

## بررسی و تعیین اضافه فشار بیشینه وارد بر ابنیه فنی راه و زیرساخت‌های حمل و نقل واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی تحت اثر انفجار

محمدایمان خداکرمی\*، استادیار مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
یونس نوری، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

E-mail: khodakarami@profs.semnan.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۵/۱۵ - پذیرش: ۹۲/۰۹/۰۵

### چکیده

بررسی آثار امواج کوبشی ناشی از انفجار مواد منفجره در اطراف سازه‌های استراتژیک مانند راه‌ها، تونل‌ها، پل‌های جاده‌ها و خطوط ریلی همواره اهمیت قابل توجهی داشته است. نیروهای اعمال شده بر سازه‌ها تحت اثر انفجار، وابسته به اضافه فشار هوای اطراف سازه می‌باشد. مطالعات صورت گرفته در مورد چگونگی انتشار امواج نشان می‌دهد که رفتار امواج، به هندسه فضای انتشار موج وابسته است و با تغییر هندسه فضا، رفتار امواج نیز تغییر خواهد کرد، که این ملاحظات در شیوه‌های متداول تعیین نیروهای وارد بر سازه‌ها ناشی از انفجار مد نظر قرار نمی‌گیرد. بسیاری از ابنیه فنی مورد استفاده در خطوط ریلی و جاده‌ها در نواحی کوهستانی واقع شده‌اند و در صورت وقوع انفجار در نواحی شامل عوارض توپوگرافی، باید اثر تفرق امواج و میزان اضافه فشار ناشی از آن، در این نواحی در نظر گرفته شود. به دلیل بازتاب امواج انفجاری در مجاورت عوارض توپوگرافی، استفاده از روابط متداول تعیین نیروهای وارد بر سازه‌ها ناشی از انفجار به منظور ارزیابی پل‌ها و خاکریز جاده‌ها در مجاورت عوارض توپوگرافی معقول نمی‌باشد. با بررسی‌های انجام شده در این مقاله، ملاحظه می‌گردد که این اضافه فشار اعمال شده بر ابنیه فنی راه چندین برابر مقادیر مشابه در نواحی مسطح می‌باشد. همچنین، ملاحظه گردید که با افزایش میزان مواد منفجره و کاهش نسبت عرض دره به عمق آن، اضافه فشار ایجاد شده ناشی از انفجار و اثر بازتاب آن افزایش می‌یابد و حتی الگوی فشار اعمال شده در نواحی مجاور عوارض توپوگرافی منطبق بر الگوی توزیع فشار در نواحی مسطح نیست.

واژه‌های کلیدی: ابنیه فنی راه، زیرساخت‌های حمل و نقل، امواج انفجاری، پدافند غیرعامل، عوارض توپوگرافی.

### ۱. مقدمه

فشار محیطی قبل از انفجار و بازگشت فشار به فشار محیطی.

هنگامی که یک ماده منفجره می‌ترکد، تقریباً بلافاصله پس از ترکانش به یک گاز که دارای حرارت و فشار خیلی زیاد است، تبدیل می‌گردد. سپس، تحت فشار حاصل از این گاز، محفظه بمب منبسط شده و متعاقباً به قطعات متعددی خرد می‌شود. هوای پیرامون محفظه فشرده شده و

به طور کلی، مراحل وقوع هر انفجار عبارتست از: آزاد شدن شدید و ناگهانی انرژی، پرتاب ترکش‌های اولیه، انتشار موج انفجار به صورت شعاعی، برخورد موج انفجاری به موانع، رسیدن مقدار فشار به مقدار اوج، پرتاب ترکش‌های ثانویه، بازتابش موج تقویت شده، کاهش فشار اوج به فشار محیطی، سقوط فشار به کمتر از

بررسی و تعیین اضافه فشار بیشینه وارد بر ابنیه فنی راه و زیرساخت‌های حمل و نقل واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی تحت اثر انفجار

LS-DYNA پرداخته است. همچنین، در تحقیق شی و همکاران (۲۰۱۰) چگونگی اثرگذاری فشارهای ناشی از انفجار بر تونل‌های مترو، مدل‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نحوه وقوع تخریب در یک پل فولادی تحت اثر انفجار در مطالعه دنگ و جین (۲۰۰۹) مطرح گردیده است. نیروها و اضافه فشارهای وارد بر پل‌های بزرگراهی تحت اثر امواج کوبشی ناشی از انفجار با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آن در پی و آگراوال (۲۰۰۹) مورد بررسی قرار گرفته است.

پنگ و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی دقیق چگونگی اعمال نیروهای ناشی از انفجار بر سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش امواج انفجاری با رفتار دینامیک سازه پرداخته است. در نگو و همکاران (۲۰۰۷) مطالعه جامعی روی نحوه بارگذاری انفجاری سازه‌ها و اثر انفجار بر سازه انجام پذیرفته است. در این تحقیق، سعی شده با روش‌های کلاسیک محاسبه فشار ناشی از انفجار بر سازه‌ها، میران نیروی وارد بر سازه‌ها تعیین گردد.

اداره فدرال بزرگراه‌های ایالات متحده آمریکا گزارش مفصلی در خصوص خطراتی که پل‌ها و تونل‌ها را از نقطه نظر حملات انفجاری، شیمیایی، میکروبی و همچنین خطرات طبیعی تهدید می‌کند ارائه کرده است (دوادی و چیس، ۲۰۰۶). علاوه بر مراجعی که در این قسمت به آنها اشاره گردید، محققین بسیاری تحقیقات گوناگونی را پیرامون بررسی انتشار امواج انفجاری، چگونگی اثرگذاری آنها بر سازه‌ها و ابنیه فنی راه‌ها انجام داده‌اند. ولی تا کنون در هیچیک از تحقیقات به بررسی تفرق امواج انفجاری در مجاورت عوارض توپوگرافی پرداخته نشده است.

به منظور محاسبه بیشینه اضافه فشار ناشی از انفجار در نواحی مسطح که در مجاورت عارضه توپوگرافی قرار ندارند، از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{808[1 + (\frac{Z}{4.5})^2]}{\sqrt{1 + (\frac{Z}{0.048})^2} \sqrt{1 + (\frac{Z}{0.32})^2} \sqrt{1 + (\frac{Z}{4.5})^2}} \quad (2)$$

یک موج لرزش آنی به درون آن پراکنده و منتقل می‌شود. شوک اولیه حاصل از انفجار یک ماده منفجره قوی دارای فشاری حدود ۲۰۰ کیلو بار و دمایی در حدود ۵۰۰۰ درجه سانتیگراد است. قطعات ترکش‌ها با شتاب زیاد در فضا منتشر می‌شوند. انتشار ترکش‌ها، امواج دینامیک و امواج حرارتی از نقطه شروع انفجار در تمام جهتها و با الگوی نیم‌کروی صورت می‌گیرد. اگر موج انفجار به دیوار ضخیمی که عمود بر مسیر موج است برسد، منعکس می‌گردد و فشارهای حاصل از این انعکاس، بیش از دو برابر فشار اوج اولیه خواهد بود (کینی و کنت، ۱۹۸۵). شدت این انفجار با افزایش فاصله و گذشت زمان کاهش می‌یابد. مقدار بارهای انفجاری و نحوه تغذیه فشارهای حاصل روی مانع، تابع خاص سیستم انفجاری (جنس، وزن، مقدار انرژی آزاد شده)، موقعیت منطقه انفجار نسبت به مانع و مقدار تقویت فشار بر اثر تداخل با زمین یا مانع می‌باشد. سازه‌هایی که در فاصله کمی از نقطه انفجار قرار گرفته باشند، تحت تأثیر نیروهای دینامیک وارد شده، به سمت خارج خم می‌شوند و سپس بر اثر مکش ایجاد شده به طرف مقابل بر می‌گردند و در نتیجه ترک‌هایی در آنها ایجاد می‌شود که موجب ریزش آنها به فضای باز پیرامونی می‌گردد.

