

تحلیل تجربی تأثیرات نرخ کرنش بر رفتار سازه‌های بتنی در بارگذاری‌های حاصل از موج انفجار و معرفی یک مدل ریاضی جدید رفتاری بتن

جمال زمانی (دانشیار)

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

امیررفاهی اسکویی (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

رفتار سازه‌های بتنی، تحت شرایط بارگذاری دینامیکی و شبه استاتیکی، متفاوت‌اند. در این پژوهش رفتار دینامیکی بتن در برابر نرخ کرنش‌های بالا، به‌صورت تجربی و با استفاده از بارگذاری انفجاری بررسی، و نتایج حاصله با داده‌های نظری مقایسه شده است. ماده‌ی منفجره در جرم‌ها و ارتفاع‌های مختلف از بلوک‌های بتنی - که به‌صورت تیر ساده‌اند - قرار داده شده‌اند. با در دست داشتن خواص استاتیکی بتن و میزان فشار ناشی از انفجار، افزایش ظرفیت تحمل بار در حالت دینامیکی به‌دست می‌آید. در این آزمایش‌ها معیار تخریب ایجاد ترک در منطقه‌ی کششی تیر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصله حاکی از افزایش ضریب دینامیکی (ظرفیت تحمل بار) بین ۴٫۵ تا ۶ به‌ازاء نرخ کرنش‌های 10^{-1} تا 10^{-8} است. این نتایج با نتایج نظری و کارهای انجام‌شده قبلی مطابقت دارد. در پایان، با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab و با استفاده از شیوه‌ی طراحی آزمایش‌ها (DOE)، یک مدل ریاضی نیمه‌تجربی برای رفتار بتن تحت بار انفجاری معرفی شده است.

واژگان کلیدی: نرخ کرنش، بارگذاری انفجاری، سازه‌های بتنی، ضریب افزایش دینامیکی، رفتار دینامیکی.

zamani@kntu.ac.ir
amir_refahi82@yahoo.com

۱. مقدمه

در تعیین کارایی سازه‌ها بازی می‌کند. به‌منظور دست‌یابی به مدل‌های کاربردی برای شبیه‌سازی و پیش‌گویی عکس‌العمل چنین سازه‌هایی، انجام پاره‌یی آزمایش‌های عملی تحت شرایط مختلف و نیز شناسایی رفتار مواد طی مراحل مختلف تغییر شکل ضرورت دارد.

در سال ۲۰۰۰ تأثیر نرخ کرنش بر استحکام کششی بتن با انجام آزمایش گسیختگی آن با روش برزلی انجام شد^[۱] که مقادیر حاصله از آزمایش‌های عملی با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار اجزاء محدود ADINA مطابقت داشته و نتایج حاصله بیان‌گر افزایش قابل ملاحظه‌ی استحکام کششی ماده بوده است.

رفتار دینامیکی بتن بستگی دارد به نرخ کرنش تحت شرایط مختلف^[۱] که محدوده‌های مختلف آن با استفاده از وسایل و بارگذاری‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است. مثلاً با تعریف ضریب افزایش دینامیکی - نسبت استحکام دینامیکی به استحکام استاتیکی در نرخ کرنش‌های بالا - مقدار این کمیت را برای حالت فشاری بیشتر از ۴، و برای حالت کششی بیشتر از ۶ به‌دست آورده‌اند.^[۱] در فرمول‌بندی CEB-FIP تأثیر نرخ کرنش بر استحکام فشاری و کششی به‌طور جداگانه ارائه شده است.^[۲] براساس آزمایش‌های انجام‌شده برای میزان افزایش استحکام در نرخ کرنش‌های بین 10^{-1} تا 10^{-8} ، ضریب افزایش استحکام دینامیکی در نرخ

بررسی عکس‌العمل سازه‌های بتنی در برابر بارگذاری دینامیکی مورد توجه بسیاری از افراد در زمینه‌های مختلف نظامی و عمرانی است. پی‌بردن به عکس‌العمل سازه‌های بتنی در برابر بارگذاری حاصل از انفجار یا ضربه، برای نیل به تخریبی موفقیت‌آمیز، یا محافظت از سازه‌های مهم راهبردی و نظامی حائز اهمیت است. بارگذاری دینامیکی روی سازه‌های بتنی از پدیده‌هایی مثل زلزله یا امواج حاصل از دریاها و اقیانوس‌ها سرچشمه می‌گیرند که قابل توجه جدی هستند. شناسایی رفتار مواد بتنی تحت ضربه‌های ناشی از انفجار یا پدیده‌های طبیعی شرط لازم برای طراحی و تحلیل این سازه‌ها به‌شمار می‌رود.

وقتی که سازه‌ی بتنی تحت بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد پدیده‌ی ترک‌خوردگی، شکست، ترکش یا پودرشدن سازه اتفاق می‌افتد. تمامی این فرایندها می‌توانند به عکس‌العمل اولیه در محدوده‌ی کشسانی ماده، جریان خمیری، تشکیل ترک‌های ریز و درشت، خردشدن به تکه‌های کوچک و در نهایت به دانه‌دانه شدن یا پودرشدن سازه منجر شوند. عموماً قابلیت تحمل بار و انرژی جذب‌شده توسط سازه دستخوش بیان یک فرضیه یا تغییر شکل‌هایی در طول فرایند است. این فرضیه نقش مهمی

تاریخ: دریافت ۲۷/۱۳۸۶، داوری ۲۳/۱۳۸۶/۵، پذیرش ۲۳/۱۰/۱۳۸۶.

کرنش‌های بیان‌شده و در وضعیت بارگذاری فشاری برابر ۴ و در وضعیت کششی برابر ۶ است.^[۴] همچنین حالت شکست سازه از شکست خمشی در بارگذاری استاتیکی به شکست برشی یا ترکیبی از دو حالت نام برده شده، تغییر می‌کند.

در سال ۲۰۰۳، مدل‌سازی تأثیر نرخ کرنش برای حالت‌های بارگذاری دینامیکی فشاری و کششی مطرح شد که اساس کار در این حوزه مبتنی بر اثر جفت‌شوندگی بین دو مدل به نام‌های مدل ترک‌ها و مدل خمیرسانی بوده است.^[۵]

همچنین در سال ۲۰۰۴، محققین تحقیقاتی درخصوص تأثیر سرعت بارگذاری بر ترک‌های ایجادشده در بتن انجام داده‌اند که طی آن افزایش استحکام دینامیکی بتن در اثر ایجاد ضربه محاسبه شده است.^[۶] در سال ۲۰۰۴، رفتار بتن در برابر بارگذاری دینامیکی انفجاری مورد مطالعه قرار گرفت که طی این تحقیق مقادیر استحکام دینامیکی و سایر خواص وابسته به نرخ کرنش در بتن مدل‌سازی شده است.^[۷] این مدل براساس مکانیک شکست پیوسته و همچنین رشد ترک‌ها، و با تعریف پارامتر کمی D حاصل شده است. در همین سال، رفتار بتن در برابر نرخ کرنش‌های بالا و تأثیر آن بر استحکام کششی مورد مطالعه قرار گرفت.^[۸] مدل ارائه شده برای راه‌اندازی کد مورد نظر، مبتنی بر مدل ویسکوپلاستیک بود و در آن افزایش مقدار استحکام کششی دینامیکی نسبت به استحکام کششی استاتیکی به‌طور کامل نشان داده شد. همچنین حساس بودن استحکام کششی (در مقایسه با استحکام فشاری) نسبت به نرخ کرنش بیان شده است.

در سال ۲۰۰۶ نیز اندازه‌گیری استحکام کششی بتن همراه با مقدار انرژی مورد نیاز برای شکست انجام شد.^[۹] که نتایج به‌دست آمده برای مقادیر استحکام کششی در حالت دینامیکی با مقادیر حاصله از دیگر تحقیقات - از جمله تحقیقات لامبرت و رز - هم‌خوانی دارد.

