نشریه علمی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال سیزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱؛ ص ۲۴۹- ۲۳۹

علمی - پژوهشی

ارزیابی پاسخ و سختی دال دوطرفه بتن مسلح در برابر انفجار به کمک روش الگوریتم ژنتیک و سطح پاسخ

سید احمد حسینی[۱*]، علی فروغی[۲]، سجاد پیمانی فروشانی[۳]

۱- استادیار، ۲- و ۳- کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵)

چکیده

در تحلیل متعارف دال‌های بتن مسلح تحت بار انفجار لازم است یک‌روند طولانی طی شود. این روند علاوه بر زمان‌بر بودن، میزان تأثیر پارامترهای هندسی دال و بارگذاری را بر پاسخ سازه مشخص نمی‌کند. برای غلبه بر این مشکل، در این تحقیق با تحلیل ۳۵۱ دال بتنی متفاوت تحت بار انفجار به کمک نرم‌افزار LS-DYNA میزان خیز حداکثر، زمان رسیدن به آن خیز حداکثر و سختی دال‌ها ثبت شده است. در ادامه به کمک روش الگوریتم ژنتیک با پردازش داده‌های مربوط به خیز حداکثر و زمان آن، رابطهٔ مستقیم محاسبه این پارامترها استخراج گردیده است. همچنین در این مطالعه. برای استخراج رابطهٔ مستقیم محاسبه سختی دال بتن مسلح تحت بار انفجار از روش آماری سطح پاسخ استفاده شده است. درنهایت برای تعیین میزان حساسیت خیز حداکثر دال به پارامترهای هندسی و بارگذاری از روش دامنه کسینوس استفاده شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پارامتر فاصله ماده منفجره (R) بیشترین تأثیر و سطح مقطع فولاد (AS) کمترین تأثیر را در خیز حداکثر دال دارد. همچنین عرض و طول دال بیشترین تأثیر و متغیر سطح مقطع فولاد (AS) کمترین تأثیر را در زمان رسیدن به خیز حداکثر دال دارد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل دینامیکی، دال بتن مسلح، بار انفجار، خیز، الگوریتم ژنتیک، روش سطح پاسخ، اجزا محدود، سختی.

Assessment of Response and Stiffness of Two-way Reinforced Concrete Slab Against Explosion Using Genetic Algorithm and Response Surface Method

S. A. Hosseini[*], A. Foroughi, S. Peymani Forushani
Malek Ashtar University of Technology
(Received: 2022/08/13; Accepted: 2023/01/15)

Abstract

Conventional Analysis of Reinforced Concrete Slabs under blast load requires a long process. This process, in addition to being time consuming, does not determine the extent to which the geometric parameters of the slab are loaded. To overcome this problem, in this study, by Analyzing 351 different concrete slabs under blast load by LS-DYNA software, the maximum Deflection, its corresponding arrival time and Slab Stiffness were recorded. Then, by using the genetic algorithm method, by processing the data related to the maximum Deflection and its time, a direct relationship between the calculation of these parameters was extracted. Considering the nature of the relationship extracted from the Response Surface Method, the coefficients of the relationship variables presented for stiffness determined the importance of each variable in the stiffness of the slab. Finally, the cosine amplitude method has been used to determine the maximum sensitivity of the slab to geometric parameters and loading. The results of this study show that the explosive distance parameter (R) has the most effect and the cross-sectional variable of steel (AS) has the least effect on the maximum slab deflection. It has the maximum effect at the time of reaching the maximum deflection.

Keywords: Dynamic Analysis, Reinforced Concrete Slab, Blast load, Deflection, Genetic Algorithm, Response Surface Method, Finite Elements, Stiffness.

[*]Corresponding Author E-mail: hoseini@mut.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه در کشورهای دنیا با افزایش روزافزون حوادث تروریستی، تحلیل و طراحی ساختمان‌ها و اجزای سازه‌ای آن‌ها در برابر بارهای انفجاری، علاوه بر بارهای مرسوم استاتیکی و دینامیکی (زلزله و باد)، موردتوجه قرار گرفته است. به علت ویژگی‌های خاص بتن، سازه‌های بتنی از عملکرد مناسبی در برابر بارهای انفجاری برخوردار است به همین علت این سازه‌ها در برابر بارها و تهدیدات انفجاری کاربرد زیادی دارند و لازم است تا رفتار و پاسخ این سازه ها و اجزای اصلی آن در برابر انفجار مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به ماهیت فشاری بارگذاری انفجاری و لزوم مقابله با این بارها توسط اعضای صفحه‌ای مثل دال و دیوار، بررسی و ارزیابی پاسخ این اعضای صفحه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار هستند (البته لازم به ذکر است که بسته به موقعیت و هندسه عضو و فاصله از مرکز انفجار و ایجاد خلأ می‌تواند کشش هم به وجود آید). بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد معمولاً برای ارزیابی پاسخ دال‌های بتنی در برابر بار انفجار از روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی استفاده می‌شود.

در زمینه تحلیل دال‌های بتنی تحت بار انفجار مطالعات زیادی به روش تحلیلی انجام‌شده است، به‌عنوان نمونه ال دخاخنی و همکاران [۱] در تحقیقی به بررسی صحت مدل یک درجه آزادی برای دهانه‌های بتن مسلح دوطرفه تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. ایشان سیستم یک درجه آزادی را بر اساس آیین‌نامه UFC به‌صورت برنامه فورترن، برنامه‌نویسی کردند و پاسخ این سیستم‌ها را تحت بار انفجار مورد ارزیابی قراردادند. برنامه ایشان بر اساس تغییر پارامترهای ابعاد، نسبت میل‌گرد و شرایط تکیه‌گاهی، قابلیت ارائه نمودارهای فشار-ایمپالس برای دهانه‌های بتن مسلح دوطرفه را دارد. در این مقاله همچنین یک‌سری از محدودیت‌های سیستم یک درجه آزادی برای مدل‌کردن دال دوطرفه نشان‌داده‌شده است. در مورد دیگر هاوو و همکاران [۲] در مقاله‌ای به ارزیابی پاسخ‌های سازه‌ای به بارهای دینامیکی با نرخ بارگذاری‌های مختلف پرداختند. در این مقاله تفاوت پاسخ‌های سازه تحت بار با نرخ بارگذاری کم‌وزیاد بحث شده است. علاوه بر مطالعات ذکرشده محققین زیادی به بررسی روش‌های تحلیلی پرداخته‌اند [۳-۶].

روش‌های تحلیلی باوجود دقت قابل‌قبول در تحلیل سازه‌ها، مستلزم طی‌کردن روندهای طولانی جهت رسیدن به پاسخ است. علاوه بر روش‌های تحلیلی ارزیابی پاسخ دال‌های بتنی در برابر انفجار به روش آزمایشگاهی نیز مورد بررسی محققان قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه مارتین کریستوفر سن و همکاران [۷] در پژوهشی به مطالعه عددی و آزمایشگاهی پاسخ دال‌های بتن مسلح معمولی تحت بار انفجار پرداخته‌اند. آن‌ها در این تحقیق با آزمایش دو طرح اختلاط رایج به بررسی عملکرد سازه‌های بتنی تحت بارگذاری انفجاری اقدام کردند. در آزمایش‌های فشاری و کششی نمونه‌های مربعی و استوانه‌ای تأثیر شرایط تکیه‌گاهی و نیز میل‌گردها در نحوه شکل‌گیری ترک‌ها بررسی شد. روش‌های آزمایشگاهی با وجود دقت مناسب و اعتبار بالای نتایج آن‌ها، با موانع زیادی به علت هزینه بسیار بالای انجام آزمایش‌ها و همچنین محدودیت امکانات در تعداد آزمایش‌ها و ابزاردقیق مواجه است. روشی که بادقت و جزئیات بیشتری پاسخ دینامیکی سازه‌ها را تحت بارهای انفجاری مورد ارزیابی قرار می‌دهد و محدودیت و موانع بسیار کمتری نسبت به دو روش قبلی دارد، روش تجزیه‌وتحلیل عددی با استفاده از روش اجزا محدود است که موردتوجه محققان قرار گرفته است. ژان وو و همکاران [۸] در مطالعه خود پاسخ دینامیکی و رفتار شکست دال بتن مسلح را با درنظرگرفتن شرایط مختلف بارگذاری (اعم از میزان ماده منفجره و فاصله آن) و ضخامت دال به‌صورت شبیه‌سازی عددی موردمطالعه قرار داده است. او در این مطالعه رابطهٔ بین شرایط مختلف انفجار و سطوح مختلف آسیب را ارائه داده است. درنهایت مدل عددی خود را با نتایج یک روش تجربی مقایسه نموده است. در مطالعه‌ای دیگر جیانکو لانتی و همکاران [۹] به بررسی میزان آسیب دال‌های بتنی در تماس با ماده منفجره به کمک نرم‌افزار LS-Dyna برای دال‌های دارای پارتیشن و بدون پارتیشن پرداخته‌اند و نتایج آسیب دال‌های پارتیشن‌بندی شده و بدون پارتیشن‌بندی را با یکدیگر مقایسه نمودند. علاوه بر مطالعات فوق به علت مزایای ذکرشده برای این روش، تحقیقات زیادی برای بررسی پاسخ دال بتنی در برابر بار انفجار با روش عددی انجام‌شده است [۱۰-۱۲].