با توجه به مباحث فوق، واضح است که از دیدگاه مبحث انتشار امواج، مهمترین آثار یک انفجار ناشی از امواج دینامیک می‌باشد که به منظور ساخت سازه‌ای ایمن در مقابل این امواج، باید پارامترهای مؤثر بر آن به خوبی شناسایی گردند و میزان تأثیر هر کدام بر میزان تخریب احتمالی قابل ایجاد در سازه‌ها مد نظر قرار گیرد.

تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با بررسی ویژگی‌ها و نحوه ایجاد امواج انفجاری در فشار وارد بر سازه‌ها صورت گرفته است. نیدهام (۲۰۱۰) به طور مفصل به بررسی ویژگی‌های امواج انفجاری ناشی از مواد منفجره مختلف پرداخته است.

تیویکرام و همکاران (۲۰۰۹) به مدل‌سازی و بررسی اثر انفجار در مجاورت یک پل راه‌آهن توسط نرم‌افزار

می‌گردد، که  $u_1$  سرعت موج فرودی و  $a_1$  سرعت صوت می‌باشد. همچنین، رابطه بین زاویه موج فرودی و زاویه بازتاب مطابق رابطه (۴) می‌باشد (کینی و کنت، ۱۹۸۵):

$$\frac{\tan(\beta - \theta)}{\tan \beta} = \frac{5 + (M_1 \sin \beta)^2}{6(M_1 \sin \beta)^2} \quad (4)$$

بنابراین، برای مشخص شدن مسئله برخورد موج باید دو مؤلفه سرعت موج و زاویه برخورد معلوم باشند. این روابط در واقع ناشی از روابط رانکین-هوگونیوت می‌باشند (تامسون، ۱۹۷۲). اثر اضافه فشار ناشی از پدیده تفرق امواج به ندرت در مورد مسائل انفجاری و اندرکنش آنها با سازه مورد تحقیق قرار گرفته است.

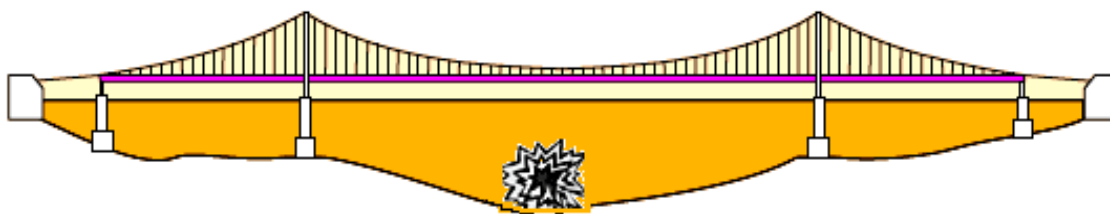
با عنایت به بررسی ادبیات فنی موجود در زمینه انفجار، امواج انفجاری و سازه‌های مقاوم در برابر انفجار، انجام مطالعه‌ای در مورد رفتار امواج انفجاری در مجاورت عوارض توپوگرافی به وضوح احساس می‌شود. از مهمترین اهداف مقاله حاضر را می‌توان بررسی قرارگیری برخی سازه‌های مهم، زیرساخت‌های حمل و نقل، تونل‌ها، پل‌ها و سایر ابنیه فنی در مجاورت عوارض توپوگرافی دانست (شکل ۱).

که  $Z$  فاصله مقیاس شده،  $R$  فاصله خرج تا نقطه مورد نظر به متر،  $W$  مقدار خرج انفجاری به کیلوگرم،  $P$  اضافه فشار در نواحی مسطح و  $P_0$  مقدار فشار هوا می‌باشد (سول و همکاران، ۱۹۷۹).

زمانی که یک موج انفجاری به یک سطح شیبدار می‌رسد و یا موج به صورت مایل به یک سطح برخورد می‌کند، جبهه موج شکسته می‌شود و تحت یک زاویه انحرافی بازتاب می‌گردد. اگر موج برخوردی دارای زاویه  $\beta$  با امتداد سطح بوده و زاویه بازتاب موج برابر با  $\delta$  باشد و زاویه سطح مایل  $\theta$  باشد، بر اساس روابط دینامیک سیالات رابطه‌ای مانند رابطه (۳) بین هندسه موج برخوردی و موج بازتاب شده، سرعت موج فرودی و همچنین فشار ایجاد شده وجود دارد (کینی و کنت، ۱۹۸۵). طبق رابطه (۳)، میزان اضافه فشار در اثر برخورد مایل، تابعی از زاویه برخورد موج و سرعت موج فرودی می‌باشد:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{7M_1^2 \sin^2 \beta - 1}{6} \quad (3)$$

که در آن  $M_1$  عدد ماخ متناظر با حرکت موج روی سطح افق بوده و مقدار آن از رابطه  $M_1 = u_1/a_1$  محاسبه



شکل ۱. انفجار در مجاورت پل در حضور عارضه توپوگرافی

انفجاری و اضافه فشار ایجاد شده ناشی از آنها و محاسبه اضافه فشار انفجاری در مجاورت عوارض توپوگرافی با شکل‌های خاص و روند تغییرات آنها پرداخته شده است و در انتها میزان اضافه فشار ایجاد شده در مجاورت عوارض توپوگرافی محاسبه و با مقادیر مشابه در نواحی مسطح (با استفاده از روابط متداول، رابطه ۲) مقایسه شده است.

با توجه به آگاهی از رفتار امواج در مجاورت موانع، و به‌ویژه عوارض توپوگرافی، انتظار می‌رود که مقادیر نیروهای وارد بر سازه‌های قرار گرفته در مجاورت این عوارض ناشی از انفجار، متفاوت از مقادیر نیروها در نواحی مسطح باشد که کیفیت و کمیت آنها تا پیش از این، در ادبیات فنی مورد توجه قرار نگرفته است.

در مقاله حاضر، پس از شناسایی رفتار امواج انفجاری در مجاورت عوارض قائم، به تبیین تفاوت‌های رفتاری امواج

بررسی و تعیین اضافه فشار بیشینه وارد بر ابنیه فنی راه و زیرساخت‌های حمل و نقل واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی تحت اثر انفجار

## ۲. معرفی مدل

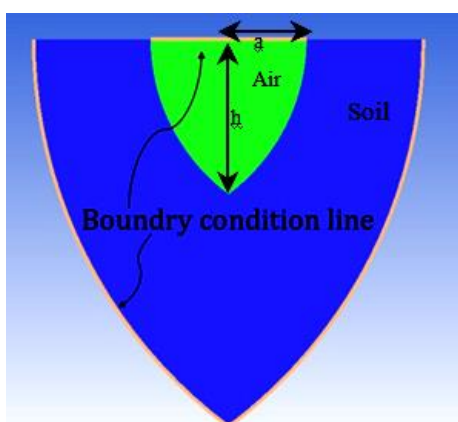
در این تحقیق، نوع خاک دره ماسه سفت با رفتار الاستیک بوده و برای هر یک از دره‌ها مقادیر مختلف مواد منفجره در نظر گرفته شده است.

دره‌های نیم‌دایره‌ای با شعاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر و دره‌های نیم‌تخم‌مرغی با نسبت دهانه به عمق ۰/۵ و ۰/۶۷ مدل‌سازی شده‌اند. برای دره‌های نیم‌دایره‌ای، مقادیر مواد منفجره با شکل دایره‌ای با شعاع‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر و برای دره نیم‌تخم‌مرغی مقادیر ماده منفجره با شعاع‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متری در محل خط‌القعر دره‌ها، در نظر گرفته شده است.