یکی از عوامل تأثیرگذار بر رفتار ماده تحت شرایط دینامیکی «حساسیت به نرخ کرنش» است. با وجود کارهای انجام‌شده که اکثراً مدل‌سازی تأثیر نرخ بارگذاری بر روی سازه‌های بتنی بوده است، هنوز کارهای عملی و میدانی گسترده‌بی در جوامع علمی و در راستای تأثیر نرخ کرنش حاصل از انفجار بر روی سازه‌های بتنی صورت نگرفته است. برای رسیدن به یک شناخت واقعی و عملی از سازه‌های بتنی در برابر بارگذاری ضربه‌یی یا انفجاری، در اختیار داشتن اطلاعات تجربی برای پیاده‌سازی مدل‌های تحلیلی ضرورت دارد. در این تحقیق با استفاده از انفجار ماده‌ی منفجره و فشار ناشی از آن بر روی بلوک‌های بتنی که به‌صورت یک تیر ساده بر روی تکیه‌گاه‌های قابل تنظیم قرار گرفته‌اند، میزان استحکام کششی بتن با بهره‌گیری از روابط نظری به‌دست آمده و با نتایج حاصل از آزمایش استاتیکی مقایسه می‌شود. نسبت این دو استحکام نشان‌گر ضریب افزایش دینامیکی در حالت عملی خواهد بود. با در دست داشتن ضریب افزایش دینامیکی و نیز با محاسبه‌ی میزان نرخ کرنش، به‌مقایسه‌ی نتایج تجربی با نتایج مشابه که از بارگذاری دینامیکی بتن با روش‌های غیرانفجاری به‌دست آمده، خواهیم پرداخت.

۲. مواد بتنی

طرح اختلاط در بتن تهیه شده از توده‌سنگی ریزدانه است که از الک ۹/۵mm عبور داده شده است، به‌طوری‌که تمامی آن از الک نمره ۴ عبور کرده و روی الک نمره ۲۰۰ باقی می‌ماند. سیمان مصرفی از نوع II بوده که مقدار آن در اختلاط تهیه‌شده بین 55 Kg/m^3 تا 65 Kg/m^3 است. آب مصرفی با استفاده از فوق روان‌کننده‌ی نسل جدید Tricosal SF۳۴ آلمان، ۲ درصد وزن سیمان است. کسر

حجمی توده‌سنگ ریزدانه در بتن ۶۰ درصد است. نتایج حاصل از آزمایش‌های استاتیکی در جدول ۱ آورده شده است.

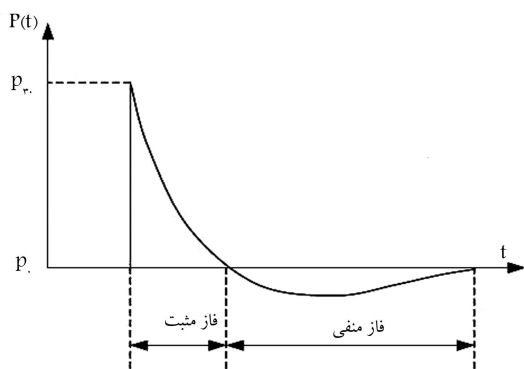
۳. بارگذاری انفجاری

عموماً اثرات ناشی از انفجار یک ماده‌ی منفجره با استفاده از دو عامل اصلی بیان می‌شود:^[۱۰] ۱. اندازه‌ی ماده‌ی منفجره یا (جرم ماده‌ی منفجره) که معمولاً با معادل‌سازی نسبت به ماده‌ی منفجره‌ی استاندارد مانند TNT قابل بیان است؛ ۲. فاصله‌ی بین ماده‌ی منفجره تا هدف. در اثر انفجار مقدار مشخصی از ماده‌ی منفجره در نزدیکی‌های زمین، مقدار قابل توجهی گاز با فشار بالا پدید می‌آید و باعث تغییراتی در محیط اطراف محل انفجار می‌شود که بالا رفتن دما و فشار به‌طور ناگهانی از جمله‌ی آثار آن است. با گذشت زمانی اندک، در فاصله‌ی مشخصی از محل انفجار، فشار آن محل به‌طور ناگهانی بالا می‌رود تا این‌که به‌نقطه‌ی اوج خود برسد. سپس رفته رفته فشار میرا شده و به‌فشار محیط، و حتی پایین تر از آن، نزول می‌کند. در شکل ۱ منحنی شماتیک فشار - زمان نشان داده شده، که در آن نزول فشار به‌فشار محیط به‌صورت یک منحنی نمایی قابل بیان است.

در این منحنی، منطقه‌ی را که در آن فشار بالا می‌رود و بعد به‌فشار محیط نزول می‌کند، منطقه‌ی فاز مثبت در نظر می‌گیرند؛ همچنین منطقه‌ی که در آن فشار به‌پایین تر از فشار محیط رسیده - و باعث ایجاد فشاری در راستای مخالف انتشار جبهه‌ی موج اولیه (فشار مکش) می‌شود - و سپس به‌فشار محیط بازمی‌گردد، منطقه‌ی فاز منفی می‌نامند. در انفجار از قانونی به‌نام قانون فاصله‌ی درجه‌بندی شده^۲ استفاده می‌کنند^[۱۰]، که برای پیدا کردن سایر پارامترها از این مقادیر استفاده می‌شود. روش معمول مقیاس‌گذاری انفجار روش هاپکینسون - کرانز یا ریشه سوم است که ابتدا توسط هاپکینسون در سال ۱۹۱۵، و سپس توسط کرانز در سال

جدول ۱. خواص مکانیکی طرح اختلاط‌های مختلف از بتن.

طرح اختلاط بتن	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کشسانی (GPa)
A	۴۵	۳/۶	۳۳
B	۵۳	۴	۳۶
C	۶۱	۴/۹۲	۳۹
D	۶۶	۵/۱	۴۰
E	۷۱	۵/۲۹	۴۲



شکل ۱. پارامترهای منحنی فشار - زمان حاصل از انفجار.^[۱۰]

در جدول ۲ نحوه‌ی انجام هر آزمایش آورده شده است. بر اثر انفجار، موج ناشی از انفجار به طرف سازه‌ی بتنی حرکت، و به آن برخورد می‌کند و موجب اعمال فشار بالایی به بتن می‌شود. این فشار در یک فاصله‌ی زمانی در حد میکروثانیه به بتن اعمال می‌شود. معیار اندازه‌گیری در این آزمایش‌ها ایجاد ترک در سطح پایینی بتن، یا همان بخش کششی سازه است. ماده‌ی منفجره درست در مرکز سطح بلوکه‌ی بتنی قرار داده می‌شود. ابتدا آزمایش‌های اولیه برای به دست آوردن محدوده‌ی عملکرد سازه در برابر جرم و ارتفاع‌های مختلف ماده منفجره انجام می‌شود. در آزمایش اول ماده‌ی منفجره‌ی به جرم ۱۰۰ گرم و در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری قرار داده شد؛ که بر اثر انفجار ماده‌ی بتنی به قطعات خیلی ریز تبدیل شد. در آزمایش‌های بعدی، جرم ماده از ۱۰۰ گرم به ۳۰ گرم کاهش یافت و در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری انفجار صورت گرفت (دهانه‌ی ترک در حدود ۰٫۷ میلی‌متر بوده است). بقیه‌ی آزمایش‌ها با توجه به استحکام کششی سازه طبق جدول ۲ انجام شد.

تمامی مقادیر ارائه شده در این جدول برای حالتی معتبر است که طبق معیار گفته شده در بالا، ترک ریز در منطقه‌ی کششی بتن ایجاد شود. به علت نزدیک بودن استحکام کششی بلوکه‌های بتنی نسبت به هم تقریباً تمامی آنها تحت فاصله‌ی درجه‌بندی شده یکسان ترک برمی‌دارند.

