و فرکانس و یا بسامد (f) را بر اساس پارامترهای آلفا و بتا تعریف می کند. رابطه‌های (۳) و (۴) ارتباط نسبت میرایی و بسامد با آلفا و بتا را نشان می دهند.

$$\xi = (\alpha \cdot \beta)^{0.5} \quad (3)$$

$$f = (\alpha / \beta)^{0.5} / (2 \cdot \pi) \quad (4)$$

مقدار دو ثابت ξ و f در دقت نتایج مدل عددی اهمیت زیادی دارند و می توان از آن‌ها برای کالیبره کردن نتایج مدل استفاده کرد. با توجه به راهنمای نرم افزار [۷]، مقدار نسبت میرایی خاک بین دو تا پنج درصد تغییر می کند. در ادامه، برای بدست آوردن بالاترین دقت ممکن در مدل مقدار این دو پارامتر مورد بررسی قرار می گیرند.

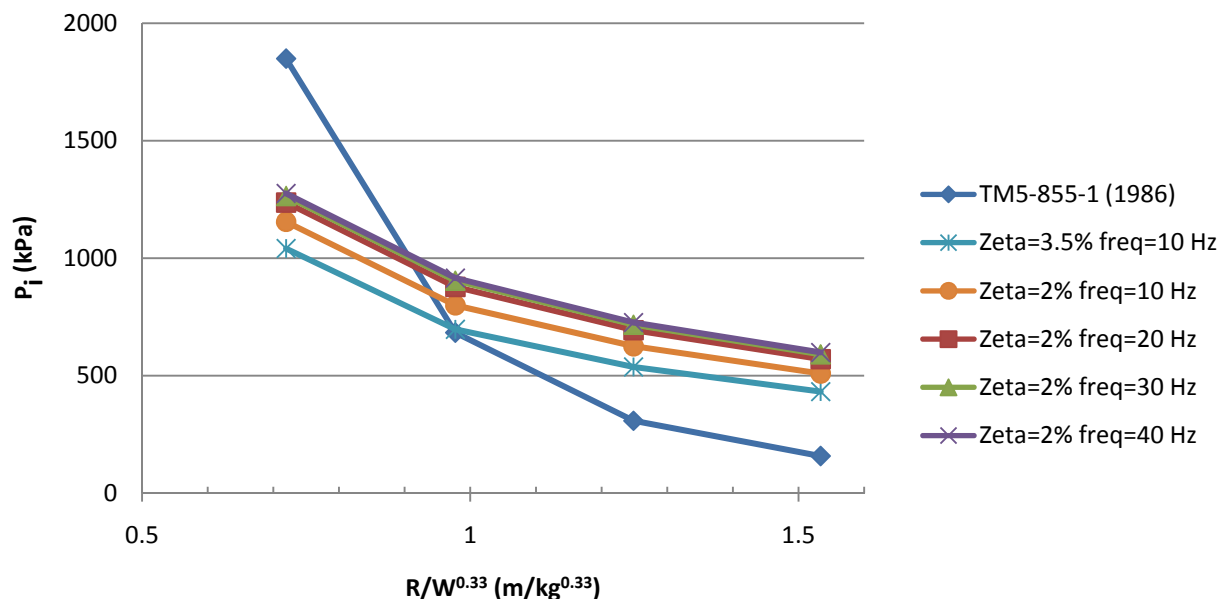
با در نظر گرفتن بسامدها و میرایی‌های متفاوت، انفجار ۵۰ کیلوگرم ماده منفجره شبیه سازی و فشارهای ایجاد شده در نقاط با فاصله‌های متفاوت از مرکز انفجار اندازه گیری شد. نتایج این شبیه سازی‌ها همراه با فشار میدان آزاد محاسبه شده از رابطه ۲ در شکل ۳ مشاهده می گردد.



شکل ۳- نتایج فشار میدان آزاد حاصل از رابطه تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی