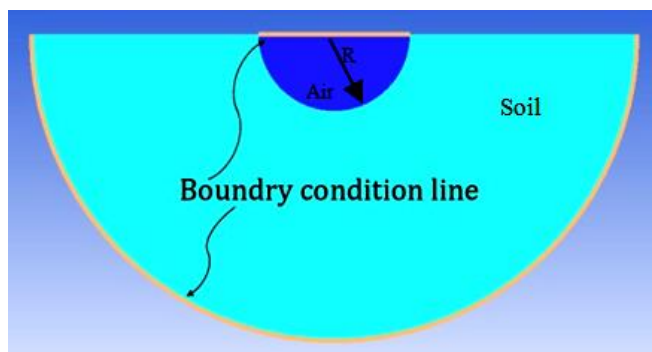
در این تحقیق، با ارائه مدل‌هایی، به بررسی رفتار امواج انفجاری در مجاورت عوارض توپوگرافی پرداخته خواهد شد. دو نوع دره با شکل‌های هندسی نیم‌دایره‌ای با شعاع‌های مختلف و نیم‌تخم‌مرغی با نسبت دهانه (2a) به عمق (h) مختلف در نظر گرفته شده است. شکل هندسی دره‌ها، نحوه مدل‌سازی هندسه و شرایط مرزی آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. خصوصیات مصالح در نظر گرفته شده برای هوا، خاک و مواد منفجره طبق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. خصوصیات مصالح مورد استفاده

ماده	معادله حالت	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	K (Kpa)	G (Kpa)
عارضه	جامد خطی	1.5	$6 \times 10^4$	$2.4 \times 10^4$
هوا	گاز ایده‌آل	$1.225 \times 10^{-2}$		
TNT	جامد انفجاری	1.63		



(ب)



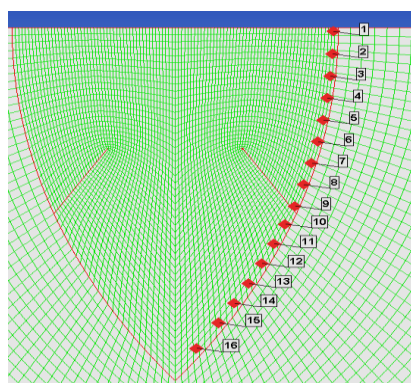
(الف)

شکل ۲. هندسه و شرایط مرزی دره‌های مدل‌سازی شده: (الف) دره نیم‌دایره‌ای و (ب) دره نیم‌تخم‌مرغی

است و دارای کتابخانه وسیع و متنوعی از مواد و خصوصیات مصالح می‌باشد (ANSYS AUTODYN, 2010). هندسه مدل طوری انتخاب شده که بتواند مرزهای دوردست و شرایط میرایی تشعشعی را به خوبی ارضا نماید و به همین دلیل، خاک اطراف دره تا محدوده‌ای معادل ۴ برابر شعاع دره برای دره‌های نیم‌دایره‌ای و تا

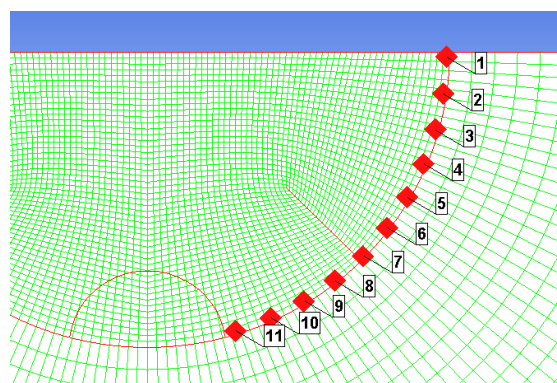
مدل‌سازی دره‌ها و مواد منفجره، در نرم‌افزار AUTODYN که از زیرمجموعه‌های نرم‌افزار اصلی ANSYS Workbench است، به صورت دوبعدی صفحه‌ای صورت گرفت. این نرم‌افزار که مسائل را بر پایه روش المان محدود حل می‌کند، در بررسی مسائل مهندسی ضربه و انفجار با سرعت‌های بالا و نرخ کرنشی سریع، بسیار توانا

در المان‌ها وجود دارد: نوع تعادلی و نوع میانگین، که برای مدل حاضر از نوع تعادلی استفاده شده است. روش تعادلی، از یک روش تکراری برای مشخص کردن فشار سازگار با معادله حالت و شرایط مرزی در هر ماده استفاده می‌کند. این روش برای مواد گازی ایده‌آل و مواد منفجره مناسب می‌باشد. نوع المان استفاده شده در تحلیل از نوع المان چهارپهلوی چهارگرهی می‌باشد.



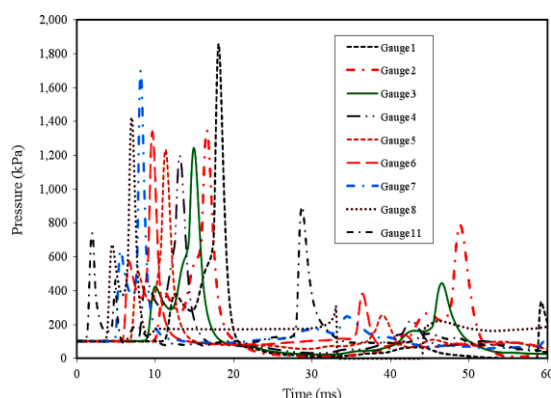
(ب)

محدوده‌ای معادل 4a برای دره‌های نیم‌تخم‌مرغی مدل‌سازی شده‌اند. مدل اجزای محدود در نظر گرفته شده برای تحلیل این مسائل، از نوع دوبعدی صفحه‌ای غیرخطی می‌باشد که برای حل روابط حاکم، از حلگر صریح اویلری دوبعدی استفاده می‌کند. زمانی که از حلگر اویلری چند ماده‌ای برای تحلیل استفاده می‌شود، دو روش برای محاسبه فشار



(الف)

شکل ۳. محل نقاط ثبت فشار در مدل ساخته شده: (الف) دره نیم‌دایره‌ای و (ب) دره نیم‌تخم‌مرغی



شکل ۴. نمودار تغییرات فشار امواج انفجاری در اثر انفجار در دره دایره‌ای با خرج با شعاع ۱۰۰ میلی‌متری و وزن ۶/۸۳ کیلوگرم

در دیواره دره‌ها، تعدادی دریافت‌کننده امواج برای ثبت تاریخچه فشار بر حسب زمان در نظر گرفته شده که در شکل ۳. محل آنها نشان داده شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای هندسه مسئله در نواحی نشان داده شده در شکل ۲ از نوع مرز باز با امکان خروج جبهه موج در نظر گرفته شده است که موج‌های انفجاری تولید شده در نواحی مشخص، امکان خروج از مرز شکل را دارند. همچنین، المان و گره‌های مدل در سطح تماس هوا و خاک به هم اتصال کامل دارند و قادرند تغییر مکان‌های ایجاد شده را دقیقاً منتقل نمایند (شکل ۳).