نتایج حاصل از سری اول آزمایش‌های انجام شده، بر روی تنوعی از بتن در جدول ۳ مشاهده می‌شود. برای به دست آوردن نتایج قابل قبول در این آزمایش‌ها،

جدول ۳. آزمایش‌های مربوط به سری اول.

شماره آزمایش	فاصله تکیه‌گاه‌ها (m)	فشار اوج P (MPa)	Z (m/Kg ^{1/2})	ماده منفجره		ملاحظات
				فاصله (m)	جرم (Kg)	
A-۴-۱	۰٫۲۴۵	۳	۰٫۵۸	۰٫۲	۰٫۰۳	Cr.
A-۴-۲	۰٫۲۴۵	۲٫۷۸	۰٫۶	۰٫۲۱	۰٫۰۳	Not Cr.
A-۴-۳	۰٫۲۴۵	۳٫۲۸	۰٫۵۵	۰٫۱۹	۰٫۰۳	Cr.
A-۳٫۵-۱	Back Support	۳	۰٫۵۸	۰٫۲	۰٫۰۳	Not Cr.
B-۵-۱	۰٫۲۴۵	۵٫۱۲	۰٫۴۳	۰٫۱۵	۰٫۰۳	Cr.
B-۵-۲	Back Support	۵	۰٫۴۳	۰٫۱۵	۰٫۰۳	Not Cr.
B-۵-۳	Back support	۱۰	۰٫۲۹	۰٫۱	۰٫۰۳	Not Cr.
B-۵-۴	Back Support	۱۱	۰٫۲۶	۰٫۱	۰٫۰۴	Cr.
C-۴-۱	۰٫۲۴۵	۳٫۹	۰٫۵۰	۰٫۱۷	۰٫۰۳	Not Cr.
C-۴-۲	۰٫۲۴۵	۳٫۵	۰٫۵۲	۰٫۱۸	۰٫۰۳	Cr.
C-۴-۳	۰٫۱۵	۱۱	۰٫۲۶	۰٫۰۹	۰٫۰۳	Not Cr.
C-۴-۴	۰٫۱۵	۱۰	۰٫۲۹	۰٫۱۰	۰٫۰۳	Cr.
D-۲-۱	۰٫۲۴۵	۳	۰٫۵۸	۰٫۳	۰٫۱	Destroyed
D-۴-۱	۰٫۲۴۵	۳٫۹	۰٫۵۰	۰٫۱۷	۰٫۰۳	Cr.
D-۵-۱	۰٫۱۵	۱۵٫۵	۰٫۲۰	۰٫۰۷	۰٫۰۳	Not Cr.
D-۵-۲	۰٫۱۵	۱۴٫۵	۰٫۲۱	۰٫۰۷۵	۰٫۰۳	Cr.
E-۵-۱	۰٫۲۴۵	۶	۰٫۳۷	۰٫۱۳	۰٫۰۲	Not Cr.
E-۵-۲	۰٫۲۴۵	۷٫۱	۰٫۳۵	۰٫۱۲	۰٫۰۳	Cr.
E-۵-۳	۰٫۲۴۵	۵٫۷۵	۰٫۴۰	۰٫۱۴	۰٫۰۳	Cr.
E-۴-۱	۰٫۱	۵	۰٫۴۳	۰٫۱۵	۰٫۰۳	Not Cr.
E-۳-۱	Back Support	۱۰	۰٫۲۹	۰٫۱	۰٫۰۳	Cr.

Cr. = ترک خورده = Not Cr. = بدون ترک = Destroyed = متلاشی شده.

۱۹۲۶ فرمول‌بندی شد. بر اساس این قانون امواج مشابه هم، در فواصل مقیاس‌گذاری شده‌ی مشابه، وقتی به وجود می‌آیند که دو شارژ انفجاری با هندسه و جنس مشابه - اما با اندازه‌های مختلف - در شرایط یکسان منفجر شوند. در این روش از پارامتر ابعادی $z = R/W^{1/2}$ به عنوان فاصله‌ی درجه‌بندی شده استفاده می‌شود که در آن R فاصله‌ی مرکز ماده‌ی منفجره تا سازه‌ی هدف برحسب متر، و W وزن ماده‌ی منفجره برحسب کیلوگرم است. مقدار فشار و ضربه‌ی آزاد شده از انفجار بر روی سازه با استفاده از فرمول‌های تجربی قابل محاسبه است که تمامی این فرمول‌ها بر اساس قانون فاصله‌ی درجه‌بندی شده به دست آمده‌اند. رابطه‌ی فشار بیشینه‌ی انفجار در فاصله‌ی مشخص از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید: [۱۰]

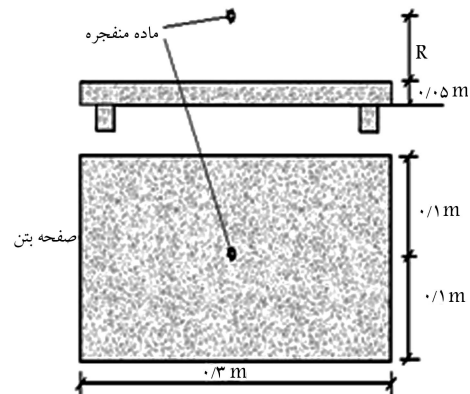
$$P^*/P_a = \frac{80.8 \left[1 + \left(\frac{z}{4.75} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{0.248} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{0.22} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{1.35} \right)^2}} \quad (1)$$

که در آن P^* فشار انفجار، و P_a فشار اتمسفر است.

۴. طراحی آزمایش‌ها

برای رسیدن به رفتار دینامیکی سازه در برابر نرخ کرنش‌های بالا، تعدادی آزمایش انفجار تحت شرایط معینی انجام می‌شود. نمونه‌های بتنی در ۵ اختلاط و در ابعاد $50 \times 200 \times 300 \text{ mm}^3$ بر روی یک پایه‌ی فلزی (شکل ۲) به صورت تیر ساده تحت آزمایش انفجار قرار داده می‌شود. در شکل ۲ نمونه‌ی از قرارگیری ماده‌ی منفجره نسبت به بلوکه‌ی بتنی ارائه شده است.

ماده منفجره از جنس C4 معادل ۱٫۳۷ برابر TNT دارای شکل کروی و از جرم‌های ۳۰ تا ۱۰۰ گرمی در ارتفاع ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متری از بتن قرار داده می‌شود.



شکل ۲. شمای بلوکه‌ی بتنی بر روی تکیه‌گاه‌های ساده.

جدول ۲. نحوه انجام آزمایش‌های بر روی بتن.

طرح اختلاط بتن	جرم ماده منفجره (Kg)	فاصله از سطح بتن (m)
A	۰٫۰۳	۰٫۱۴۵
B	۰٫۰۳	۰٫۱۵
C	۰٫۰۳	۰٫۱۳
D	۰٫۰۳	۰٫۱۲۵
E	۰٫۰۳	۰٫۱۲

استفاده از روابط استاتیکی و مقاومت مصالحی تیرها لازم است. هدف از این کار، به دست آوردن مقدار فشار لازم برای تخریب سازه در حالت استاتیکی و مقایسه‌ی آن با فشار دینامیکی حاصل از انفجار است و نتیجه‌ی آن پیدا کردن مقدار عددی ضریب افزایش دینامیکی در حالت کششی است.

فشار ناشی از انفجار مطابق منحنی ارائه شده در شکل ۳ بر روی سازه‌ی بتنی اعمال می‌شود که نتیجه‌ی آن معادله‌ی ۱ است، و بر اثر فرایند انفجار به وقوع می‌پیوندد. با داشتن این منحنی و اعمال آن بر روی سازه‌ی بتنی که مثل تیر با تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شده است، می‌توان مقدار استحکام کششی در حالت بارگذاری دینامیکی را معادل σ_{tdyn} تعیین کرد. از طرف دیگر اندازه‌ی استحکام کششی در حالت استاتیکی بتن معلوم است، و بنابراین با پیدا کردن نسبت استحکام کششی دینامیکی به استحکام کششی استاتیکی ضریب افزایش دینامیکی به دست می‌آید.