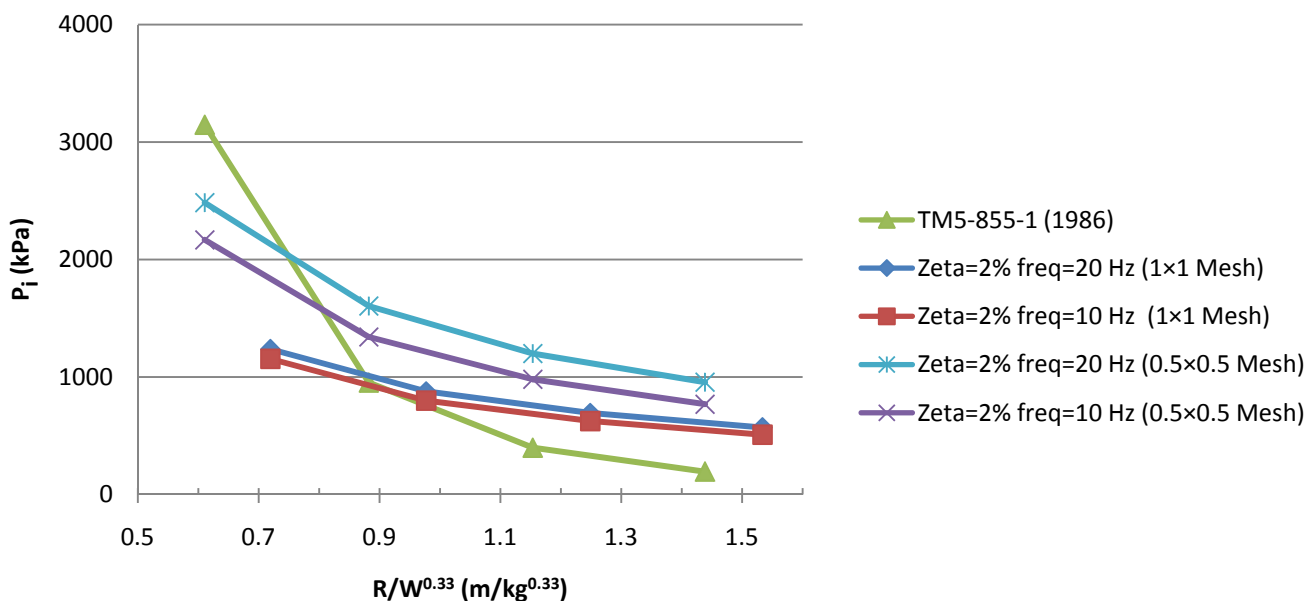
مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که در نسبت میرایی‌های ثابت (۳/۵ یا پنج درصد) افزایش بسامد باعث افزایش فشارهای ایجاد شده می‌شود. همچنین زمانی که بسامد ثابت باشد، با افزایش نسبت میرایی فشارهای ایجاد شده کاهش پیدا می‌کنند. مقایسه منحنی‌های بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها با منحنی رابطه تجربی در شکل ۳ بیان‌گر دقت متفاوت شبیه‌سازی‌ها در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های مختلف است. در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های کم‌تر از یک بیشتر دقت نمودار مربوط به نمودار با نسبت میرایی ۳/۵ درصد و بسامد ۱۰ هرتز است. بنابراین در این قسمت استفاده از نسبت میرایی کم‌تر و بسامد بالاتر، باعث زیاد شدن دقت مدل می‌شود. در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های بین یک تا ۱/۵ نمودار با نسبت میرایی ۳/۵ درصد و بسامد پنج هرتز دقت بیشتری دارد. در این قسمت، استفاده از نسبت میرایی و بسامد متوسط بهترین نتیجه را بدست می‌دهند. در $\frac{R}{W^{0.33}}$ بزرگ‌تر از ۱/۵ نمودار با نسبت میرایی پنج درصد و بسامد دو هرتز بیش‌ترین دقت را دارد. در این فاصله نسبت میرایی بالا و بسامد پایین بهترین نتیجه‌ها را به دست می‌دهند.

با توجه به شکل ۲، دقت شبیه‌سازی در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های کم‌تر از یک پایین است. بنابراین شبیه‌سازی‌های دیگری با استفاده از میرایی کم و بسامد بالا برای افزایش دقت در این فاصله انجام شد. این شبیه‌سازی‌ها با نسبت میرایی دو درصد (کم‌ترین میرایی توصیه شده برای خاک) و بسامدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ هرتز انجام شد. شکل ۴ نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از میرایی پایین و بسامد بالا باعث بالارفتن دقت شبیه‌سازی در $\frac{R}{W^{0.33}}$ کم‌تر از یک می‌شود، اما استفاده از بسامدهای بالاتر از ۲۰ هرتز فایده چندانی در افزایش دقت مدل عددی ندارد.