### ۳. نتایج آنالیز

برای دره‌های معرفی شده، هندسه مدل به همراه اختصاص شرایط مرزی و خرج انفجاری مدل‌های مختلف ساخته شده و نتایج آنها استخراج گردیده که در ادامه به بررسی این نتایج پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱. دره دایره‌ای شکل

در شکل ۴، نتایج حاصل از حل مسئله در یک دره دایره‌ای به دهانه ۲۰ متر تحت اثر امواج انفجاری ناشی از انفجار TNT با شعاع ۱۰۰ میلی‌متر و وزن ۶/۸۳ کیلوگرم، ارائه شده است. این نمودار، تغییرات فشار ایجاد شده ناشی از این انفجار را در نقاط مختلف، در مقابل زمان

بررسی و تعیین اضافه فشار بیشینه وارد بر ابنیه فنی راه و زیرساخت‌های حمل و نقل واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی تحت اثر انفجار

بالا تر در دره می‌باشد، که نشان دهنده سیر طبیعی انتشار رو به بالای امواج انفجاری است.

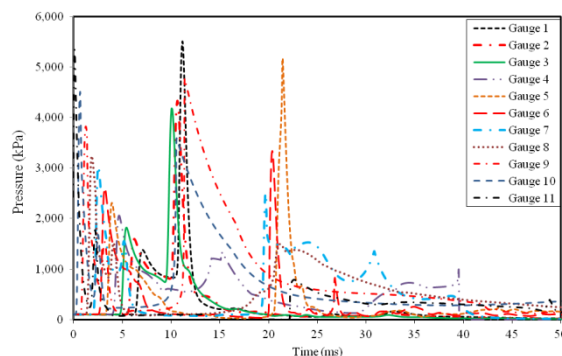
قسمت اضافه فشار دوم، ناشی از برخورد امواج انفجار به دیواره دره و برگشت آن به نقطه مورد نظر می‌باشد. این موج برگشتی، با اضافه فشار ناشی از برخورد با تأخیر زمانی به نقطه مورد نظر می‌رسد. موج فرودی اولیه با موج برخوردی ثانویه در محل با یکدیگر جمع می‌شوند و به این ترتیب امواج دیگری نیز که حاصل انعکاس موج‌های اولیه هستند باعث اضافه فشار زیادی در بعضی نقاط دره که بنا به شکل هندسی و مقدار مواد منفجره متغیر است می‌گردند. مقدار ماکزیمم این فشار مربوط به نقطه شماره ۱ است و دارای اضافه فشاری در حدود ۵۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد که در مقایسه با قسمت اضافه فشار اولیه که در نقطه ۹ اتفاق افتاده و دارای فشار ۲۷۵۰ کیلوپاسکال است، مقدار قابل توجهی است. همچنین، مقدار اضافه فشار در نقاط ۳، ۴ و ۲ نیز در حدود ۴۵۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد، که این نقاط نیز در اثر برگشت امواج منعکس شده، مقادیر قابل توجهی اضافه فشار را تجربه می‌کنند. نکته جالب توجه این است که این نقاط در دیواره دره و در حوالی میانه دره واقع هستند و بر خلاف انتظار روابط متداول محاسبه اضافه فشار ناشی از انفجار، مقدار اضافه فشار ایجاد شده در این نقاط، از مقادیر اضافه فشار ایجاد شده در نقاط نزدیک به خرج انفجاری، بیشتر است.

این مسئله از این دید اهمیت دارد که ممکن است سازه‌ای در اثر این ناپدید گرفته شدن اثر برخورد و بازگشت امواج انفجاری، برای فشاری بسیار کمتر از این مقدار طراحی شود و حاشیه اطمینان غیر قابل قبولی به منظور تحمل نیروهای ناشی از فشارهای انفجار داشته باشد. حال آن که این نقاط علاوه بر تجربه فشار مستقیم ناشی از امواج انفجار، در معرض اثر ثانویه انعکاس امواج نیز قرار می‌گیرند.

شکل ۶. تغییرات فشار را در نقاط مختلف برای دره دایره‌ای با مواد منفجره به وزن ۱۸۴/۲۸ کیلوگرم را نشان

نشان می‌دهد. به منظور مقایسه بهتر، مقادیر مربوط به نقاط شماره ۹ و ۱۰ که مقدار اضافه فشار ایجاد شده در آنها نسبت به مقادیر اضافه فشار ایجاد شده در سایر نقاط، به دلیل نزدیکی به محل خرج انفجاری، زیاد بوده، در این نمودار حذف گردیده است.

در شکل ۴. مشاهده می‌شود که در تمامی نقاط، فشارها کمتر از ۲۰۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد و در نقطه ۸ دارای حداکثر مقدار ۱۸۵۰ کیلوپاسکال است. همان‌طور که در این نمودار ملاحظه می‌گردد، فشار ایجاد شده در هر نقطه یک مقدار بیشینه دارد که مربوط به موج کوبشی مستقیمی است که به آن نقطه می‌رسد. البته مقدار اضافه فشار بیشینه ایجاد شده در نقطه ۹ برابر با ۸۸۵۰ کیلوپاسکال است که از نمودار شکل ۴. حذف گردیده است.



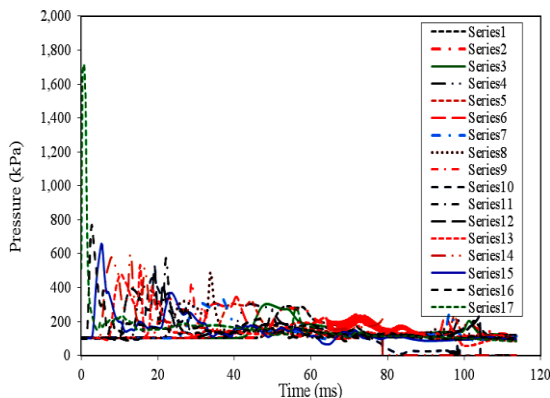
شکل ۵. فشار امواج انفجاری در اثر انفجار در دره دایره‌ای با خرج با شعاع ۲۰۰ میلی‌متری و وزن ۵۴/۶ کیلوگرم

نتایج آنالیز در دره دایره‌ای در مقابل انفجار مواد منفجره به وزن ۵۴/۶ کیلوگرم، در شکل ۵. ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، این نمودار دارای دو قسمت اضافه فشار عمده می‌باشد که قسمت اول مربوط به موج‌های اولیه‌ای است که به طور مستقیم از خود ماده منفجره ساطع می‌شوند و به نقاط هدف می‌رسند. در این ناحیه، فشارها کمتر از ۶۰۰۰ کیلوپاسکال هستند. در این بخش از نمودار، موج انفجاری ابتدا به نقطه ۹، سپس به نقطه ۸ و در ادامه به نقاط ۷ و ۵ می‌رسد، که این موضوع، بیانگر انتشار رو به بالای موج انفجاری است. همان‌طور که انتظار می‌رود، در یک زمان معین، فشار در نقاط پایین‌تر، بیش از مقدار فشار در نقاط واقع در ترازهای

حدود ۴۲۸۰۰ کیلوپاسکال بوده که حتی از مقادیر اضافه فشار بیشینه ایجاد شده در نقاط ۶ و ۵ نیز بیشتر است. قله اول در زمانی معادل ۱۰ میلی ثانیه، قله دوم در حدود زمان ۲۲ میلی ثانیه و قله سوم در زمان ۵۷ میلی ثانیه رخ می‌دهد، که اختلاف زمان ایجاد شدن این قله‌ها برابر با مدت زمان طی مسافت توسط موج انفجاری در فضای دره می‌باشد. نتایج حاصل از آنالیز انفجار در دره دایره‌ای در مقابل ماده منفجره به وزن ۴۳۶/۸ کیلوگرم در شکل ۷. ترسیم شده است. این نمودار، مقادیر اضافه فشار بسیار بیشتری را نسبت به دو حالت قبل نشان می‌دهد. مقدار اضافه فشار ایجاد شده در نقطه ۳ برابر با ۱۵۳۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد و بعد از آن در نقطه ۲ اضافه فشار رخ می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار مواد منفجره محل وقوع بیشینه فشار به سمت نقاط بالایی در دره حرکت می‌کند و مقدار آن به شدت افزایش می‌یابد.