فرض می‌کنیم که فشار نامشخص P_{max} ، مانند منحنی شکل ۴ الف به صورت استاتیکی به سازه‌ی بتنی اعمال می‌شود. با توجه به معلوم بودن اندازه‌ی استحکام کششی، می‌توان مقدار بیشینه‌ی فشار لازم برای تخریب سازه را به دست آورد. با توجه به شکل ۴ ب، و با نوشتن روابط استاتیکی برای تیر اندازه‌ی گشتاور بیشینه

عبارت خواهد بود از:

$$R_A = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^L \frac{\sqrt{2} P_{max}}{L} \cdot \frac{B}{L} x^{\sqrt{2}} dx \quad (2)$$

$$M_{max} = R_A \cdot \frac{L}{\sqrt{2}} - \left(\int_0^{L/\sqrt{2}} \frac{\sqrt{2} P_{max}}{L} \cdot \frac{B}{L} x^{\sqrt{2}} dx \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} L \quad (3)$$

که در آن M_x گشتاور در فاصله‌ی x از سمت چپ تیر، L طول تیر، B عرض تیر، R_A عکس‌العمل تکیه‌گاه، و x فاصله‌ی برش‌خورده برای جدا کردن عضو است. با جایگزینی:

$$L = 0.3 \text{ m}$$

$$B = 0.2 \text{ m}$$

$$x = 0.15 \text{ m}$$

در روابط ۲ و ۳ مقادیر R_A و M_x چنین به دست می‌آیند:

$$R_A = 5 \times 10^{-2} \cdot P_{max} \quad (4)$$

$$M_x = 0.25 \times 10^{-2} \cdot P_{max} \quad (5)$$

برای به دست آوردن بیشینه‌ی تنش کششی در سطح مقطع تیر نیز از رابطه‌ی ۶ استفاده می‌کنیم:

$$\sigma = \frac{M_x C}{I} \quad (6)$$

که در آن C بیشینه‌ی ارتفاع از محور خنثای سطح مقطع تیر، و I گشتاور دوم سطح مقطع تیر حول محور خنثی است. در تیر مورد نظر $C = \frac{h}{\sqrt{2}}$ نصف ضخامت تیر را تشکیل می‌دهد. همچنین $I = \frac{B \cdot h^3}{12}$ که h ضخامت تیر است. با جایگذاری این مقادیر در رابطه‌ی ۶ خواهیم داشت:

$$\sigma = \frac{6 \times 0.25 \times 10^{-2} \cdot P_{max}}{0.2 \times h^2} = 7.5 \times 10^{-2} \cdot \frac{P_{max}}{h^2} \quad (7)$$

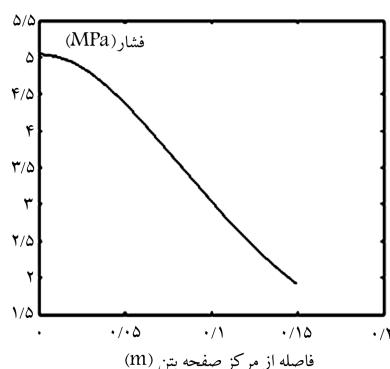
ضخامت تیر در این آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰٫۰۵ متر است. اکنون با دسترسی به روابط فوق می‌توان مقدار بار مورد نیاز برای ترک خوردن تیر در منطقه‌ی کششی را محاسبه کرد. اگر $\sigma = 4 \text{ MPa}$ باشد آنگاه $P_{max} \approx 1 \text{ MPa}$. از سوی دیگر، فشار بیشینه‌ی حاصل از آزمایش دینامیکی برای ترک برداشتن بتن ($P_{max Dyn}$) معادل ۵٫۱۲ مگاپاسکال به دست آمده است. از تقسیم بار دینامیکی به بار استاتیکی، ضریب افزایش دینامیکی^۳ (DIF) حاصل می‌شود^[۱] و داریم:

$$DIF = \frac{5.12}{1} = 5.12$$

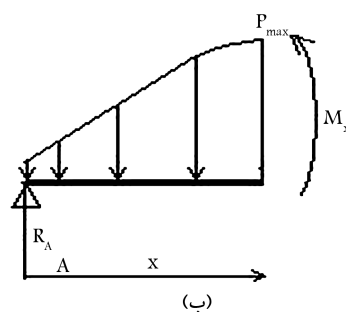
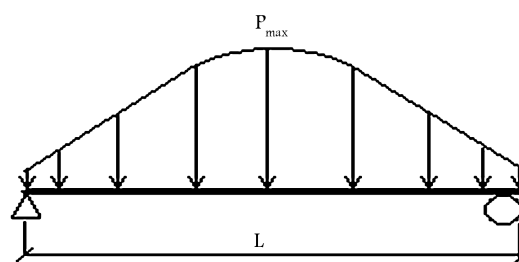
با استناد به فرمول‌بندی ارائه‌شده توسط محققین^[۱]، نرخ کرنش از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

$$DIF = f_t / f_{ts} = \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1/3} \quad (8)$$

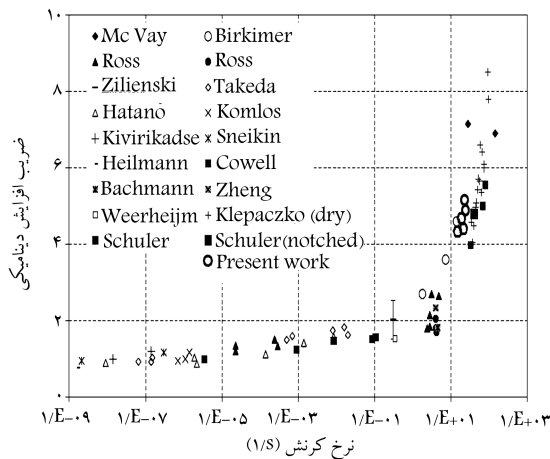
که در آن f_t استحکام کششی دینامیکی در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ ، f_{ts} استحکام کششی استاتیکی در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}_s$ ، f_t / f_{ts} ضریب افزایش دینامیکی استحکام کششی،



شکل ۳. نمونه‌ی از منحنی فشار انفجار بر حسب فاصله از مرکز سازه بتنی در جهت ضلع بزرگ.



شکل ۴. شمایی از بارگذاری استاتیکی بر روی سازه‌ی بتنی.



شکل ۵. مقایسه‌ی ضریب افزایش دینامیکی حاصل از آزمایش‌های انجام شده با نتایج کارهای قبلی.

۶. نحوه‌ی ارائه‌ی مدل ریاضی براساس داده‌های

آزمایش‌های انجام شده

روش طراحی آزمایشات (DOE)، مشتمل بر شیوه‌های آماری است که در آن تعدادی آزمایش با شرایط تعیین شده در فرایند طراحی انجام می‌شود و در نتیجه مناسب‌ترین ورودی‌های فرایند، در راستای به دست آوردن خروجی مورد نظر تنظیم می‌شود. برای به دست آوردن و تنظیم پارامترهای مهم و تنظیم ضرایب مرتبط با فشار وارده بر سازه از نسخه‌ی ۱۳ نرم‌افزار آماری Minitab ver.۱۳ استفاده شد و در نهایت مدل رگرسیون خطی برای فاصله‌ی مقیاس بندی شده ارائه شد. برای ارائه‌ی یک مدل رفتاری، مجموعه‌ی بیشتری از داده‌ها مورد نیاز است، و لذا آزمایش‌های مجزا طراحی و انجام شد.

آزمایش‌ها سری دوم به دو گروه تقسیم شده‌اند. گروه اول آزمایش‌ها برای تحلیل با نرم‌افزار آماری MINITAB، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها طراحی شد و حاصل تحلیل آن یک مدل آماری براساس ورودی‌های داده شده به نرم‌افزار بود. در گام بعدی، گروه دوم آزمایش‌ها برای پی بردن به صحت مدل ارائه شده توسط نرم‌افزار MINITAB انجام شد. در جداول ۵ و ۶ آزمایش‌های مربوط به گروه اول و گروه دوم از سری دوم آزمایش‌ها آورده شده است.