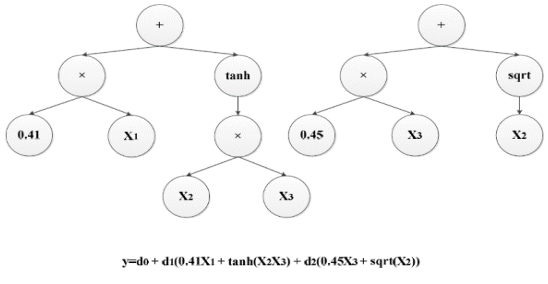
باوجود مزایای بالای روش عددی و امکان بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، این روش به‌تنهایی قادر به ارزیابی میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترهای بارگذاری و هندسی در پاسخ دال بتنی تحت بار انفجار ناست و جهت بررسی دقیق تأثیرگذاری هر پارامتر در پاسخ دال نیازمند انجام تحلیل‌های فراوان با صرف زمان و هزینه زیاد است. برای جبران این نقیصه و تعیین دقیق تأثیرگذاری هر پارامتر در پاسخ دال از روش‌های آماری نظیر برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) و روش سطح پاسخ (RSM) استفاده می‌شود. به دلیل ساده‌بودن این روش‌ها، از آن در علوم مختلفی ازجمله مهندسی سازه استفاده‌شده است. به‌عنوان‌مثال کالیاس، برای تعیین ظرفیت باربری و شکل‌پذیری تیرهای بتن‌آرمه ترک‌خورده از RSM استفاده کرد [۱۳]. در تحقیقی دیگر، هالدر قابلیت اطمینان لرزه‌ای اتصالات نیمه مهارشده قاب‌ها را به کمک روش RSM برآورد کرده است [۱۴]. رافائل دیاز و همکاران، احتمال خرابی و شاخص خرابی را به کمک روش سطح پاسخ در زمینه مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن‌آرمه تعیین کردند [۱۵].

در مطالعه‌ای حسینی و همکاران به کمک روش سطح پاسخ به استخراج رابطه‌ای برای محاسبه خیز تیر بتن مسلح تحت بار انفجار پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های مختلف روش سطح پاسخ با بررسی ۶۶ تیر بتن مسلح، رابطه‌ای را برای محاسبه خیز

تیر بتنی تحت بار انفجار در هریک از این مدل‌ها ارائه کردند. آن‌ها ضمن ارائه رابطهٔ مستقیم برای محاسبه خیز تیر، میزان تأثیرگذاری هر یک از متغیرهای مؤثر بر پاسخ سازه را نیز الویت بندی نمودند [۱۶]. بااین‌حال تاکنون بررسی پاسخ و سختی دال بتنی تحت بار انفجار و بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر آن، با روش GP و RSM مورد بررسی قرار نگرفته است؛ بنابراین، در این تحقیق به کاربرد این روش‌ها در ارزیابی پاسخ و سختی دال‌های بتن مسلح تحت بار انفجار با استفاده از داده‌های روش عددی پرداخته می‌شود. بدین صورت که در این تحقیق با تحلیل ۳۵۱ دال بتنی متفاوت تحت بار انفجار به کمک نرم‌افزار LS-DYNA میزان خیز حداکثر، زمان رسیدن متناظر آن و سختی دال‌ها ثبت گردیده است. در ادامه به کمک روش الگوریتم ژنتیک با پردازش داده‌های مربوط به خیز حداکثر و زمان آن رابطهٔ مستقیم محاسبه این پارامترها استخراج شده است همچنین در این مطالعه، برای استخراج رابطهٔ مستقیم محاسبه سختی دال بتن مسلح تحت بار انفجار از روش آماری سطح پاسخ استفاده می‌شود. درنهایت، با استفاده از روش دامنه کسینوس میزان حساسیت خیز دال به هر یک از این پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱. مبانی علمی تحقیق

روش برنامه‌نویسی ژنتیک: روش برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است؛ الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که در آن از تکنیک‌های زیست‌شناسی فراگشتی مانند وراثت، جهش زیست‌شناسی و اصول انتخابی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌شود [۱۷]. برنامه‌نویسی ژنتیک یکی از روش‌های هوش مصنوعی است که بر پایه آن، برنامه‌های رایانه‌ای به‌صورت مجموعه‌ای از ژن‌ها کدگذاری می‌شوند. سپس این ژن‌ها با استفاده از ژنتیک تغییر داده می‌شوند. این روش یکی از کاربردهای الگوریتم‌های ژنتیک است. برنامه‌نویسی ژنتیک برنامه‌های رایانه‌ای را که به‌صورت سنتی با ساختار درختی در حافظه تعریف می‌شوند، تکامل می‌دهد [۱۸]. می‌توان درختان را به‌سادگی در روشی بازگشتی ارزیابی کرد. هر گره درخت یک تابع عملگر دارد و هر گره ترمینال شامل یک عملوند است. به‌این‌ترتیب، به‌سادگی می‌توان عبارات ریاضی را تکامل داد و ارزیابی کرد. برنامه‌نویسی ژنتیک علاقه‌مند به استفاده از برنامه‌هایی است که به‌صورت طبیعی دارای ساختار درختی باشند (شکل ۱).



شکل ۱- شکل درختی برنامه‌نویسی ژنتیک [۱۸]

روش سطح پاسخ: روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از ابزارهای آماری برای طراحی آزمایش‌ها، تولید مدل‌های ریاضی و ارزیابی تأثیرات عوامل آزمایش و بهینه‌سازی روند است [۱۹]. داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی، برای توسعه مدل‌های ریاضی از طریق تکنیک‌های آماری استفاده می‌شود. فاکتوری به نام F تعیین‌کننده اهمیت پارامترها است، تناسب مدل با ضریب رگرسیون (R^2) و تأثیر عوامل آزمایش توسط تحلیل واریانس ارزیابی می‌شود. معادلات زیر به ترتیب نمونه‌های ساده‌ای از مدل‌های خطی، برهم‌کنش دومتغیره و درجه دوم برای ۲ متغیر مستقل است [۲۰].

$Y = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2$	(۱)
$Y = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_{12}\,X_1X_2$	(۲)
$Y = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_{12}\,X_1X_2 + C_{11}X_1^2 + C_{22}X_2^2$	(۳)

در روابط بالا Y پاسخ، X_1 و X_2 متغیرهای وابسته و C_0، C_i، C_{ii}، C_{ij} به ترتیب، عرض از مبدأ، ضرایب خطی، درجه دوم و برهم‌کنش است.

مقایسه روش GP و RSM: در روش الگوریتم ژنتیک از همه داده‌های ورودی آماری برای توسعه و پیش‌بینی رابطهٔ نهایی استفاده نمی‌شود. بلکه تعدادی از این داده‌ها مبتنی بر الگوریتم ژنتیک جهت استخراج رابطه انتخاب می‌گردند.در این روش با سعی و خطا و انتخاب ترکیبی بهینه از پارامترهای روش GP ،رابطه بهینه را پس از تکرارهای متوالی ارائه می‌دهد. اما در روش سطح پاسخ کل داده‌های ورودی مورد بررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته و رابطه نهایی با توجه به تغییرات سطوح هر متغیر تأثیرگذار ارائه می‌گردد؛ بنابراین در روش RSM وزن اثرگذاری متغیرها با توجه به ضریب آن‌ها در رابطه نهایی می‌تواند الویت بندی گردد، درحالی‌که چنین قضاوتی را در خصوص روش GP نمی‌توان بیان نمود و لازم است برای دستیابی اهمیت هر پارامتر در روش الگوریتم ژنتیک از روش‌های تکمیلی من‌جمله روش دامنه کسینوس استفاده کرد.