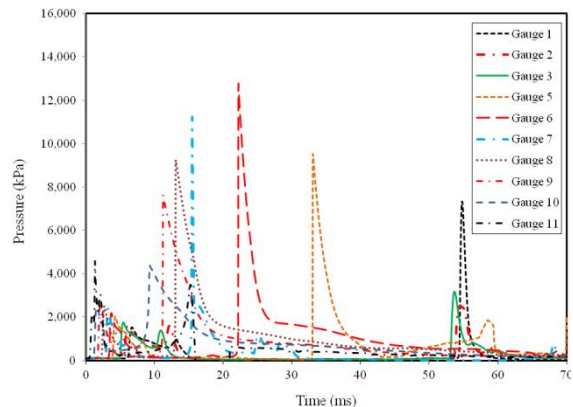
### ۳-۲. دره تخم مرغی

در شکل ۸، تاریخچه تغییرات فشار در مقابل زمان برای نقاط مختلف در دره تخم مرغی شکل تحت اثر انفجار ماده منفجره به وزن ۵۴/۶ کیلوگرم ترسیم شده است. ملاحظه می‌گردد که این شکل دارای تعدادی قله است که ماکزیمم آنها در گنج‌های ۱۷ و ۱۶ اتفاق می‌افتد. اضافه فشار در گنج ۱۶، ۷۶۸ کیلوپاسکال است که از مقدار فشار گنج ۱۷ که در نزدیکی مواد منفجره است نیز بیشتر می‌باشد.

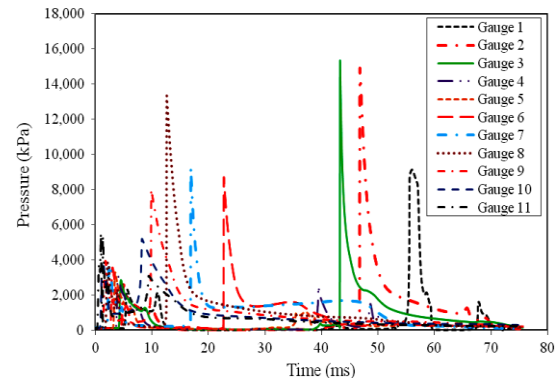


شکل ۸. فشار امواج انفجاری در اثر انفجار در دره تخم مرغی با خرج با شعاع ۲۰۰ میلی متری و وزن ۵۴/۶ کیلوگرم

می‌دهد. به منظور مقایسه بهتر، مقادیر مربوط به نقطه ۴ که مقدار اضافه فشار ایجاد شده در آن نسبت به مقادیر اضافه فشار ایجاد شده در سایر نقاط، زیاد بوده، حذف گردیده است. این نمودار نیز دارای سه قله اضافه فشار می‌باشد که با توجه به مقدار زیاد ماده منفجره، تعداد رفت و برگشت موج در فضای دره بیشتر می‌باشد و به همین دلیل، قدرت امواج در انعکاس‌های مکرر دیرتر مستهلک شده و اضافه فشار بیشینه بیشتری را در نقاط مختلف ایجاد کرده است.



شکل ۶. فشار امواج انفجاری در اثر انفجار در دره دایره‌ای با خرج با شعاع ۲۵۰ میلی متری و وزن ۱۸۴/۲۸ کیلوگرم

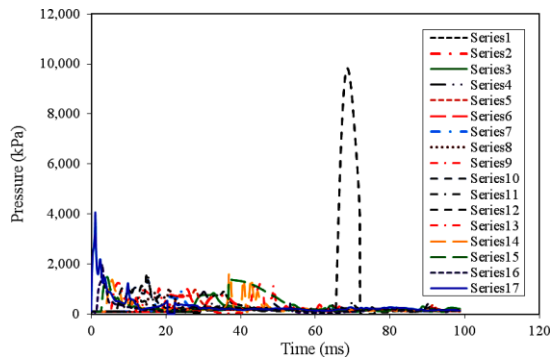


شکل ۷. فشار امواج انفجاری در اثر انفجار در دره دایره‌ای با خرج با شعاع ۳۰۰ میلی متری و وزن ۴۳۶/۸ کیلوگرم

مقادیر اضافه فشار بیشینه در قله اول به ترتیب مربوط به نقاط ۱۱، ۱۰، ۹ و ۸ می‌باشد. مقدار اضافه فشار ایجاد شده در نقطه ۸ ۱۱۲۰۰ کیلوپاسکال است. مقدار اضافه فشار بیشینه در قله دوم در نقاط ۳، ۵ و ۶ به ترتیب ۳۱۷۰، ۹۵۰۰ و ۱۲۷۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. قله سوم در نقطه ۴ اتفاق می‌افتد و دارای اضافه فشار بیشینه‌ای در

بررسی و تعیین اضافه فشار بیشینه وارد بر ابنیه فنی راه و زیرساخت‌های حمل و نقل واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی تحت اثر انفجار

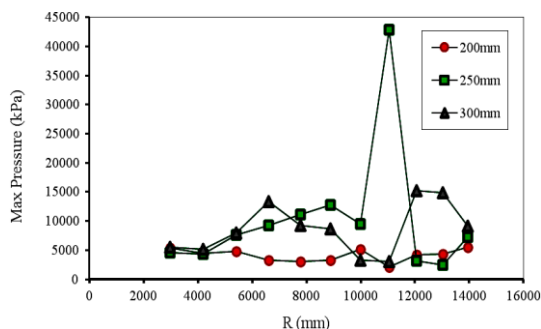
ملاحظه می‌گردد، آشفتگی ناشی از برخورد و بازتاب امواج در دره در این حالت زیاد می‌باشد و این به دلیل عمیق بودن دره است. در اثر بازتاب این امواج، نقطه ۱۲ دارای فشار ماکزیمم ۹۸۱۰ کیلوپاسکال می‌باشد.



شکل ۱۰. فشار امواج انفجاری در اثر انفجار در دره تخم- مرغی با خرج با شعاع ۴۰۰ میلی‌متری و وزن ۴۳۶/۸ کیلوگرم

### ۳-۳. بررسی اثر ابعاد دره بر میزان فشار انفجاری

به منظور بررسی اثر ابعاد دره بر میزان اضافه فشار بیشینه تولید شده ناشی از انفجار، دره دایره‌ای و تخم‌مرغی با ابعاد مختلف تحت اثر ماده منفجره با شعاع ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر مورد آنالیز مجدد قرار گرفت. نتایج آنالیز برای دره با دهانه‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر در ادامه ارائه شده است. منظور از R در این نمودارها، فاصله محل خرج (پایین‌ترین نقطه دره) تا محل نقطه مورد نظر است.