شکل ۴- شبیه‌سازی‌های انجام شده برای افزایش دقت مدل عددی

در قسمت‌های قبل گفته شد استفاده از المان‌های کوچک‌تر می‌تواند به افزایش دقت مدل عددی در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های کم‌تر از یک کمک کند. بنابراین به صورت همزمان از المان‌های کوچک، نسبت میرایی پایین و بسامدهای بالا برای افزایش بیشتر دقت شبیه‌سازی در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های کم‌تر از یک استفاده شد. شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از المان‌های مربعی ۰/۵ متری انجام و نتایج حاصل از آن‌ها با نتایج قسمت قبل مقایسه شد. این نتایج در شکل ۵ مشاهده می‌شود. این شکل نشان می‌دهد استفاده همزمان از تمامی این عوامل باعث بهبود دقت مدل در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های کم‌تر از ۰/۷ می‌شود و با نزدیک شدن مقدار $\frac{R}{W^{0.33}}$ به مقدار یک دقت شبیه‌سازی‌ها با المان‌های ۰/۵ متری به شدت کاهش پیدا می‌کند. بنابراین استفاده از المان‌های کوچک‌تر تنها برای افزایش دقت در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های کم‌تر از ۰/۷ مناسب است.



شکل ۵- استفاده از المان‌های کوچک برای افزایش بیشتر دقت مدل عددی در فاصله‌های کم

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق جرم ماده منفجره در انتخاب نسبت میرایی و بسامد شبیه سازی تأثیر قابل توجهی دارد. با فرض این که فاصله محل انفجار بمب نفوذگر تا سازه زیرزمینی (R) هفت متر باشد. اگر بمب نفوذگر دارای ۵۰ کیلوگرم TNT باشد $\frac{R}{W^{0.33}}$ برابر ۱/۹ است و شبیه سازی هایی با میرایی پنج درصد و بسامد دو هرتز دقت مناسبی دارند. در صورتی که بمب نفوذگر دارای ماده منفجره معادل ۲۵۰ کیلوگرم TNT باشد $\frac{R}{W^{0.33}}$ معادل ۱/۱۱ است بنابراین شبیه سازی با میرایی ۳/۵ درصد و بسامد پنج هرتز انجام می شود. شبیه سازی بار انفجار بمب نفوذگری با ۵۰۰ کیلوگرم TNT ($\frac{R}{W^{0.33}} = 0.88$) با میرایی دو درصد و بسامد ۲۰ هرتز انجام می گیرد. اگر ماده منفجره بمب نفوذگر دارای قدرت انفجار معادل ۱۲۰۰ کیلوگرم TNT باشد در این حالت مقدار $\frac{R}{W^{0.33}}$ برابر با ۰/۶۶ است و شبیه سازی هایی با استفاده همزمان از المان های کوچک، نسبت میرایی دو درصد و بسامد ۲۰ هرتز دقت مناسبی دارند.

۴. نتیجه گیری

برای بررسی دقت مدل های عددی انفجار بمب نفوذگر می توان از فشار میدان آزاد و روابط تجربی موجود برای تعیین آن ها استفاده کرد. در این شبیه سازی ها استفاده از المان های کوچک تر باعث افزایش دقت مدل عددی در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های کم تر از ۰/۷ می شود و در باقی قسمت ها، از دقت مدل کم می کند. استفاده از المان های کوچک تر زمان اجرای شبیه سازی را چندین برابر می کند. برای افزایش دقت مدل عددی می توان از دو پارامتر نسبت میرایی و بسامد استفاده کرد. این کار با توجه به فاصله سازه زیرزمینی تا محل انفجار بمب نفوذگر و مقدار ماده منفجره بمب (بر حسب TNT) انجام می گیرد. اگر $\frac{R}{W^{0.33}}$ کم تر از یک باشد، شبیه سازی با نسبت میرایی دو درصد و بسامد ۲۰ هرتز بیشترین دقت را دارد. در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های بین یک تا ۱/۵ نسبت میرایی ۳/۵ درصد و بسامد پنج هرتز نتایج بهتری را بدست می دهند. در $\frac{R}{W^{0.33}}$ های بزرگ تر از ۱/۵ شبیه سازی هایی با نسبت میرایی پنج درصد و بسامد دو هرتز نتایج بالاترین دقت را دارند.

۵. مراجع

1. *Fundamental of Protection Design for Conventional Weapons. TM 5-855-1.* US Army Engineers Waterways Experimental Station, Vicksburg, 1986.
2. C. W. Lampson, "Effects of impact and explosions," in *Explosions in Earth*, NRDC Washington, 1946.
3. J. Drake and C. D. J. Little, "Ground shock from penetrating conventional weapons," 1983.
4. P. Westine and G. Friesenhahn, "Free-field ground shock pressures from buried detonations in saturated and unsaturated soils," in *Interaction of Non-nuclear Munitions with Structures*, 1983.
5. Department of the Army, *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosion*, no. November. 1990.
6. Department of the Army, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions," 2008.
7. I. Itasca Consulting Group, "FLAC 2D Version 5.0.355." Minneapolis, USA, 2005.