۷. نتایج و بحث

۱.۷. تحلیل نتایج حاصل از نرم‌افزار MINITAB در آزمایش‌های

سری اول

از آنجاکه آزمایش‌های سری اول به منظور به دست آوردن محدوده‌ی عملکرد ماده‌ی منفجره در فاصله‌های مشخص انجام شده بود، طراحی آنها براساس اصل طراحی آزمایش‌ها صورت نگرفته بود، و لذا باید داده‌ها طبق روش طراحی نشده‌ی آزمایش‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. پارامترهای ورودی در این آزمایش‌ها - تنش کششی سازه‌ی بنتی (σ_p^0)، ضخامت (t) و فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها (S) - در برابر پارامتر خروجی به نام فاصله‌ی مقیاس بندی شده (z) مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج تحلیل‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. معادله‌ی حاصل از تحلیل‌های انجام شده توسط نرم‌افزار

جدول ۴. مقایسه بین نتایج استاتیکی و دینامیکی.

طرح اختلاط	فشار استاتیکی	Z	فشار انفجار	نرخ کرنش	DIF
	$P_s (MPa)$	$(m/kg^{1/3})$	$P_{dyn.} (MPa)$	$\dot{\epsilon} (s^{-1})$	$\frac{P_{dyn.}}{P_s}$
A	۰٫۹۶	۰٫۴۲	۵٫۲۸	۸۰	۵٫۵
B	۱	۰٫۴۳	۵٫۱۲	۶۴٫۸	۵٫۱۲
C	۱٫۲	۰٫۳۸	۶٫۱۶	۶۵٫۲	۵٫۱۳
D	۱٫۳	۰٫۳۶	۶٫۷	۶۶	۵٫۱۵
E	۱٫۴۱	۰٫۳۵	۷٫۱	۶۶٫۷	۵٫۱۷

$\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش در محدوده‌ی 10^{-6} تا $160 s^{-1}$ ، و $\dot{\epsilon}_s$ نرخ کرنش استاتیکی است.

$$10^{-6} s^{-1}$$

$$\log \beta = 6\delta - 2$$

$$f_{cs} = 53 MPa \text{ که } \delta = 1 / (1 + 8 f_{cs} / f_{co})$$

$$f_{co} = 10 MPa = 1450 Psi$$

مطابق رابطه‌ی بالا مقدار نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 64 s^{-1}$ محاسبه می‌شود.

اما اگر $\sigma = 5 MPa$ ، $P_{max} \approx 13 MPa$ محاسبه می‌شود و در نتیجه فشار بیشینه‌ی حاصل از آزمایش دینامیکی برای ترک برداشتن بتن $P_{max Dyn.}$ برابر با ۶٫۷ مگاپاسکال حساب می‌شود؛ لذا با تقسیم بار دینامیکی به بار استاتیکی، مقدار عددی ضریب افزایش دینامیکی (DIF) حاصل می‌شود و داریم:

$$DIF = \frac{6.7}{1.3} = 5.15$$

نرخ کرنش نیز $\dot{\epsilon} = 66 s^{-1}$ خواهد بود. در جدول ۴ مجموعه‌ی نتایج حاصله برای اختلاط‌های مورد استفاده در آزمایش ارائه شده است. در این جدول مقادیر ضریب افزایش دینامیکی محاسبه و برای آزمایش‌های مختلف درج شده است.

۵. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با تحقیقات قبلی

نتایج حاصله از آزمایش‌ها در اثر بارگذاری انفجاری با نرخ کرنش‌های $80 - 65 s^{-1}$ باعث افزایش ضریب افزایش دینامیکی به اندازه‌ی $4.5 - 6$ شده است. در این آزمایش‌ها استحکام کششی بتن در حالت استاتیکی بین ۳٫۶ تا ۵ مگاپاسکال بود. مقایسه‌ی نتایج این آزمایش‌ها با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده توسط محققین^[۹] حاکی از مطابقت آنها با هم دارد.

همچنین نمودارهای حاصل از مدل‌سازی‌های انجام شده‌ی پیشین^[۷] با نتایج آزمایش‌های این پژوهش منطبق است، که میزان ضریب افزایش دینامیکی در بارگذاری کششی برای نرخ کرنش $80 s^{-1}$ برابر با ۵٫۵ به دست آمده است. از طرف دیگر، نرخ کرنش‌های حاصل از آزمایش‌ها براساس مدل ارائه شده توسط مالوار^[۹] به دست آورده شده است. هماهنگ بودن این مدل با سایر کارهای تجربی، گواهی بر صحت مدل ارائه شده توسط مالوار است. در شکل ۵ مقایسه‌ی کار انجام شده با نتایج کارهای قبلی آورده شده است.

جدول ۵. آزمایش های سری دوم گروه اول.

ملاحظات	فشار اوج P (MPa)	Z (m/kg ^{1/2})	فاصله	ماده	آزمایش
			تکیه‌گاه‌ها (m)	منفجره (kg)	
Cr.	۳٫۵	۰٫۵۲	۰٫۲۴۵	۰٫۲	T-۴٫۵-۱
Cr.	۳٫۹	۰٫۵	۰٫۲۴۵	۰٫۱۷	T-۴٫۵-۲
Cr.	۳٫۳	۰٫۵۴	۰٫۲۴۵	۰٫۱۸۵	T-۴٫۵-۳
Cr.	۱۰٫۲	۰٫۲۸	۰٫۱۵	۱۰	T-۴٫۵-۴
Cr.	۹	۰٫۳۰	۰٫۱۵	۱۱	T-۴٫۵-۵
Cr.	۸	۰٫۳۲	۰٫۱۵	۱۲	T-۴٫۵-۶
Cr.	۱۶	۰٫۷۸	۰٫۲۴۵	۰٫۲۷	T-۳-۷
Cr.	۱۵٫۵	۰٫۸	۰٫۲۴۵	۰٫۲۷۵	T-۳-۸
Cr.	۱۹	۰٫۷۴	۰٫۲۴۵	۰٫۲۵۵	T-۳-۹
Cr.	۵	۰٫۴۳	۰٫۱۵	۰٫۱۵	T-۳-۱۰
Cr.	۴٫۲	۰٫۴۷	۰٫۱۵	۰٫۱۶	T-۳-۱۱
Cr.	۴٫۷	۰٫۴۵	۰٫۱۵	۰٫۱۷	T-۳-۱۲
Not Cr.	۲٫۵	۰٫۶۴	۰٫۲۴۵	۰٫۲۲	T-۴٫۵-۱۳
Dis.	۵	۰٫۴۳	۰٫۲۴۵	۰٫۱۵۵	T-۴٫۵-۱۴
Not Cr.	۵٫۷	۰٫۴	۰٫۱۵	۰٫۱۴	T-۴٫۵-۱۵
Dis.	۱۴	۰٫۲۲	۰٫۱۵	۰٫۰۸	T-۴٫۵-۱۶

جدول ۶. آزمایش های سری دوم گروه دوم.

ملاحظات	فشار اوج P (Mpa)	Z (m/kg ^{1/2})	فاصله	ماده	آزمایش
			تکیه‌گاه‌ها (m)	منفجره (kg)	
Cr.	۲٫۷۸	۰٫۶	۰٫۲۴۵	۰٫۲۱	T-۳٫۵-۲
Cr.	۲٫۴۵	۰٫۶۳	۰٫۲۴۵	۰٫۲۲	T-۳٫۵-۳
Cr.	۶	۰٫۳۷	۰٫۱۵	۰٫۱۲۵	T-۳٫۵-۴
Cr.	۷٫۱	۰٫۳۵	۰٫۱۵	۰٫۱۱۵	T-۳٫۵-۵
Cr.	۶	۰٫۳۸	۰٫۱۵	۰٫۱۳	T-۳٫۵-۶
Not Cr.	۱۹	۰٫۷۱	۰٫۲۴۵	۰٫۲۴۵	T-۳٫۵-۷
Not Cr.	۲۲	۰٫۶۸	۰٫۲۴۵	۰٫۲۳۵	T-۳٫۵-۸
Dis.	۱۰	۰٫۲۸	۰٫۱۵	۰٫۱	T-۳٫۵-۹

جدول ۷. نتایج تحلیل آزمایش های سری اول به وسیله نرم افزار MINITAB.