روش دامنه کسینوس: یکی از روش‌های تعیین درجه اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی بر روی پارامتر خروجی، روش دامنه کسینوس است که می‌تواند به‌منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی مورداستفاده قرار گیرد. در این روش درجه حساسیت پارامتر ورودی با تعیین درجه همبستگی بین جفت داده‌های ورودی و خروجی و با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$R_i = \frac{\sum_{k=1}^{m} x_{ik}\, y_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m} x_{ik}^{\,2} \sum_{k=1}^{m} y_k^{\,2}}} \qquad (۴)$$

که دراین‌رابطه، مقدار x_{ik} متغیر مستقل i ام برای داده k ام و مقدار y_k متغیر وابسته برای داده k ام (نظیر x_{ik}) و m تعداد کل داده‌ها است. درصورتی‌که مقدار R_i نزدیک به ۱ یا ۱- باشد، نشان‌دهنده این است که بین پارامتر ورودی و پارامتر خروجی همبستگی وجود دارد. همچنین در صورت عدم ارتباط پارامتر خروجی و ورودی، مقدار R_i برابر با صفر خواهد بود.

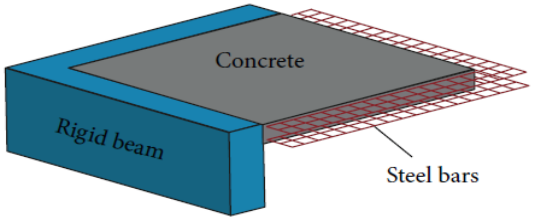
۲. روش تحقیق

در این تحقیق، به‌منظور نیل به یک رابطه جهت محاسبه خیز دال بتن مسلح تحت بار انفجار و محاسبه زمان رسیدن به این خیز، از روش GP و برای به دست آوردن رابطه سختی دال از روش RSM استفاده‌شده است.برای انجام این مدل‌سازی آماری نیاز به استخراج خیز حداکثر، زمان مرتبط با آن و سختی در دال‌های فراوان، با مقادیر مختلف طول، ضخامت، عرض، میل‌گرد، تنش تسلیم بتن و فولاد، مقدار و فاصله ماده منفجره با استفاده از روش عددی و به کمک نرم‌افزار LS-DYNA است. در ادامه، با استفاده از روش دامنه کسینوس میزان حساسیت خیز دال به هر یک از این پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱. مدل‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA

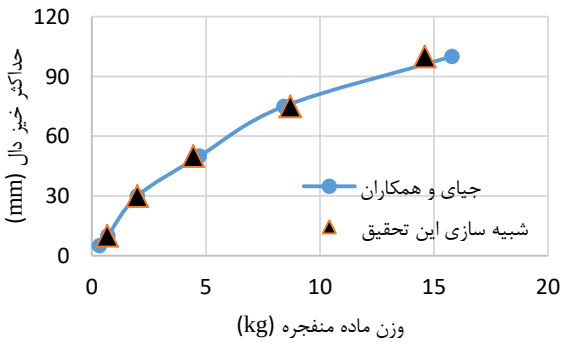
معرفی: به‌منظور به دست آوردن خیز دال‌های مورداستفاده در الگوریتم ژنتیک از نرم‌افزار LS-Dyna استفاده می‌شود. جهت مدل‌سازی بتن، المان Solid و مدل ماده Concrete_Damage_REL3 به‌کاررفته است. این مدل اثرات نرخ کرنش را در نظر می‌گیرد. به‌منظور مدل‌سازی میل‌گردها از المان Beam و مدل ماده Plastic Kinematic که اثرات نرخ کرنش را در نظر می‌گیرد، استفاده‌شده است. برای اندرکنش بین دو جسم در این نرم‌افزار از بخش Constrained استفاده می‌شود و به‌وسیله آن درجه آزادی اجسام مقید می‌شود تا به نحوی با یکدیگر حرکت کنند. به‌منظور تعریف اندرکنش بین میل‌گرد و بتن در این بخش از ابزار lagrange in solid استفاده می‌شود. در نرم‌افزار LS-Dyna نمودار تاریخچه فشار-زمان بارگذاری انفجاری با استفاده از روش CONWEP که یک تابع بارگذاری انفجاری به‌صورت تجربی است و بر اساس محدوده وسیعی از داده‌ها و اطلاعات آزمایشی فراهم‌شده است، به دست می‌آید. درروش CONWEP مقدار ماده منفجره TNT و موقعیت قرارگیری آن به‌عنوان اطلاعات اولیه دریافت می‌شود و با توجه به نتایج آزمایشی فراهم‌شده مربوط به گستره وسیعی از انفجارها، میزان فشار وارده نسبت به زمان تعیین می‌شود. با تعیین قسمت‌هایی از هدف که انفجار به آن‌ها فشار وارد می‌کند بارگذاری حاصل از انفجار به هدف اعمال می‌شود. پس از مدل‌سازی هندسی و تخصیص خواص مکانیکی مصالح و اعمال شرایط تکیه‌گاهی دال بتن مسلح (دال‌ها به‌صورت ۴ طرف گیردار هستند) سازه در معرض انفجار هوایی قرار گرفته است. تحلیل مورداستفاده، تحلیل دینامیکی صریح است. این تحلیل مخصوص تحلیل‌هایی با حجم بزرگ مدل یا مدل‌هایی با بارگذاری و پاسخ‌های دینامیکی سریع و تحلیل‌های با ناپیوستگی‌های زیاد است. فشار ناشی از انفجار هوایی از طریق مدول کانوپ به سطوح دال اعمال‌شده است.

صحت‌سنجی: برای صحت سنجی نتایج مدل پیشنهادی با نرم‌افزار LS-Dynaنیاز بود تا از نتایج مطالعات آزمایشگاهی دال-های بتنی دوطرفه استفاده شود؛ منتها به علت خلأ چنین تحقیقی، از مطالعات جی‌ای و همکاران [۲۱] که به ارزیابی عددی پاسخ و خسارت دال دوطرفه خمشی بتن مسلح معمولی در برابر انفجار پرداخته‌اند، استفاده‌شده است. ایشان در این تحقیق، تأثیر وزن و موقعیت ماده منفجره را بر روی مودِ خسارتِ دال بتنی دوطرفه مورد بررسی قرار داده‌اند. طول، عرض و عمق دال بتنی مورد بررسی در این تحقیق، به ترتیب برابر با ۳، ۳ و ۰/۱۲ متر است. پوشش بتن روی میل‌گرد برابر با ۱/۴ سانتی‌متر و آرایش میل‌گردها به‌صورت شبکه‌ای است که فاصله بین دو میل‌گرد در هر دو جهت برابر با ۱۰ سانتی‌متر است. محققین شرایط مرزی دورتادور دال بتنی را به‌صورت گیردار در نظر گرفته‌اند (شکل ۲). این دال تحت انفجار هوایی با مقادیر مختلف ماده منفجره و تحت فاصله ۵ متری از خرج انفجاری مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۲- شبکه میل‌گرد دال[۲۱]

در جدول (۱) و شکل (۳)، مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مدل عددی پیشنهادی این تحقیق و نتایج تحقیق جی‌ای و همکاران بیان‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پاسخ‌های به‌دست‌آمده با مدل عددی پیشنهادی تطابق قابل قبولی با نتایج تحقیق جی‌ای و همکاران دارد. اختلاف جزئی نتایج نیز، می‌تواند ناشی از استفاده از برخی پارامترهای پیش‌فرض به علت کمبود اطلاعات مرجع اصلی باشد.



شکل ۳- مقایسه نمودار خیز دال در مطالعات جیای و همکاران [۲۱] و شبیه‌سازی این تحقیق

جدول ۱- مقایسه نتایج صحت‌سنجی با نتایج مقاله جیای و همکاران [۲۱]

	وزن ماده منفجره(kg)	۱۰	۳۰	۵۰	۷۵	۱۰۰
خیز حداکثر مرکز دال (cm)	نتایج تحقیق جیای و همکاران	۰.۶۹۹	۱.۹۹۶	۴.۷۲۱	۸.۴۲۸	۱۵.۸۰۸
	شبیه سازی با مدل عددی پیشنهادی این تحقیق	۰.۶۸۰	۲.۰۰۰	۴.۴۴۷	۸.۶۵۰	۱۴.۵۹۸
	خطا٪	۲.۷۱	-۰.۲۰	۵.۸۰	-۲.۶۳	۷.۶۵
بیشینه فشار بار انفجار (MPa)	نتایج تحقیق جیای و همکاران	۰.۴۲۰	۱.۲۲۰	۲.۰۳۰	۳.۰۳۰	۴.۰۲۰
	شبیه سازی با مدل عددی پیشنهادی این تحقیق	۰.۴۲۲	۱.۲۲۱	۲.۰۲۷	۳.۰۳۱	۴.۰۰۰
	خطا٪	-۰.۴۸۰	-۰.۰۸۰	۰.۱۵۰	-۰.۰۳۰	۰.۵۰۰

۲-۲. مشخصات دال‌های مورداستفاده در روش GP و RSM

پارامترهای مؤثر بر پاسخ دال بتن مسلح تحت بار انفجاری: میزان خیز دال به عوامل بارگذاری و مشخصات سختی دال وابسته است. این عوامل عبارت‌اند از:

عوامل بارگذاری: وزن ماده منفجره (W) و فاصله ماده منفجره(R).