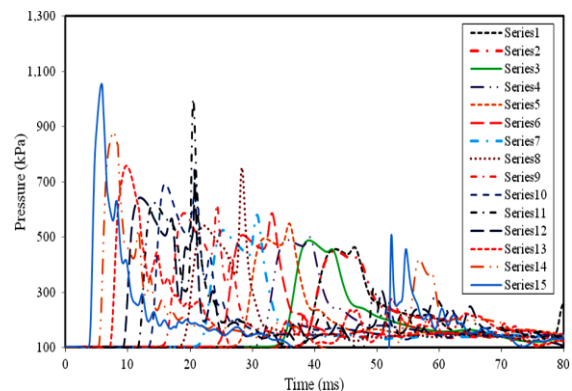


شکل ۱۱. نمودار تغییرات فشار بر حسب فاصله در دره دایره‌ای با دهانه ۲۰ متر

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار مواد منفجره، میزان اضافه فشار ناشی از انفجار افزایش می‌یابد و ملاحظه می‌گردد که در برخی فواصل

این پدیده به دلیل شکل هندسی خاص این دره رخ می‌دهد. از آنجا که هندسه این دره تا حوالی میانه دامنه به صورت خط راست بوده و در ادامه فرم منحنی پیدا می‌کند، موج‌های فرودی اولیه نیز در مرز تغییر شکل دره دچار انعکاس‌هایی می‌شوند که این انعکاس‌ها نیز بر مقادیر اضافه فشار ایجاد شده در نقاط مختلف تأثیرگذارند.

میزان فشار نقاط مختلف در دره تخم‌مرغی تحت اثر انفجار با ماده منفجره به وزن ۱۸۴/۲۸ کیلوگرم در شکل ۹ ارائه شده است. به منظور مقایسه بهتر، مقادیر مربوط به نقاط ۱۶ و ۱۷ که مقدار اضافه فشار ایجاد شده در آنها نسبت به مقادیر اضافه فشار سایر نقاط، زیاد بوده، حذف گردیده است. این نمودار، دارای دو قله می‌باشد که قله اول مربوط به نقطه ۱۷ با مقدار اضافه فشار بیشینه ۳۱۰۰ کیلوپاسکال است. قله دوم در نقطه ۱۶ اتفاق افتاده که مقدار اضافه فشار بیشینه آن برابر با ۱۴۸۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. قله سوم نیز در نقاط ۱۵ و ۴ اتفاق افتاده که مقدار اضافه فشار بیشینه در این نقاط به ترتیب برابر با ۱۰۵۰ و ۱۰۳۵ کیلوپاسکال می‌باشد.

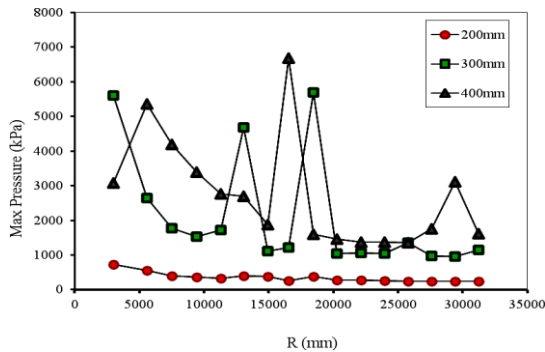


شکل ۹. فشار امواج انفجاری در اثر انفجار دره تخم‌مرغی با خرج با شعاع ۳۰۰ میلی‌متری و وزن ۱۸۴/۲۸ کیلوگرم

میزان اضافه فشار ایجاد شده در نقاط مختلف دره تخم‌مرغی تحت اثر انفجار با ماده منفجره به وزن ۴۳۶/۸ کیلوگرم در شکل ۱۰ ارائه شده است. ماکزیمم فشار اولین قله در نقطه ۱۷ رخ می‌دهد که ناشی از برخورد اولین جبهه موج با این نقطه می‌باشد. همان‌طور که

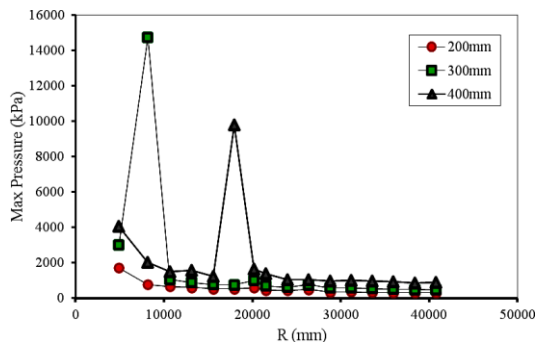


این مقدار بیشینه است، که حاصل انعکاس امواج و برخورد آنها در یک نقطه خاص می‌باشد. شکل ۱۲. نمودار تغییرات فشار در مقابل فاصله در دره دایره‌ای با دهانه ۳۰ متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در محدوده فاصله ۷۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ میلی‌متری از خرج یک نقطه ماکزیمم اتفاق افتاده است که نشان می‌دهد در این فاصله، میزان اضافه فشار بحرانی می‌شود و به ازای خرج‌های بیشتر این اضافه فشار افزایش می‌یابد. نتایج آنالیز انفجار در دره دایره‌ای با دهانه ۴۰ متر در شکل‌شکل ۱۳. نشان داده شده است. در این شکل، اثر انعکاس امواج برخوردی با دیواره دره مشهود است و در فاصله ۱۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ میلی‌متر این اثر تشدید فشار قابل ملاحظه است.



شکل ۱۴. تغییرات فشار بر حسب فاصله دره تخم‌مرغی با نسبت دهانه به ارتفاع ۱/۵

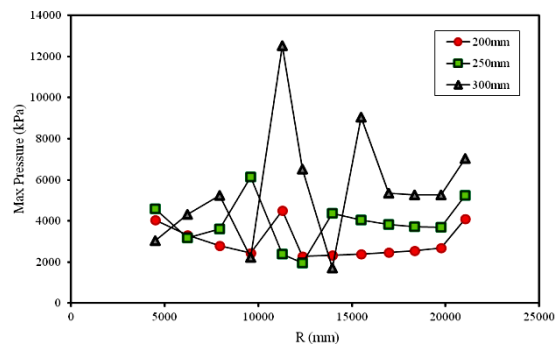
دره تخم‌مرغی با نسبت دهانه به ارتفاع ۲ نیز دارای نقاط ماکزیمم تقریباً در همان فواصل نمونه با نسبت ۱/۵ می‌باشد و این نشان می‌دهد که در دره تخم‌مرغی، اثر تشدید فشار قابل ملاحظه است و باید در روند طراحی ابنیه فنی که در این نواحی واقع می‌شوند، منظور گردد.



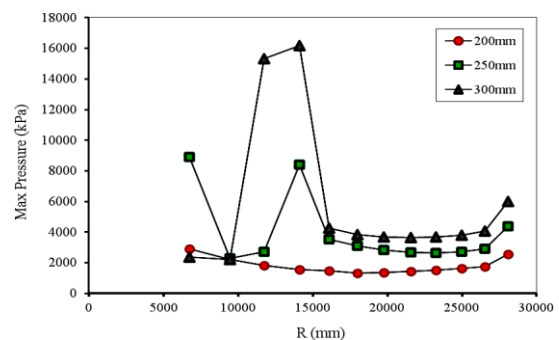
شکل ۱۵. تغییرات فشار بر حسب فاصله دره تخم‌مرغی با نسبت دهانه به ارتفاع ۲

به منظور مقایسه بهتر، مقادیر مطلق اضافه فشار بیشینه ناشی از انفجار مقادیر مختلف مواد منفجره در دره‌های دایره‌ای و تخم‌مرغی با هندسه‌های متفاوت به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ ترسیم گردیده است. بر اساس نمودار این شکل‌ها، ملاحظه می‌گردد که با کاهش دهانه دره، مقادیر اضافه فشار ناشی از انفجار افزایش می‌یابد.

شکل ۱۲. نمودار تغییرات فشار در مقابل فاصله در دره دایره‌ای با دهانه ۳۰ متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در محدوده فاصله ۷۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ میلی‌متری از خرج یک نقطه ماکزیمم اتفاق افتاده است که نشان می‌دهد در این فاصله، میزان اضافه فشار بحرانی می‌شود و به ازای خرج‌های بیشتر این اضافه فشار افزایش می‌یابد. نتایج آنالیز انفجار در دره دایره‌ای با دهانه ۴۰ متر در شکل‌شکل ۱۳. نشان داده شده است. در این شکل، اثر انعکاس امواج برخوردی با دیواره دره مشهود است و در فاصله ۱۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ میلی‌متر این اثر تشدید فشار قابل ملاحظه است.