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	۰٫۷۸۰۴۶	۰٫۰۹۲۰۳	۸٫۴۸	۰٫۰۰۰
sigma	-۰٫۰۹۷۱	۰٫۰۱۹۶۷	-۴٫۹۴	۰٫۰۰۱
span	۲٫۲۳۰۸	۰٫۱۴۶۹	۱۵٫۱۸	۰٫۰۰۰
t	-۸٫۶۵۷	۱٫۵۱۶	-۵٫۷۱	۰٫۰۰۰
S=۰٫۲۲۹۲		R-Sq=٪۹۷٫۸		R-Sq(adj)=٪۹۷٫۱

برای به دست آوردن بهترین منحنی عبوری از میان داده عبارت است از:

$$z = 0.780 - 0.0971\sigma_y^t + 2.23S - 8.66 \quad (9)$$

که در آن t ضخامت سازه، S فاصله ی تکیه‌گاه‌ها σ_y^t ، تنش کششی سازه و z فاصله ی مقیاس بندی شده است. ستون آخر جدول ۷ که با حرف P نشان داده شده است معیاری برای سنجش میزان اثر هر کدام از ضرایب با احتمال ۹۵ درصد است که عدد کوچک تر بیان کننده ی شدت اثر آن ضریب است.

نتایج حاصله نشان می دهند که تأثیر تنش کششی بر روی مقدار نیروی مورد نیاز برای ترک خوردن سازه کم است، زیرا ضریب تنش کششی کم تر است ولی فاصله ی بین تکیه‌گاه‌ها و ضخامت سازه بیشترین تأثیر را دارد. بنابراین تصمیم بر آن است که با استفاده از دو پارامتر «فاصله ی بین تکیه‌گاه‌ها» و «ضخامت سازه»، و نیز با استفاده از روش طراحی آزمایش ها به تحلیل ضرایب مؤثر در آزمایش های سری دوم بپردازیم.

۲.۷. تحلیل نتایج حاصل از نرم افزار MINITAB آزمایش های

سری دوم با نقاط میانگین

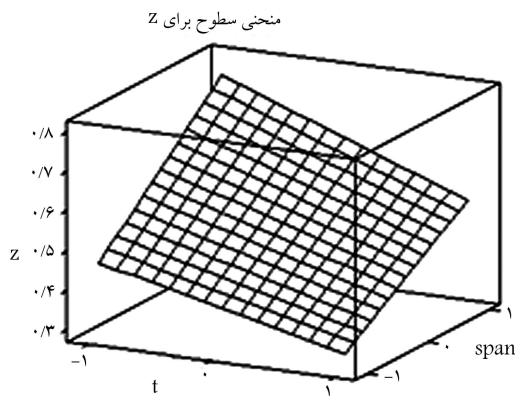
این آزمایش ها ابتدا به وسیله ی قراردادن نقاط میانگین به منظور بررسی خطی یا غیرخطی بودن منحنی عبوری از داده‌ها، تحلیل می شود. در جدول ۸ نتایج حاصله از نرم افزار آورده شده است.

۱. چنان که مشاهده می شود، درجه ی دوم بودن منحنی عبوری از داده‌ها رد می شود زیرا $P=0.592$ مربوط به انحنای خیلی بزرگ است.

جدول ۸. نتایج تحلیل آزمایش های سری دوم با در نظر گرفتن نقطه ی مرکزی.

(۱)						
Term	Effect	oeF	SE Coef	T	P	
Constant		۰٫۵۲۳۳۳	۰٫۱۰۹۰	۴٫۸۰۲	۰٫۰۰۰	
span	-۰٫۱۹۰۰۰	-۰٫۰۹۵۰۰	۰٫۱۰۹۰	-۸٫۷۲	۰٫۰۰۰	
t	۰٫۲۶۶۶۷	۰٫۱۳۳۳۳	۰٫۱۰۹۰	۱۲٫۲۴	۰٫۰۰۰	
Span×t	-۰٫۰۴۳۳۳	-۰٫۰۲۱۶۷	۰٫۱۰۹۰	-۱٫۹۹	۰٫۰۷۲	
Ct Pt		-۰٫۰۴۵۸۳	۰٫۰۲۱۷۹	-۲٫۱۰	۰٫۰۵۹۲	

(۲)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	۲	۰٫۳۲۱۶۳۳	۰٫۳۲۱۶۳۳	۰٫۱۶۰۸۱۷	۱۱۲٫۸۵	۰٫۰۰۰
۲-Way Interactions	۱	۰٫۰۰۰۵۶۳۳	۰٫۰۰۰۵۶۳۳	۰٫۰۰۰۵۶۳۳	۳٫۹۵	۰٫۰۷۲
Curvature	۱	۰٫۰۰۰۶۳	۰٫۰۰۰۶۳۰۲	۰٫۰۰۰۶۳۰۲	۴٫۴۲	۰٫۰۵۹۲
Residual Error	۱۱	۰٫۰۱۵۶	۰٫۰۱۵۶۷۵	۰٫۰۰۱۴۲۵		
Pure Error	۱۱	۰٫۰۱۵۶۷	۰٫۰۱۵۶۷۵	۰٫۰۰۱۴۲۵		
Total	۱۵	۰٫۳۴۹۲۴۴				



شکل ۹. غیر مؤثر بودن اثر دو عامل به علت تخت بودن رویه‌ی حاصل.

چنان که پیش‌تر اشاره شد، تنش کششی بتن در مدل ارائه شده در رابطه‌ی ۹ کم‌ترین تأثیر را دارد. به همین دلیل آزمایش‌های سری دوم بدون در نظر گرفتن تنش کششی بتن مدل‌سازی شده‌اند و مدل حاصل از نرم‌افزار، که در آن ضرایب هرکدام از فاکتورها آورده شده، عبارت است از:

$$z = 0,52333 + 0,13333s - 0,09500t - 0,02167 \times s \quad (10)$$

۵. با افزایش ضخامت t ، فشار لازم برای تخریب سازه افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر z کاهش می‌یابد زیرا علامت ضریب ضخامت منفی است (شکل ۸).

۶. افزایش فاصله بین تکیه‌گاه‌ها (s) منجر به افزایش z می‌شود، زیرا علامت ضریب فاصله بین تکیه‌گاه‌ها مثبت است (شکل ۸).

۷. اثر تعامل دو ضریب ضخامت و فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها خیلی کم است (شکل ۹).

۳.۷. تأیید مدل ناشی از تحلیل نرم‌افزار

مقایسه‌ی آزمایش‌های گروه دوم از سری دوم آزمایش‌ها بر روی مدل حاصل از نرم‌افزار، درصد خطای مدل را با آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد. نتایج این بررسی در جدول ۹ آورده شده است. با توجه به جدول ۱۰ درصد خطای بین مدل و آزمایش‌های تجربی بین ۹/۵ تا ۲۰ درصد محاسبه شده است که متوسط درصد

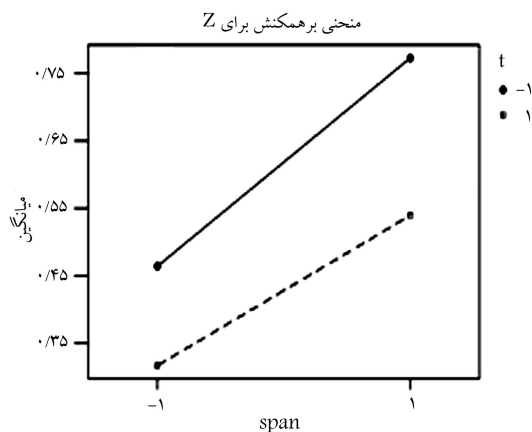
جدول ۹. مقایسه‌ی بین داده‌های تجربی و مدل حاصل از نرم‌افزار MINITAB.