عوامل مرتبط با سختی دال: عرض دال (H)،طول دال(L)، ضخامت دال (T_C)، عمق مؤثر (d)، مساحت میل‌گرد (A_S) ، تنش تسلیم فولاد (f_y)، تنش نهایی فولاد(f_u) ، مقاومت فشاری بتن (f_c)، وزن مخصوص بتن(γ) و مدول الاستیسیته فولاد (E_S). هرکدام از عوامل دیگر که در میزان سختی دال یا بارگذاری انفجاری مؤثر است خود شامل این عوامل هستند و مستقل نیستند. در ادامه برای ارزیابی تأثیر هرکدام از این عوامل در پاسخ دال، پارامترهای مشخصات سختی و عوامل بارگذاری را به طور جداگانه بررسی می‌کنیم. همچنین با درنظرگرفتن چند مقدار برای هرکدام از متغیرها و با درنظرگرفتن جای‌گشت این مقادیر، به ساختن تعداد ۳۵۱ نمونه دال اقدام می‌کنیم.

عوامل مؤثر بر بارگذاری: یکی از دو عامل تأثیرگذار در میزان خیز دال، مشخصات بارگذاری است. برای بررسی مشخصات بارگذاری دو پارامتر وزن ماده منفجره و فاصله ماده منفجره به‌عنوان پارامتر مستقل قابل‌بررسی است و باقی پارامترهای بارگذاری از این دو پارامتر قابل‌محاسبه است. در روند طراحی علاوه بر تغییرات R و W، تغییرات فاصله مقیاس شده (Z)نیز در پاسخ دال تأثیرگذار است؛ بنابراین برای ایجاد ۳۵۱ نمونه دال مقادیر مختلف R و Z در نظر گرفته شد ، در نتیجه متغیر W از این دو متغیر قابل‌محاسبه است.

عوامل مرتبط با سختی دال: در سختی دال بتن مسلح دوطرفه متغیرهایی شامل ابعاد دال، درصد آرماتور و مقاومت بتن و فولاد تأثیرگذار است که به تفکیک به بررسی هرکدام می‌پردازیم.

ابعاد دال: متغیرهای طول (L) و عرض (H) و ضخامت (T_C) نقش بسزایی در ممان ایزسی ، نحوه شکل‌گیری خطوط تسلیم و در نتیجه در مقاومت نهایی ایفا می‌کند. علاوه بر این در نحوه محاسبه عبارت‌های گفته شده، نسبت طول به عرض دال نیز تأثیرگذار است؛ بنابراین به جهت بررسی رفتار خیز دال بتن مسلح، مقادیر جدول ۲ برای هریک از این متغیرها در دال‌های مختلف در نظر گرفته شد که در آن مقدار H نیز با توجه به تغییرات L و$\frac{H}{L}$ تعیین می‌شود.

درصد آرماتور: با ثابت درنظرگرفتن ابعاد دال، متغیرهای قطر میل‌گرد (D)، فاصله میل‌گردها از یکدیگر (S) و عمق مؤثر (d) در تعیین درصد آرماتور دال بتن مسلح دخالت دارند. با توجه به اینکه قطر میل‌گرد و فاصله میل‌گردها از یکدیگر تنها در مساحت میل‌گرد (A_S) تأثیرگذارند، در این تحقیق تنها تغییرات خیز حداکثر دال تحت‌تأثیر مساحت میل‌گرد (A_S) و عمق مؤثر (d) بررسی می‌شود.

مقاومت بتن: بصائری درپایان‌نامه خود به بررسی میزان تغییرات مقاومت فشاری بتن در حجم مصالح مصرفی در طراحی دال بتن مسلح با روش‌های مقاومت نهایی و طراحی بر اساس عملکرد پرداخت [۲۲]. ایشان در تحقیق خود به این نتیجه دست یافته با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۸ مگاپاسکال به ۸۰ مگاپاسکال معیار پذیرش IO تنها ۱,۸ درصد، LS به میزان ۱,۵۸ درصد و CP، ۱,۴ درصد کاهش حجم بتن برای طراحی دال در محدوده‌های مورد نظر داشته در پی داشته است. بنابراین میزان مقاومت فشاری بتن تأثیر بسیار کمی در پاسخ دال دارد که قابل صرفه نظر کردن است.

مقاومت فولاد: در کشورهای مختلف فولاد میل‌گرد با استانداردهای متفاوتی تولید می‌شوند و در هر استانداردی طبقه‌بندی مشخصی در ارتباط با خواص مکانیکی فولادها وجود دارد. در ایران قسمت عمده‌ای از فولادهای میل‌گرد با استاندارد روسی مطابقت دارند و طبق آن به سه گروه A-1 و A-2 و A-3 تقسیم می‌شوند. با توجه به مقادیر حداقلی آیین‌نامه ufc تنها میل‌گرد قابل‌استفاده در ایران برای طراحی انفجاری میل‌گرد A-3 است، بنابراین برای تمامی مدل‌ها از میل‌گرد با مقاومت تسلیم ۴۵۰ مگاپاسکال استفاده می‌شود.

مشخصات دال‌های مورد استفاده: در بخش حاضر ۳۵۱ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. برای تولید این نمونه‌ها، ابتدا یک دال بتنی به‌عنوان دال مبنا در نظر گرفته‌شده است (جدول ۲). مابقی نمونه‌ها با تغییر در پارامترهای هندسی و بارگذاری دال

مبنا، به‌دست‌آمده‌اند. همچنین شرایط تکیه‌گاهی همه نمونه‌ها یکسان و به‌صورت ۴ طرف گیردار است. برای ایجاد تغییرات در بارگذاری، فاصله ماده منفجره از سازه (**R**) و فاصله مقیاس شده (**Z**) تغییر داده شده است. با توجه به اینکه تغییر مقاومت فشاری بتن تأثیر کمی در خیز دال دارد [۲۲] برای همه نمونه‌ها مقدار ثابت ۲۷ مگاپاسکال در نظر گرفته‌شده است. همچنین در جدول (۳) میزان سطوح مختلف در نظر گرفته‌شده به‌منظور ایجاد ۳۵۱ نمونه دال برای هر پارامتر نشان‌داده‌شده است.

جدول ۲. مشخصات هندسی دال مبنا

مشخصات هندسی دال مبنا	L (m)	طول دال	۸
	H (m)	عرض دال	۸
	T_c (cm)	ضخامت دال	۳۰
	A_s (cm^2)	مساحت میل‌گرد فشاری و کششی	۱/۴۸
	F_y (MPa)	تنش تسلیم میل‌گرد فولادی	۴۵۰
	f'_c (MPa)	مقاومت فشاری بتن	۲۷

جدول ۳. مقادیر درنظرگرفته شده برای متغیرهای تأثیرگذار در خیز حداکثر جهت ساختن ۳۵۱ نمونه دال

R(m)	۱	۴	۹
$Z(m/kg^{0.33})$	۱	۱/۳	۲/۳
H/L	۰/۵	۰/۷	۱
L(m)	۲	۵	۸
T_c(cm)	۳۰	۴۰	۵۰
$A_s(cm^2/m)$	۴/۹۵	۳۶/۵۵	۶۷/۰۸
d-d' عمق مؤثر مقطع با فولاد فشاری	۹	۱۳	۱۷

در روش برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) و سطح پاسخ به تعداد ۷۰ درصد داده‌ها به‌صورت دلخواه توسط برنامه انتخاب می‌شوند و توسط این داده‌ها که به آن‌ها داده‌های آموزشی گفته می‌شود رابطه موردنظر آموزش داده می‌شود و شکل می‌گیرد. در انتها پس ازآنکه برنامه رابطه تخمین خیز یا سختی را پیشنهاد داد، این رابطه با ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها که به داده‌های آزمون معروف‌اند امتحان می‌شود و مشخص می‌شود که این رابطه پیشنهادی برای داده‌های مستقل با چه تقریبی می‌تواند پاسخ را پیش‌بینی کند؛ بنابراین بخشی از این ۳۵۱ نمونه به‌عنوان داده‌های آزمون کنار گذاشته می‌شوند و از آن‌ها برای کنترل جواب مسئله استفاده شده است.