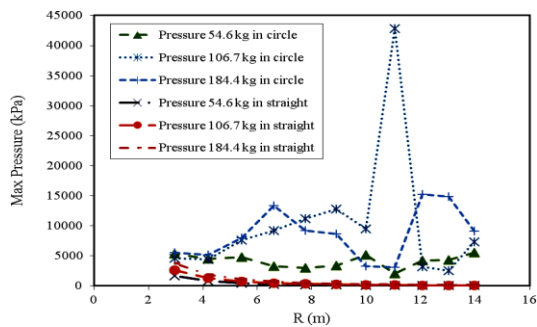
شکل ۱۲. تغییرات فشار بر حسب فاصله در دره دایره‌ای با دهانه ۳۰ متر



شکل ۱۳. تغییرات فشار بر حسب فاصله در دره دایره‌ای با دهانه ۴۰ متر

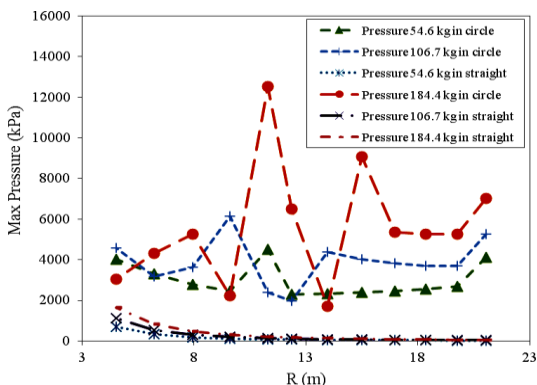
برای دره تخم‌مرغی نیز به ازای مقادیر مختلف نسبت دهانه به ارتفاع ( $2a/h$ ) برابر با ۱/۵ و ۲ در اثر انفجار مواد منفجره با شعاع‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متری واقع در

بررسی و تعیین اضافه فشار بیشینه وارد بر ابنیه فنی راه و زیرساخت‌های حمل و نقل واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی تحت اثر انفجار



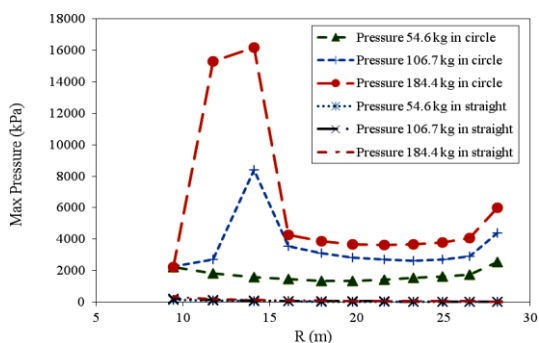
شکل ۱۸. مقادیر اضافه فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در دره دایره‌ای با دهانه ۲۰ متر در تحقیق حاضر و مقایسه آن با مقادیر اضافه فشار محاسبه شده با استفاده از روابط

متداول در نواحی مسطح



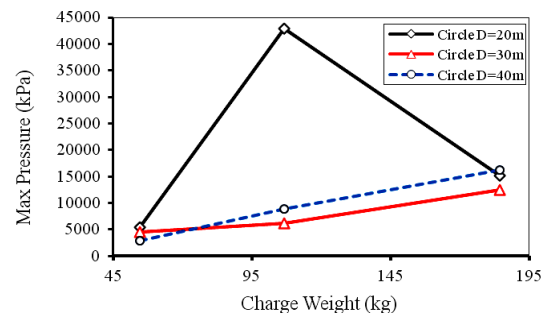
شکل ۱۹. مقادیر اضافه فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در دره دایره‌ای با دهانه ۳۰ متر در تحقیق حاضر و مقایسه آن با مقادیر اضافه فشار محاسبه شده با استفاده از روابط

متداول در نواحی مسطح

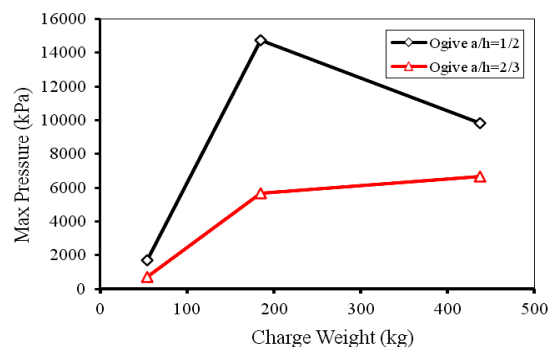


شکل ۲۰. مقادیر اضافه فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در دره دایره‌ای با دهانه ۴۰ متر در تحقیق حاضر و مقایسه آن با مقادیر اضافه فشار محاسبه شده با استفاده از روابط

متداول در نواحی مسطح



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر اضافه فشار ایجاد شده در دره دایره‌ای با هندسه متفاوت



شکل ۱۷. مقایسه مقادیر اضافه فشار ایجاد شده در دره تخم مرغی با هندسه متفاوت

۳-۴. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج روابط متداول

از آنجا که بسیاری از سازه‌ها مانند پل‌ها، تونل‌ها، خاکریزها و سایر زیرساخت‌های حمل و نقل در مجاورت عوارض توپوگرافی قرار دارند و روابط متداول نیز جایگاهی برای انعکاس و تفرق امواج انفجاری در نواحی در مجاورت این عوارض در نظر نمی‌گیرند، به منظور درک بهتر از رفتار امواج انفجاری در مجاورت عوارض توپوگرافی، در این قسمت به مقایسه مقادیر حاصل از نتایج تحقیق حاضر با مقادیر حاصل از روابط کلاسیک پرداخته می‌شود. به منظور محاسبه اضافه فشار ناشی از وقوع انفجار در نواحی مسطح و به دور از عوارض توپوگرافی، از روابط (۱) و (۲) استفاده شده است (کینی و کنت، ۱۹۸۵؛ سول و همکاران، ۱۹۷۹).

در شکل ۱۸ تا ۲۰ به مقایسه اضافه فشار ایجاد شده با در نظر گرفتن عارضه توپوگرافی به عنوان یک دره دایره‌ای و مقادیر مشابه با استفاده از روابط متداول پرداخته شده است.

#### ۴. جمع‌بندی

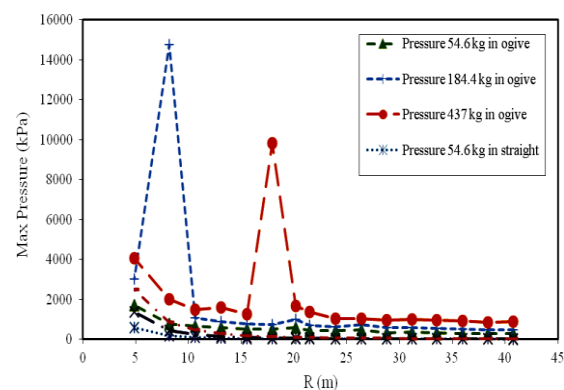
از آنجا که بسیاری از ابنیه پر اهمیت در زیرساخت‌های حمل و نقل در نواحی مجاور عوارض توپوگرافی قرار دارند و نظر به کمبود تحقیقات در زمینه بررسی رفتار امواج انفجاری در مجاورت عوارض توپوگرافی، در مقاله حاضر با ارائه مدل‌هایی هرچند ساده، سعی بر مطالعه رفتار امواج انفجاری در مجاورت عوارض توپوگرافی و مقایسه مقادیر اضافه فشار ایجاد شده بر سازه‌های در معرض خطر انفجار در دره‌ها پرداخته شده است.