درصد خطا	Z (تجربی) ($m/kg^{1/3}$)	Z (مدل) ($m/kg^{1/3}$)	فاصله تکیه‌گاه‌ها (m)	فاصله تکیه‌گاه‌ها (S)	ماده منفجره (Kg)	آزمایش
۲۰	۰,۵۷	۰,۶۹	۰,۱۹۵	۰,۲۴۵	۰,۰۳	T-۳,۵-۱
۱۵	۰,۶	۰,۶۹	۰,۲۱	۰,۲۴۵	۰,۰۳	T-۳,۵-۲
۹,۵	۰,۶۳	۰,۶۹	۰,۲۲	۰,۲۴۵	۰,۰۳	T-۳,۵-۳
۱۳,۵	۰,۳۷	۰,۴۲	۰,۱۲۵	۰,۱۵	۰,۰۳	T-۳,۵-۴
۲۰	۰,۳۵	۰,۴۲	۰,۱۲	۰,۱۵	۰,۰۳	T-۳,۵-۵
۱۰	۰,۳۸	۰,۴۲	۰,۱۳	۰,۱۵	۰,۰۳	T-۳,۵-۶

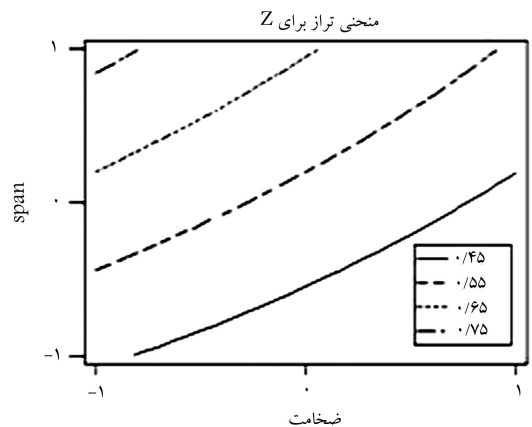
۲. فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها و ضخامت سازه با احتمال ۹۵ درصد بر میزان فشار وارده بر سازه تأثیر دارند و اثر تعامل آنها کم‌تر تأثیرگذار است.

۳. تعامل اثر دو ضریب بر یکدیگر خیلی کم است. این ادعا با داشتن مقدار $P=0,072$ برای اثر دو ضریب ثابت می‌شود. همچنین شکل‌های ۷، ۶ و ۸ نشان می‌دهند که خطوط تقریباً موازی حرکت کرده‌اند و در محدوده‌ی تعریف شده اثر دو ضریب نسبت به هم کم است. ضریب معادله‌ی مربوط به اثر دو ضریب چنان که در ستون سوم از جدول ۸ نشان داده شده است $t \times span$ برابر با $-0,02167$ است.

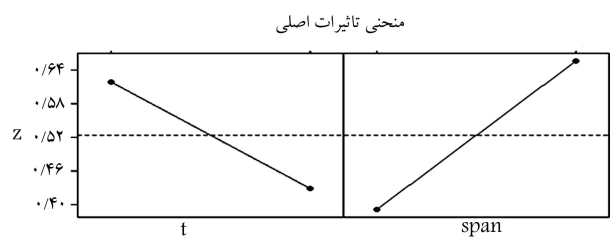
۴. در شکل ۷ مؤثر بودن ضخامت و فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها، علاوه بر آن که در جدول ۸ نشان داده شده است، تأیید می‌شود.



شکل ۶. غیر مؤثر بودن اثر دو عامل.



شکل ۷. کم‌تر مؤثر بودن اثر دو عامل به علت نزدیک بودن منحنی‌ها به خط راست.



شکل ۸. تأثیر هرکدام از ضرایب‌ها.

خطا برابر با ۱۵ درصد خواهد بود. این درصد خطا قابل پذیرش است و می‌تواند خیلی خوب با مدل حاصل از نرم‌افزار مطابقت داشته باشد.

۴.۷. محاسبه‌ی ضریب افزایش دینامیکی (DIF)

با توجه به مقدار فشار استاتیکی در سازه‌های بتنی و مقدار فشار ناشی از انفجار برای تخریب سازه، نسبت بین فشارهای انفجاری به فشار استاتیکی بیان‌گر ضریب افزایش دینامیکی در سازه خواهد بود. در جدول ۱۰ این ضریب محاسبه شده، و در نمودار شکل ۱۰ تأثیر ضخامت و فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها بر روی مقادیر ضریب افزایش دینامیکی نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت و کاهش فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها ضریب افزایش دینامیکی کاهش می‌یابد.

جدول ۱۰. محاسبه‌ی ضریب افزایش دینامیکی در سازه‌ی بتنی.

آزمایش	فاصله تکیه‌گاه‌ها	Z	فشار استاتیکی	فشار انفجار (MPa)	DIF=
		(m/kg ^{1/2})	P _{Sta.} = (MPa)	P _{Dyn.} = (MPa)	$\frac{P_{Dyn.}}{P_{Sta.}}$
T-۴/۶-۱	۰٫۲۴۵	۰٫۵۲	۰٫۷۵	۳٫۷	۴٫۹
T-۴/۵-۲	۰٫۲۴۵	۰٫۵	۰٫۷۵	۳٫۹	۵٫۲
T-۴/۵-۳	۰٫۲۴۵	۰٫۵۴	۰٫۷۵	۳٫۳۵	۴٫۴۷
T-۴/۵-۴	۰٫۱۵	۰٫۲۸	۲٫۱۶	۱۰٫۵	۴٫۸۶
T-۴/۵-۵	۰٫۱۵	۰٫۳۰	۲٫۱۶	۹	۴٫۲
T-۴/۵-۶	۰٫۱۵	۰٫۳۲	۲٫۱۶	۸٫۵	۴
T-۳-۷	۰٫۲۴۵	۰٫۷۸	۰٫۳۳	۱٫۸	۵٫۴۵
T-۳-۸	۰٫۲۴۵	۰٫۸	۰٫۳۳	۱٫۵۷	۴٫۷۵
T-۳-۹	۰٫۲۴۵	۰٫۷۴	۰٫۳۳	۱٫۹۵	۵٫۹
T-۳-۱۰	۰٫۱۵	۰٫۴۳	۰٫۹۶	۵	۵٫۲
T-۳-۱۱	۰٫۱۵	۰٫۴۷	۰٫۹۶	۴٫۳	۴٫۴۸
T-۳-۱۲	۰٫۱۵	۰٫۴۵	۰٫۹۶	۴٫۷	۴٫۹

۵.۷. محاسبه‌ی نرخ کرنش برای سازه‌های بتنی

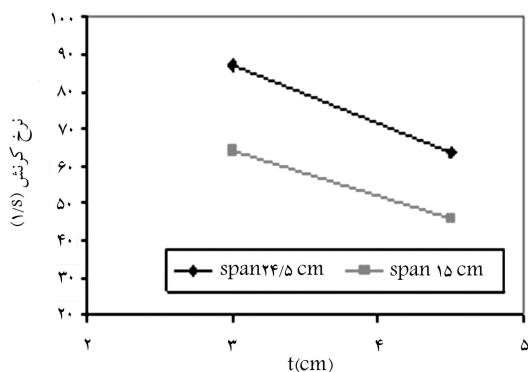
نرخ کرنش به‌عنوان عامل مؤثر در رفتار دینامیکی سازه‌ها و تغییر خواص مکانیکی مواد مطرح است و افزایش آن باعث افزایش حد تسلیم ماده و برخی خواص مکانیکی مربوط به ماده می‌شود. در جدول ۱۱ نرخ کرنش مربوط به هر آزمایش داده شده، و نتایج تحلیل‌ها نیز در نمودار شکل ۱۱ ارائه شده است. نمودار شکل ۱۱ نشان‌گر تأثیر ضخامت و فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها بر میزان نرخ کرنش است. با افزایش ضخامت و کاهش فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها، نرخ کرنش کاهش می‌یابد. مقادیر نرخ کرنش برای منطقه‌ی کششی، تقریباً نزدیک به نتایج حاصل از یافته‌های قبلی است. دلیل کاهش نرخ کرنش در اثر افزایش ضخامت، بالا رفتن زمان لازم برای گسیختگی در منطقه‌ی کششی است.