۲-۳. شاخص‌های ارزیابی مدل GP

در این تحقیق از روابط آماری زیر برای محاسبه میزان عملکرد و دقت مدل‌ها استفاده‌شده است:

- ضریب رگرسیون (R^2):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{M} (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M} (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^{M} (t_i - \bar{t}_i)^2}} \right]^2 \quad (۵)$$

- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} (h_i - t_i)^2} \quad (۶)$$

- میانگین خطای مطلق (MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |y_i - x_i|}{n} \quad (۷)$$

- مجموع مربعات خطا (SSE):

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - f\left(x_i\right) \right)^2 \quad (۸)$$

- میانگین مربعات خطا (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)^2 \quad (۹)$$

که M تعداد کل داده‌ها در هر مجموعه، h_i شامل ارزش حقیقی i امین خروجی، t_i شامل ارزش پیش‌بینی‌شده i امین خروجی، میانگین h_i و میانگین t_i است. مقادیر کمتر RMSE، MAE، SSE و MSE از عملکرد بهتر مدل پیش‌بینی حکایت دارد. درواقع برای یک مدل پیش‌بینی دقیق و بدون هیچ‌گونه خطایی می‌توان مقادیر R^2 برابر با یک و RMSE، MAE، SSE وMSE برابر با صفر را انتظار داشت. برای خطاهای محاسبه‌شده که یکای آنان مطابق با یکای داده‌های مدل شده است، میزان مطلوب خطا به‌طورکلی برابر ۱۰ درصد بزرگ‌ترین داده در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال بزرگ‌ترین داده برای خیز حداکثر برابر ۱۰۴ سانتی‌متر است که مقدار خطای مطلوب برای مدل پیش‌بینی خیز برابر ۱۰/۴ سانتی‌متر است. به‌منظور پوشش‌دادن تمامی تغییر مکان‌های ممکن دال، ابعاد دال، میزان آرماتورها و شرایط بارگذاری به‌گونه‌ای طراحی گشته‌اند که تغییر شکل‌های بزرگ هم در داده‌های آماری وجود داشته باشند. حداکثر خیز و دوران تکیه‌گاهی دال‌های موردمطالعه، حدود ۱۳٫۶ درجه، است که برای دال ۸ متری، مقدار خیز متناظرش ۱ متر می‌باشد که با معیار پذیرش دستورالعمل UFC-3-340-02 (۱۲ درجه) حدود ۱۵ درصد اختلاف دارد که با توجه به هدف مقاله که ارائه رابطه مستقیم

برای محاسبه خیز حداکثر دال در شرایط مختلف و نه فقط لزوماً ارضای شرایط آیین‌نامه‌های طراحی است تطابق دارد.

۲-۴. شاخص‌های ارزیابی مدل RSM

ضریب رگرسیون (R_i): این ضریب نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به‌وسیله متغیر مستقل تبیین می‌شود یا به‌عبارت‌دیگر ضریب تعیین نشان‌دهنده این است که چه مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت‌تأثیر متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل است. مقدار ضریب تعیین بالاتر نشان می‌دهد که در مدل رگرسیونی مقدار مشاهده‌شده به خط برازش شده نزدیک‌تر است. اگر این ضریب ازلحاظ تئوری ۱ شود، نشان می‌دهد که مدل همه تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌کند.

نسبت سیگنال به نویز (Adeq precision): میزان پراکندگی را حول یک مقدار مشخص بیان می‌کند یا به بیان دیگر اینکه جواب‌های ما در بین چند آزمایش انجام‌شده چگونه تغییر کرده‌اند. با توجه به نوع مدل‌سازی صورت‌گرفته در این تحقیق هر چه این میزان بیش‌تر باشد مطلوب‌تر است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. ارزیابی مدل ساخته‌شده برای پیش‌بینی خیز حداکثر دال به کمک GP

در این بخش از روش برنامه‌نویسی ژنتیک برای پیش‌بینی خیز حداکثر دال بتن مسلح چهار طرف گیردار تحت بار انفجار استفاده‌شده است. همان‌طور که در بخش قبلی گفته شد در روش برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) به تعداد ۷۰٪ داده‌ها جهت استخراج رابطه و ۳۰٪ داده‌ها جهت کنترل و بررسی میزان دقت رابطه استخراج‌شده بکار می‌رود. مدل ساخته‌شده با داده‌های مورداستفاده در این پژوهش ضریب رگرسیون ۰/۹۸ را نتیجه داده است که حاکی از دقت خوب پیش‌بینی پاسخ است. لازم به ذکر است که روابط به‌دست‌آمده در این بخش جهت محاسبه خیز حداکثر، زمان خیز حداکثر و سختی دال برای بارگذاری انفجاری و مشخصات هندسی مطابق جدول (۳) ارائه شده است و مشتمل بر کل بارگذاری‌های انفجاری و هندسه‌های مختلف سازه‌ای نیست. همچنین این مدل رابطهٔ زیر را جهت پیش‌بینی خیز حداکثر دال ۴ طرف گیردار ارائه داده است:

$$X_m = (4/24\times10^{-22}\exp(-0/395)(5/53\times10^{15} \times 4/16\times10^{-7}H^2R^2 + 2/84 \times10^{17}\times4/5\times10^{-4}\times A_sH \times L\times R\times Z))/(176/96\times A_s \times T_c\times L) + 0/0285 \quad (۹)$$

که در رابطه فوق R، H، L، T_c، X_m برحسب سانتی‌متر، Z برحسب $m/kg^{1/3}$ و A_s برحسب cm^2/m^2 است. لازم به ذکر است که تأثیر وزن ماده منفجره که یکی از مهم‌ترین پارامترهای بارگذاری در تعیین میزان پاسخ می‌باشد توسط پارامتر Z در روابط اعمال شده است. ارزیابی عملکرد این مدل در جدول (۴) نشان داده شده است. مقدار مطلوب خطا برای این رابطه با توجه به بزرگ‌ترین داده برابر با ۱۰/۴ سانتی‌متر است.

جدول ۴. ارزیابی دقت مدل پیش‌بینی خیز حداکثر دال به روش GP

معیار ارزیابی	مقدار
R^2	۰/۹۷۸۶۰
RMSE	۰/۱۵۹۰۹
MAE	۰/۰۹۲۰۳۲
SSE	۲/۶۵۷۵
MSE	۰/۰۲۵۳۱
Max abs error	۰/۷۶۱۱۲

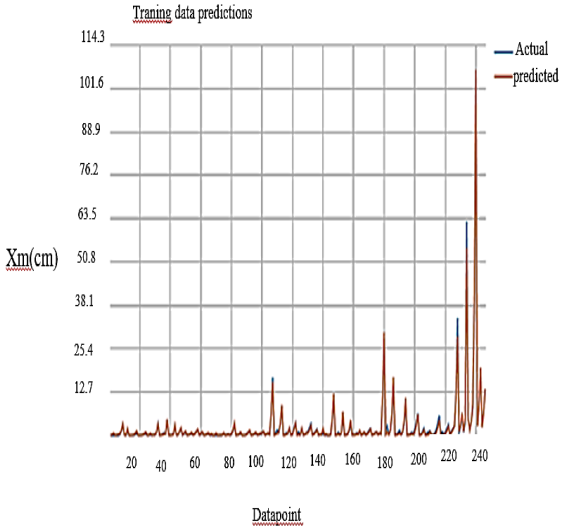
پس از آنکه دقت مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی خیز دال مورد تأیید قرار گرفت باید نتایج ارائه‌شده برای خیز این دال‌ها مورد صحت سنجی قرار گیرد به این منظور نتایج پیش‌بینی‌شده داده‌های آموزشی و آزمون با نتایج واقعی (مدل عددی) در شکل‌های (۴) و (۵) مقایسه شده است. مقادیر محور عمودی برابر خیز دال و محور افقی برابر است با شماره داده موردنظر با ورودی‌های منحصربه‌فرد. هرچقدر نمودار پیش‌بینی منطبق بر نمودار مقدار واقعی باشد نشان از دقت نتایج است. در شکل (۶) و (۷) به ترتیب مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده خیز دال برای داده‌های آموزشی و آزمون نشان‌داده‌شده است؛ محور عمودی میزان خیز نمونه‌های پیش‌بینی‌شده با واحد سانتی‌متر است و محور افقی مقدار خیز واقعی آن است خط میان شکل را خط برابری گویند و هرچقدر داده‌های نمایش‌داده‌شده به این خط نزدیک‌تر باشند، دقت بالای مدل پیش‌بینی نتایج را نشان می‌دهد.