با بررسی نتایج آنالیزهای فوق، می‌توان به طور خلاصه بیان نمود که مقادیر اضافه فشاری بیشینه ناشی از وقوع انفجار در مجاورت عوارض توپوگرافی چندین برابر مقدار اضافه فشار ناشی از انفجار در نواحی مسطح است. همچنین، با افزایش مقدار ماده منفجره، میزان اضافه فشار ماکزیمم به طرز قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و هرچه دره کم‌عرض‌تر باشد، میزان اضافه فشار ایجاد شده در نقاط یکسان با مقادیر ماده منفجره یکسان، بیشتر است.

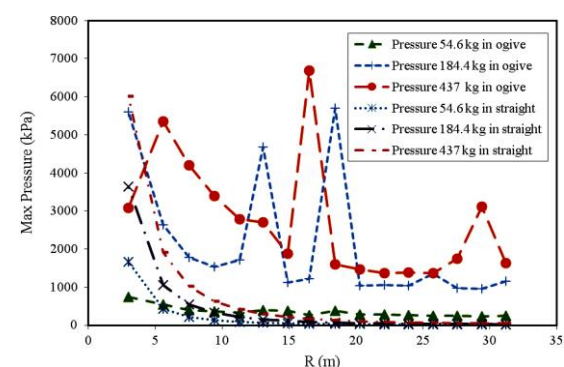
با در نظر گرفتن موارد فوق، واضح است که سازه‌هایی که در مجاورت عوارض قائم تحت اثر انفجار قرار می‌گیرند، باید توانایی تحمل مقادیر فشار بیشتری را نسبت به سازه‌های مشابه که در نواحی مسطح بنا می‌شوند داشته باشند.

با توجه به آنالیزهای انجام شده و مقادیر اضافه فشار محاسبه شده در نقاط مختلف که در بخش‌های قبلی ارائه گردید، ملاحظه می‌شود که مقادیر اضافه فشار وارد بر سازه‌ها در نواحی مسطح و در مجاورت عوارض توپوگرافی کاملاً از هم متفاوت هستند. عمده دلیل این موضوع را می‌توان در بحث مربوط به تفرق امواج کوبشی ناشی از انفجار در مجاورت عوارض توپوگرافی جستجو نمود که برخی ویژگی‌های این امواج با برخورد به عارضه توپوگرافی، دچار تغییر می‌گردد و در اثر انعکاس و انکسار آنها مقادیر اضافه فشار ایجاد شده روی سازه‌های واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی، بسیار بیشتر تعیین می‌گردد.

نمودارهای شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نیز به مقایسه اضافه فشار ایجاد شده، با در نظر گرفتن عارضه توپوگرافی به عنوان یک دره تخم‌مرغی و مقادیر مشابه، با استفاده از روابط متداول پرداخته‌اند. با بررسی دقیق این نمودارها ملاحظه می‌گردد که مقادیر اضافه فشار ایجاد شده در نقاط واقع در یک دره دایره‌ای بسیار بیشتر از مقادیر اضافه فشار ایجاد شده در نقاط واقع در یک ناحیه مسطح می‌باشد.



شکل ۲۱. مقادیر اضافه فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در دره تخم‌مرغی با نسبت دهانه به ارتفاع ۰/۵ و دهانه ۴۰ متر در تحقیق حاضر و مقایسه آن با مقادیر اضافه فشار محاسبه شده با استفاده از روابط متداول در نواحی مسطح



شکل ۲۲. مقادیر اضافه فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در دره تخم‌مرغی با نسبت دهانه به ارتفاع ۰/۶۷ و دهانه ۴۰ متر در تحقیق حاضر و مقایسه آن با مقادیر اضافه فشار محاسبه شده با استفاده از روابط متداول در نواحی مسطح

بررسی و تعیین اضافه فشار بیشینه وارد بر ابنیه فنی راه و زیرساخت‌های حمل و نقل واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی تحت اثر انفجار

هر چند که پژوهش حاضر به عنوان یک بررسی مقدماتی برای تعیین اضافه فشار بیشینه ایجاد شده ناشی از انفجار در نقاط مجاور عوارض توپوگرافی محسوب می‌گردد، اما از آنجا که چنین مطالعه‌ای تاکنون انجام نشده است، می‌تواند به عنوان شروعی برای انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه در نظر گرفته شود. تحقیقات بیشتر در این زمینه با در نظر گرفتن هندسه عوارض مختلف و شرایط دیگر، مسیری برای تهیه جداول و یا روابطی برای تعیین اضافه فشار بیشینه در نواحی قرار گرفته در مجاورت عوارض توپوگرافی و سازه‌های واقع در آن را تبیین کند که نتیجه نهایی آن می‌تواند مورد علاقه مهندسین طراح سازه‌های مقاوم در برابر انفجار باشد.

حال اگر برای طراحی یک سازه مقاوم در برابر انفجار که در مجاورت یک عارضه توپوگرافی احداث می‌گردد، از همان روابط کلاسیک مربوط به تعیین مقادیر اضافه فشار (روابط مربوط به انتشار موج انفجار در نواحی مسطح) استفاده گردد، به دلیل در نظر نگرفتن این موارد، مقدار نیروی اعمال شده بر چنین سازه‌ای نسبت سازه مشابه واقع در یک ناحیه مسطح متفاوت خواهد بود. بنابراین لازم است در برآورد نیروهای وارد بر سازه‌های واقع در مجاورت عوارض توپوگرافی، تحت اثر انفجار، بازبینی صورت پذیرد و چنین سازه‌هایی بر اساس نیروهای جدید طراحی و یا ارزیابی گردند.

## ۵. مراجع

- ANSYS AUTODYN. 2010. "AUTODYN Users Manual". Release 13.0. ANSYS, Inc. Proprietary.
- Deng, R. B. and Jin, X. 2009. "Numerical simulation of bridge damage under blast loads". WSEAS Trans. on Comput. 9(8): 1564-1574.
- Duwadi, S. R. and Chase, S. B. 2006. "Multiyear Plan for Bridge and Tunnel Security Research, Development and Deployment". FHWA-HRT-06-072, Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration, Springfield, VA.
- Kinney, G. F. and Kenneth, J. G. 1985. "Explosive Shocks in Air". Springer, Berlin.
- Needham, C. E. 2010. "Blast Waves". Springer, Berlin.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. and Ramsay, J. 2007. "Blast Loading and Blast Effects on Structures— An Overview". EJSE, Special Issue: Loading on Structures, pp. 76-91.
- Peng, W., Zhang, Z. and Gogos, G. 2009. Modeling and Simulation of Interaction between Blast Waves and Structures for Blast Mitigation". University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA.
- Sewell, R., Zulkosi, G. S. and Kinney, T. R. 1979. "Blast Parameter Characterization". Naval Weapons Center Technical Report TP 5920, Part 1, Volume 2, China.
- Thompson, P. A. 1972. "Compressible-fluid Dynamics". McGraw-Hill Book Co., New York.
- Trivikram, N. L., Vasanth, S., Ramesh, V. and Mrityunjaya, R. Y. 2009. "Simulation of explosion in train and bridge". 3<sup>rd</sup> ANSA & ETA International Conference, Khalkidhiki, Greece.
- Xie, X., Wang, R. and Yang, Y. 2010. "Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel". J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2(4): 373-384.
- Yi, Z. and Agrawal, A. K. 2009. Blast Load Effects on Highway Bridges". University Transportation Research Center, New York, USA.