۶.۷. رابطه‌ی بین نرخ کرنش و ضریب افزایش دینامیکی

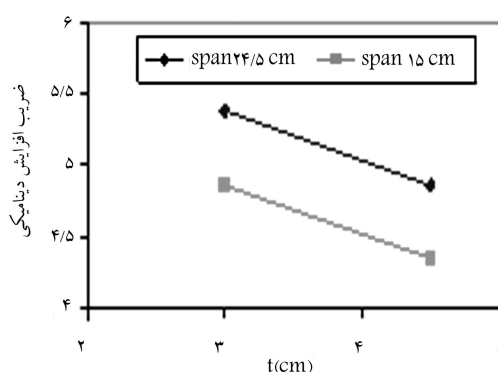
در بیشتر منابع معتبر، تأثیر نرخ کرنش بر ضریب افزایش دینامیکی به‌صورت نمودارهایی بیان شده است. در این قسمت ضمن مقایسه‌ی این دو پارامتر، نتایج حاصله از این

جدول ۱۱. نحوه محاسبه نرخ کرنش برای سازه‌های بتنی.

آزمایش	فاصله تکیه‌گاه‌ها (m)	Z (m/kg ^{1/2})	DIF= $\frac{P_{Dyn.}}{P_{Sta.}}$	$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_s (DIF/\beta)^3$
				۶۴
T-۴/۵-۱	۰٫۲۴۵	۰٫۵۲	۴٫۹	۶۴
T-۴/۵-۲	۰٫۲۴۵	۰٫۵	۵٫۲	۷۷٫۴
T-۴/۵-۳	۰٫۲۴۵	۰٫۵۴	۴٫۴۷	۴۹
T-۴/۵-۴	۰٫۱۵	۰٫۲۸	۴٫۸۶	۶۳
T-۴/۵-۵	۰٫۱۵	۰٫۳۰	۴٫۲	۴۰
T-۴/۵-۶	۰٫۱۵	۰٫۳۲	۴	۳۵
T-۳-۷	۰٫۲۴۵	۰٫۷۸	۵٫۴۵	۸۹
T-۳-۸	۰٫۲۴۵	۰٫۸	۴٫۷۵	۵۹
T-۳-۹	۰٫۲۴۵	۰٫۷۴	۵٫۹	۱۱۳
T-۳-۱۰	۰٫۱۵	۰٫۴۳	۵٫۲	۷۷٫۴
T-۳-۱۱	۰٫۱۵	۰٫۴۷	۴٫۴۸	۵۰
T-۳-۱۲	۰٫۱۵	۰٫۴۵	۴٫۹	۶۴٫۸

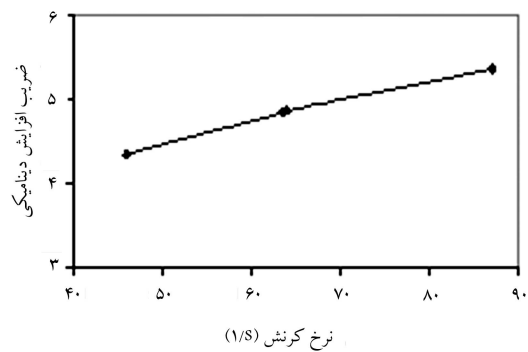


شکل ۱۱. تأثیر ضخامت و فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها بر نرخ کرنش.



شکل ۱۰. تأثیر ضخامت و فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها بر روی ضریب افزایش دینامیکی.

حد تسلیم کششی بین ۴ تا ۵/۵ به دست آمده است. این نتیجه با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده‌ی قبلی مطابقت دارد [۱۹]. با مطالعات انجام گرفته در مورد نمودارهای ضریب افزایش دینامیکی بر حسب نرخ کرنش، نتایج حاصل از نمودار شکل ۱۲ نیز می‌تواند به عنوان یکی از نقاط جدید در آن نمودارها اضافه شود.



شکل ۱۲. رابطه بین نرخ کرنش و ضریب افزایش دینامیکی.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار سازه‌های بتنی، تحت شرایط بارگذاری دینامیکی و شبه استاتیکی، مورد مقایسه قرار گرفته و تفاوت‌های حاصله در آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در اثر بارگذاری انفجاری میزان استحکام کششی ماده، برای نرخ کرنش‌های $66 s^{-1}$ و $80 s^{-1}$ ، بین ۴/۵ تا ۶ افزایش یافته است. وجود چنین رفتاری در بتن در حالت دینامیکی، به علت تبدیل شدن ترک‌های منفرد به ترک‌های گروهی است که باعث بالارفتن میزان انرژی لازم برای تخریب ماده می‌شوند. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش در خصوص بتن، می‌توان از این اطلاعات برای طراحی سازه‌های مهم راهبردی و بناهای مهم از جمله سدها، پل‌ها و... استفاده کرد.

تحقیق با آخرین نمودار ارائه شده توسط شولر [۱۷] مقایسه خواهد شد. چنان که در نمودار شکل‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود، با افزایش نرخ کرنش ضریب افزایش دینامیکی در حالت کششی افزایش یافته است. به عبارت دیگر افزایش نرخ کرنش ممکن است با بالا رفتن تنش تسلیم ماده همراه باشد. برای سازه‌ی بتنی در منطقه‌ی کششی افزایش

پانویس

1. design of experiments
2. scaled distance
3. dynamic increase factor

منابع

1. Lambert, David E., and Ross, C. Allen. "Strain rate effects on dynamic fracture and strength", *International Journal of Impact Engineering*, **24**, pp. 985-998 (2000).
2. Malvar, L.; Javier, C., and John E. "Dynamic increase factors for concrete", Twenty-Eighth DDESB Seminar, Orlando, FL (August 1998).
3. Ngo, T.D.; Mendis, P.A.; Teo, D., and Kusuma, G. "Behavior of high-strength concrete columns subjected to blast loading", University of Melbourne Australia (1999).
4. Grote, D.L.; Park, S.W., and Zhou, M. "Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. numerical simulation", *International Journal of Impact Engineering*, **25**, pp. 869-886 (2001).
5. Ragueneau, F., and Gatuingt, F. "Inelastic behavior modeling of concrete in low and high strain rate dynamics," *Computers and Structures*, **81**, pp. 1287-1299 (2003).
6. Sukontasukkul, P.; Nimityongskul, P., and Mindess, S." Effect of loading rate on damage of concrete", *Cement and Concrete Research*, **34**, pp. 2127-2134 (2004).
7. Lu, Y., and Xu, K. "Modeling of dynamic behavior of concrete materials under blast loading", *International Journal of Solids and Structures*, **41**, pp. 131-143 (2004).
8. Barpi, F. "Impact behaviour of concrete: a computational approach", *Engineering Fracture Mechanics*, **71**, pp. 2197-2213 (2004).
9. Schuler, H.; Mayrhofer, C., and Thoma, K. "Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates", *International Journal of Impact Engineering*, **32**, (10), pp. 1635-1650 (2006).
10. Kinney, Gilbert F., and Graham, Kenneth J., "Explosive shocks in air", Second Edition, Springer-verlag, New York (1985).