۳-۲. ارزیابی مدل ساخته‌شده برای پیش‌بینی زمان خیز حداکثر دال به کمک GP

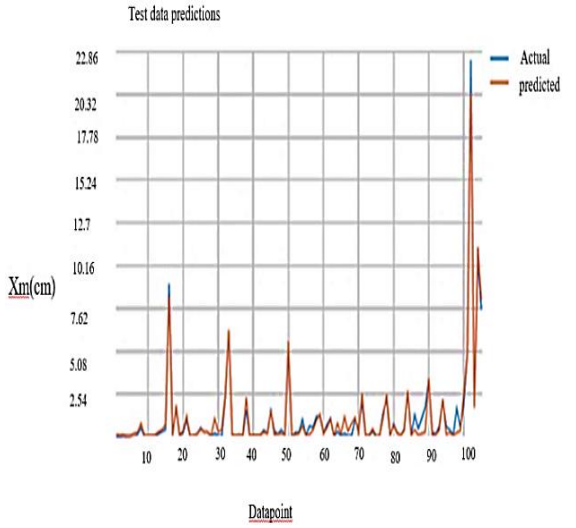
در این قسمت نیز از روش برنامه‌نویسی ژنتیک برای پیش‌بینی زمان خیز حداکثر دال چهار طرف گیردار تحت بار نمایی انفجار استفاده‌شده است. این مدل با ضریب رگرسیون ۰/۹۸ به‌دست‌آمده است. همچنین رابطه زیر به‌عنوان رابطه پیشنهادی برای پیش‌بینی زمان خیز حداکثر دال حاصل‌شده است.

$$t_m = 0/0401\left(0/395Z+\frac{L}{R}\right)\left(6/45A_s+0/01\frac{H}{T_c}\right) + \frac{8/709\times10^{-11}\mathrm{HL}\times\coth(14/58\mathrm{A_s^2Z})\,(0.0254\,\mathrm{R}+2/72)}{1/003\mathrm{T_C\,Z}} - 1/46 \quad (۱۰)$$

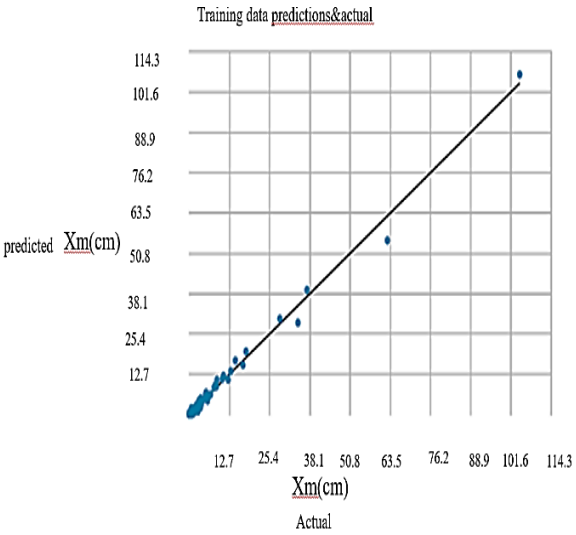
مقدار مطلوب خطا برای این رابطه با توجه به بزرگ‌ترین داده برابر با ۱۵/۴ میلی‌ثانیه (ms) است. میزان خطاهای RMSE، MAE و MSE که در جدول (۵) نشان‌داده‌شده است مقادیر پایینی را نشان می‌دهد که حاکی از دقت مدل پیش‌بینی‌شده است.



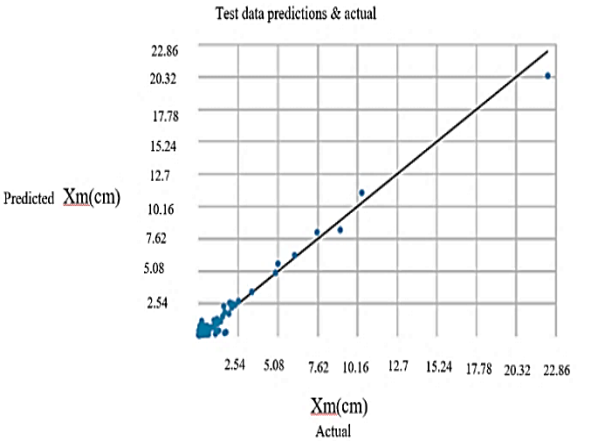
شکل ۴. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده خیز دال برای داده‌های آموزشی



شکل ۵. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده خیز دال برای داده‌های آزمون



شکل ۶. بررسی میزان اختلاف مدل ارائه‌شده با خط برابری برای داده‌های آموزشی



شکل ۷. بررسی میزان اختلاف مدل ارائه‌شده با خط برابری برای داده‌های آزمون

جدول ۵. ارزیابی دقت مدل پیش‌بینی زمان خیز حداکثر دال به روش GP

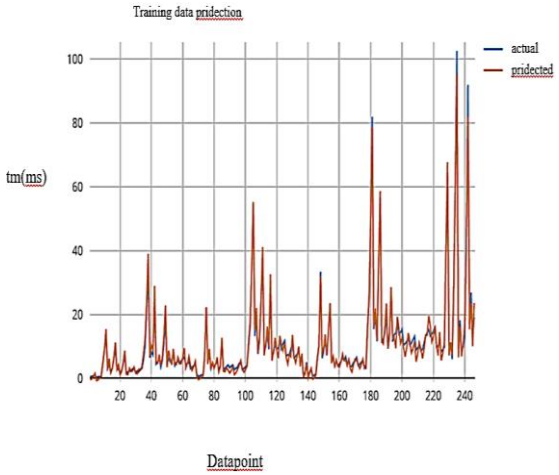
معیار ارزیابی	مقدار
R^2	۰/۹۸۵
RMSE	۲/۳۱
MAE	۱/۲۴
MSE	۵/۳۱
Max abs error	۱۸/۵۶

پس ازآنکه دقت مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی زمان خیز حداکثر دال مورد تأیید قرار گرفت باید نتایج ارائه‌شده برای زمان خیز این دال‌ها مورد صحت‌سنجی قرار گیرد به این منظور نتایج پیش‌بینی‌شده داده‌های آموزشی و آزمون با نتایج واقعی (مدل عددی) در شکل‌های (۸) و (۹) مقایسه شده است. مقادیر محور عمودی برابر زمان خیز دال (ms) و محور افقی برابر است با شماره داده موردنظر با ورودی‌های منحصربه‌فرد. هرچقدر نمودار پیش‌بینی منطبق بر نمودار مقدار واقعی باشد نشان از دقت نتایج است. در شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده زمان خیز دال برای داده‌های آموزشی و آزمون نشان‌داده‌شده است؛ محور عمودی میزان زمان خیز نمونه‌های پیش‌بینی‌شده با واحد میلی‌ثانیه است و محور افقی مقدار زمان واقعی خیز آن است. خط میان شکل را خط برابری گویند و هرچقدر داده‌های نمایش‌داده‌شده به این خط نزدیک‌تر باشند، دقت بالای مدل پیش‌بینی نتایج را نشان می‌دهد.

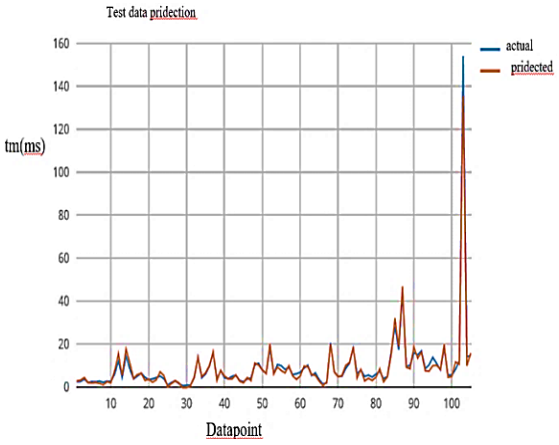
۳-۳. ارائه رابطه محاسبه سختی دال به کمک روش سطح پاسخ

در این تحقیق به‌منظور ساخت مدل RSM از نسخه ۱۰ نرم‌افزار Design Expert استفاده‌شده است. این نرم‌افزار امکان برازش، تحلیل و مقایسه توابع مختلف اعم از خطی، برهم‌کنش (2FI) و چندجمله‌ای را فراهم می‌آورد. در این مطالعه از تابع خطی به‌منظور توسعه مدل سطح پاسخ برای پیش‌بینی سختی دال‌های بتن مسلح تحت بار انفجار استفاده‌شده است. دقت عملکرد مدل

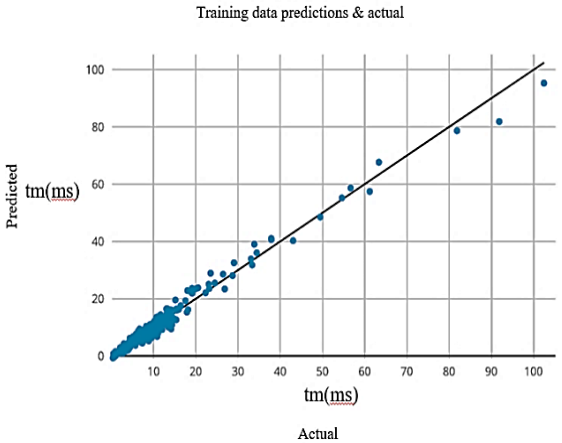
به‌وسیله ضریب رگرسیون (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل ضریب رگرسیون ۰/۹۴ را نتیجه داده است که نشان از دقت نتایج است. پارامتر "Adeq Precision" که نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند. نسبت بیش از ۴ مطلوب است. این نسبت در این تحقیق برابر با ۱۵۷/۲ به دست آمد که نشان‌دهنده یک سیگنال مناسب است.



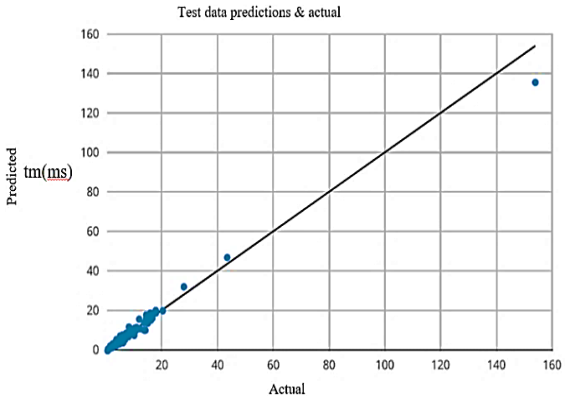
شکل ۸. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده زمان خیز حداکثر برای داده‌های آموزشی



شکل ۹. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده زمان خیز حداکثر برای داده‌های آموزشی



شکل ۱۰. بررسی میزان اختلاف مدل ارائه‌شده زمان خیز حداکثر با خط برابری برای داده‌های آموزشی



شکل ۱۱. بررسی میزان اختلاف مدل ارائه‌شده زمان خیز حداکثر با خط برابری برای داده‌های آموزشی

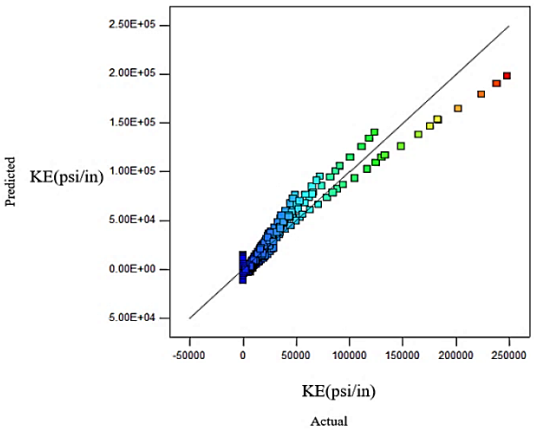
مدل ساخته‌شده با روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی سختی دال به‌صورت رابطه (۱۱) به دست آمد. ضرایب هر یک از متغیرها نشان‌دهنده میزان اثرگذاری آن‌ها بر میزان سختی دال بتن مسلح است.

$$
\begin{aligned}
K_E = {} & 17709/9 + 5/9 \times L - 1713/8 \times H + 2505/5 \\
& \times A_{SV} + 8299/3 \times T_C - 5/3 \times L \\
& \times A_{SV} - 1/2 \times L \times T_C - 164/6 \\
& \times H \times A_S - 415 \times H \\
\times Tc & + 880/6 \times A_{SV} \times T_C + 47/4 \times H^2 + 853/5 \times T_C^2 \\
& + 0/3 \times L \times A_{SV} \times T_C - 28/7 \times H \\
& \times A_{SV} \times T_C + 3/1 * H^2 * A_{SV} \\
& + 5/98 \times H^2 \times T_C - 20/6 \times H \\
& \times T_C^2 + 57/96 \times A_{sv} \times T_C^2 - 0/5 \\
& \times H^3 + 14/85 \times T_C^3 + 0/21 \times H^2 \\
& \times A_{sv} \times T_C + 0/139 \times H^2 * T_C^2 \\
& - 0/69 \times H \times A_{sv} \times T_C^2 - 0/01 \\
& \times H^3 \times A_{sv} - 0/03 \times H^3 \times T_C \\
& - 0/165 \times H \times T_C^3 + 0/204 \times A_{sv} \\
& \times T_C^3 + 2/16 \times 10^{-0.03} \times H^4 \\
& + 1/.85 \times 10^{-0.03} \times H^2 \times A_{sv} \times T_C^2 \\
& - 4/68 \times 10^{-0.04} \times H^3 \times A_{sv} \times T_C \\
& - 2/73 \times 10^{-0.04} \times H^3 \times T_C^2 + 4/16 \\
& \times 10^{-0.04} \times H^2 \times T_C^3 - 1/02 \\
& \times 10^{-0.03} \times H \times A_{sv} \times T_C^3 + 3/27 \\
& \times 10^{-0.05} \times H^4 \times A_{sv} + 5/22 \\
& \times 10^{-0.05} \times H^4 \times T_C - 3/19 \\
& \times 10^{-0.06} \times H^5
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

که در آن:

H, L, T_c برحسب اینچ (in)، A_s برحسب in^2 و K_E برحسب psi/in است. برای کاربردی‌تر کردن رابطه، تلاش شد تا پارامترهای کم تأثیر حذف شده و رابطه کوتاه‌تر شود؛ منتها نتایج نشان داد که با کوتاه‌تر کردن رابطه، دقت رابطه به مقدار زیادی پایین می‌آید (زیر ۰/۸) و اعتبار رابطه زیر سؤال می‌رود. از سویی دیگر ضرایب هر یک از این متغیرها نشان‌دهنده مقدار تأثیر این پارامترها در میزان سختی دال است و یکی از اهداف این مطالعه نیز برآورد این امر است؛ بنابراین جهت حفظ دقت رابطه و نشان‌دادن میزان تأثیر عوامل به‌ناچار از این رابطه طولانی ولی دقیق بجای رابطه کوتاه ولی غیردقیق استفاده شد.

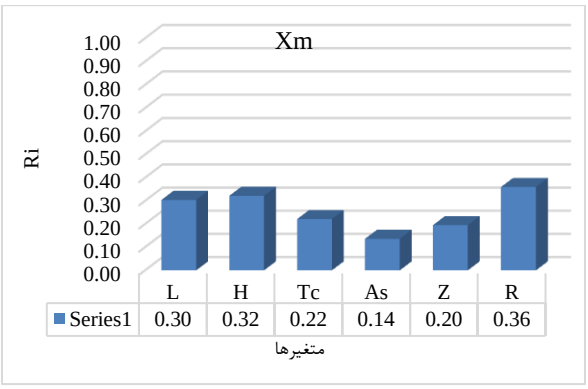
در شکل (۱۲) میزان دقت رابطه تخمین سختی و میزان انحراف داده‌ها از خط برابری قابل‌مشاهده است. هرچه داده‌ها به خط برابری نزدیک‌تر باشند نشان از تطابق مدل پیش‌بینی سختی با مقدار واقعی است.



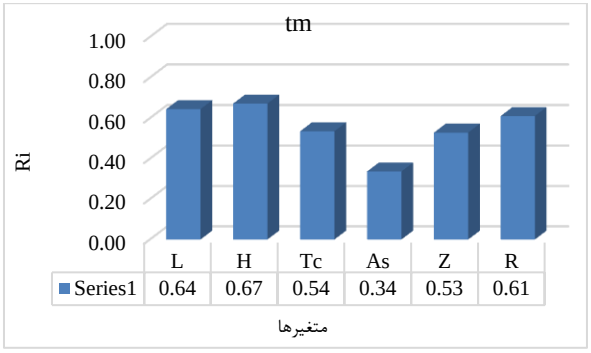
شکل ۱۲. بررسی داده‌های حقیقی و پیش‌بینی‌شده با خط برابری

۴-۳. آنالیز حساسیت متغیرهای مؤثر در خیز و حداکثر زمان خیز

در این بخش به کمک روش دامنه کسینوس میزان تأثیر هر پارامتر بر خیز دال (و زمان رسیدن به آن خیز) یا به‌عبارت‌دیگر، میزان حساسیت خیز (و زمان رسیدن به آن خیز) به هر متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. این روش مقدار خیز دال (X_m) را با هریک از متغیرها به طور مستقل بررسی می‌کند. میزان حساسیت (Ri) خیز به هر متغیر در شکل (۱۳) نشان‌داده‌شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پارامتر فاصله ماده منفجره (R) بیشترین تأثیر و متغیر سطح مقطع فولاد (A_S) کمترین تأثیر را در خیز حداکثر دال دارد. نتایج آنالیز حساسیت متغیرهای خیز دال در شکل زیر قابل‌مشاهده است. طبق نتایج این روش، بهترین روش برای کاهش خیز دال، افزایش فاصله و ازلحاظ هندسی، به ترتیب کاهش عرض و طول و افزایش ضخامت است. میزان حساسیت زمان رسیدن به خیز حداکثر به هر متغیر در شکل (۱۴) نشان‌داده‌شده است. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، پارامتر Ri میزان حساسیت یک پارامتر (مثل خیز یا زمان حداکثر) نسبت به پارامترهای دیگر می‌باشد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که عرض و طول دال بیشترین تأثیر و متغیر سطح مقطع فولاد (A_S) کمترین تأثیر را در زمان رسیدن به خیز حداکثر دال دارد.



شکل ۱۳. آنالیز حساسیت متغیرهای مؤثر در خیز حداکثر دال



شکل ۱۴. آنالیز حساسیت متغیرهای مؤثر در زمان خیز حداکثر دال

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با مدل‌سازی ۳۵۱ دال دوطرفه بتن مسلح، با ابعاد هندسی، پارامترهای بارگذاری و خصوصیات مکانیکی مختلف، مقدار خیز حداکثر و زمان رسیدن به آن و هم‌چنین سختی دال به کمک نرم‌افزار LS-dyna محاسبه گردید. روش پیشنهادی برای مدل‌سازی دال دوطرفه به کمک این نرم‌افزار، ابتدا با استفاده از یک تحقیق معتبر صحت‌سنجی گردید. برای تولید این نمونه‌ها، ابتدا یک دال بتنی به‌عنوان دال مبنا در نظر گرفته شد (جدول ۲)؛ مابقی نمونه‌ها با تغییر در پارامترهای هندسی و بارگذاری دال مبنا، به دست آمدند. همچنین شرایط تکیه‌گاهی همه نمونه‌ها یکسان و به‌صورت ۴ طرف گیردار است. برای ایجاد تغییرات در بارگذاری، فاصله ماده منفجره از سازه (R) و فاصله مقیاس شده (Z) تغییر داده شد. در ادامه، با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نرم‌افزار design expert، به محاسبه رابطه خیز حداکثر دال و زمان رسیدن به آن به کمک روش برنامه‌نویسی ژنتیک و همچنین محاسبه رابطه سختی دال به کمک روش سطح پاسخ پرداخته شد. در این روش‌ها، تعداد ۷۰٪ داده‌ها جهت استخراج رابطه و ۳۰٪ داده‌ها جهت کنترل و بررسی میزان دقت رابطه استخراج‌شده بکار رفت. مدل و رابطه به‌دست‌آمده با داده‌های مورداستفاده در این پژوهش جهت محاسبه خیز حداکثر و زمان رسیدن به این خیز حداکثر (با استفاده از روش برنامه-نویسی ژنتیک)، به ترتیب ضریب رگرسیون ۰/۹۸ و ۰/۹۸۵ را نتیجه داده است که حاکی از دقت خوب پیش‌بینی پاسخ است. برای پیش‌بینی و استخراج رابطه سختی دال‌های دوطرفه بتن مسطح تحت بار انفجار نیز، از تابع خطی به‌منظور توسعه مدل سطح پاسخ استفاده شد. دقت عملکرد مدل به‌وسیله ضریب رگرسیون (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل ضریب رگرسیون ۰/۹۴ را نتیجه داده است که نشان از دقت مناسب نتایج است. پارامتر دیگر ارزیابی دقت نتایج، "Adeq Precision" است که این نسبت در این تحقیق برابر با ۱۵۷/۲ به دست آمد که نشان‌دهنده یک سیگنال و دقت مناسب است. درنهایت برای تعیین میزان حساسیت خیز حداکثر دال و زمان رسیدن به آن به پارامترهای هندسی و بارگذاری از روش دامنه

کسینوس استفاده شد نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پارامتر فاصله ماده منفجره (R) بیشترین تأثیر و متغیر سطح مقطع فولاد (A_S) کمترین تأثیر را در خیز حداکثر دال دارد. همچنین عرض و طول دال بیشترین تأثیر و متغیر سطح مقطع فولاد (A_S) کمترین تأثیر را در زمان رسیدن به خیز حداکثر دال دارد.

۵. مراجع

[1] El-Dakhakhni, W.; Mekky, W. F.; Changiz Rezaei, S. H. "Validity of SDOF Models for Analyzing Two-Way Reinforced Concrete Panels under Blast Loading"; J. Perform. Constr. 2009, 24, 4.

[2] Hao, H.; Hao, Y.; Li, Y.; Chen, W. "Review of the Current Practices in Blast-Resistant Analysis and Design of Concrete Structures"; Eng. Struct. 2016, 19, 1193-1223.

[3] Govind, M.; Sarkar, P.; Menon, D. "Short-Term Deflections in Two-Way RC Slabs using Deflection Coefficients"; Eng. Struct. 2008, 35, 247-254.

[4] Jones, J.; Wu, C.; Oehlers, D. J.; Whittaker, A. S.; Sun, W.; Marks, S.; Coppola, R. "Finite Difference Analysis of Simply Supported RC Slabs for Blast Loadings"; Eng. Struct. 2009, 31, 2825-2832.

[5] Miyamoto, A.; Michael, W.; King, M. W.; Fuji, M. "Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads"; Struct. J. 1991, 88, 411-419.

[6] Peimani, S.; Hosseini, S. A. "SDOF System Solution of the Two-Way RC Slab Subjected to Blast Loading"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2021, 2, 185-196 (In Persian).

[7] Hao, H.; Yu, H. L. "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Explosive Loading"; Reinf. Concr. Eng. 2001, 23, 157-178.

[8] Wu, J.; Zhou, Y.; Zhang, R.; Wang, W.; Liu, C.; Zhang, Z. "Numerical Simulation of Reinforced Concrete Slab Subjected to Blast Loading and the Structural Damage Assessment"; Eng. Fail. Anal. 2020, 118, 104926.

[9] Lannitti, G.; Bonora, N.; Curiale, G.; De muro, S.; Marfia, S.; Ruggiero, A.; Sacco, E.; Scafati, S.; Testa, G. "Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Blast Loading"; Procedia Struct. Integr. 2018, 9, 272-278.

[10] Li, j.; Wu, C.; Hao, H. "An Experimental and Numerical Study of Reinforced Ultra-high Performance Concrete Slabs under Blast Loads"; Mater. Des. 2015, 82, 64-76.

[11] Wang, W.; Zhang, D.; Lu, F.; Wang, S.; Tang, F. "Experimental Study and Numerical Simulation of the Damage Mode of a Square Reinforced Concrete Slab under Closein Explosion"; Eng. Fail. Analysis. 2013, 27, 41-51.

[12] Lannitti, G.; Bonora, N.; Curiale, G.; De muro, S.; Marfia, S.; Ruggiero, A.; Sacco, E.; Scafati, S.; Testa, G. "Full Scale Experimental Tests and Numerical Model Validation of Reinforced Concrete Slab Subjected to Direct Contact Explosion"; Int. J. Impact Eng. 2019, 132, 103309.

[13] Kallias, A. N.; Rafiq, M. I. "Performance Assessment Corroding RC Beams using Response Surface Methodology"; Eng. Struct. 2013, 49, 671-685.

[14] Huh, J.; Haldar, A. "Seismic Reliability of Non-linear Frames with PR Connections using Systematic RSM"; J. Prob. Eng. Mech. 2002, 17.2, 177-190.

[15] Díaz, R. A. S.; Nova, S. J. S.; da Silva, M. C. T.; Trautwein, L. M.; de Almeida, L. C. "Reliability Analysis of Shear Strength of Reinforced Concrete Deep Beams using NLFEA"; Eng. Struct. 2020, 20, 109760.

[16] Hosseini, S. A.; Foroughi, A. ; Najafi, M. H. "Obtaining the Deflection Formula of Concrete Beams under Blast Load Using the Response Surface Methodology"; J. Energ. Mater. 2021, 15(4) (In Persian).

[17] Mitchell, M. "An Introduction to Genetic Algorithms"; Cambridge, 1998.

[18] Nichael L. Cramer "A Representation for the Adaptive Generation of Simple Sequential Programs"; Proc. Int. Conf. Genetic Algorithms, 1985, 183-187.

[19] Myers, R. H.; Montgomery, D. C.; Anderson-Cook, C. M. "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments"; John Wiley & Sons, 2016.

[20] Hosseini, S. A.; Tavana, A.; Abdolahi, S. M.; Darvishmaslak, S. "Prediction of Blast-Induced Ground Vibrations in Quarry Sites: A Comparison of GP, RSM and MARS"; Soil Dyn. Earthq. Eng. 2019, 119, 118- 129.

[21] Jia, Haokai.; Yu, Ling.; Wu, Guiying. "Damage Assessment of two-way bending RC Slabs Subjected to Blast Loadings"; Sci. World J. 2014, 17, 12.

[22] Basaeri, A. "Comparison of the Design of Load-bearing Wall System and non-buried Reinforced Concrete Slab against Explosion by Ultimate Resistance and Performance Based Design Methods". Master's Thesis, 2017, Malek- Ashtar University of Technology.