



Investigating the Effect of Loading Rate and Compressive Strength on Flexural Failure Modes of RC Beam Under Impact Load by Numerical Analysis Method

Ahmad Rahmati Alaei^{1*}, Seyed Mohammad Hosein Khatami²

¹ Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

² Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:

Original Research

Received: 09.09.2024

Revised: 28.01.2025

Accepted: 16.04.2025

Keyword:

Reinforced Concrete (RC)
Bending Failure Modes
Loading Rate
Compressive Strength
Finite Element Analysis (FEA)

*Corresponding Author:

Ahmad Rahmati Alaei

Email: arahmatialaei@tvu.ac.ir

In this research, the effect of loading rate and compressive strength on flexural failure modes of reinforced concrete (RC) beams under free fall impact loads is analyzed and evaluated using numerical simulations based on experimental tests. According to the numerical results, the deformation of the middle of the reinforced concrete beam compared to the free fall impact test has a difference of less than 8% (equivalent to 0.5 mm); therefore, the numerical model developed using LS-DYNA finite element code can be used with acceptable accuracy to predict the damage to the RC beam and crack patterns. In the S1616 sample test, the similarity of the bending failure modes is observed according to the effective plastic strain. In this study, 5 different loading rates from low to high, including 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, and 10 m/s, are analyzed for compressive strengths of 32 MPa, 42 MPa, and 52 MPa. The results show that for every 10 MPa increase in concrete compressive strength, the maximum deflection of the RC beam decreases by approximately 10%. At a very high loading rate (10 m/s), the impact force increases by about 31% in the compressive strength between 32 MPa and 52 MPa. Furthermore, for critical impact conditions, increasing the diameter of steel rebars does not significantly affect the maximum deflection.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In the safety experiment with reinforced concrete (RC) beams under impact loading, the prediction of bending capacity and their response to maximum deflection are considered important indicators of failure. On the other hand, researchers are always interested in providing a reliable model based on numerical methods such as finite element (FE), boundary element (BE), etc., which offers the possibility of studying the behavior of RC structures under various conditions of impact loads by identifying the parameters and relationships affecting the formation of cracks. In this field, researchers have proposed factors aimed at preventing and reducing damage to structures. This paper uses the experimental results simulate the free fall of a hammer on an RC beam. The advanced LS-DYNA software was used for the nonlinear finite element analysis analysis. The models developed in this paper provide a practical tool for predicting RC beam failure modes and can significantly reduce the costs of laboratory tests. The matching of numerical analysis results with laboratory results makes the numerical model have acceptable accuracy. With the detailed study done for the amount of loading and compressive strength of concrete, the flexural failure modes of concrete beams with strengths of 32 MPa, 42 MPa, and 52 MPa have been compared in 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, and 10 m/s loading rates.

Methodology

As shown in Figure 1-a, the hammer-free fall test is used to apply the impact loading on the RC beam. At a height of 0.15 m, the 400 kg hammer is released from the upper surface and middle opening of the RC beam. Reinforced concrete (RC) beam support with 1400 mm length has a special design that allows free rotation, but its degree of freedom of translation is limited. Hammer-RC contact force and intermediate deformation are measured using a dynamic force sensor and a laser displacement sensor, respectively. By placing a thin plastic layer on the lower surface of the RC, the accuracy of the laser sensor's accuracy in recording the response with a sampling rate of 100 kHz is increased.

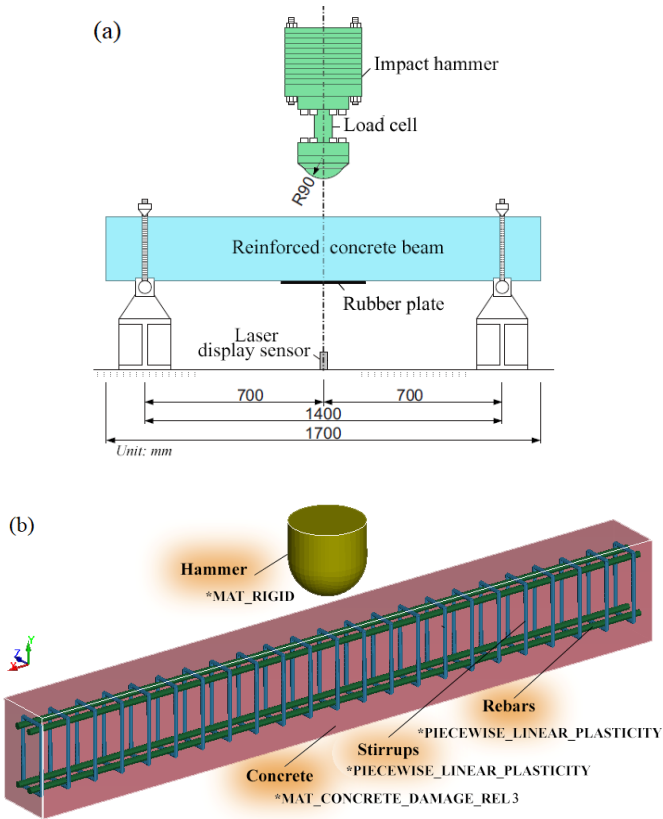


Figure 1. Details of the model; (a) experimental, (b) numerical

In this paper, the powerful LS-DYNA software is used to simulate the effect of hammer-free fall on RC based on the explicit nonlinear dynamic finite element method. The components of the finite element model are shown in Figure 1-b. The material model CONCRETE_DAMAGE is used for describing the complex behavior of concrete under pressure and tension, even at high strain rates. PEICEWISE_LINEAR_PLASTICITY material model is used to investigate the behavior of steel bars. This material model is of elastoplastic type with the ability to define the plastic region in the stress-strain curve. Since the material of the hammer is much harder than steel, the RIGID material model is used. This study models the interaction between RC and the impactor using the AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE contact model. The CONSTARINED_LAGRANGE_IN_SOLID contact algorithm is used for the interaction between steel and concrete.

Results and discussion

As shown in Figure 2-a, the effective plastic strain (flexural failure modes) correspond to the results of the free fall impact test. According to Figure 2-b, the difference of maximum deflection for the RC beam is about 0.5 mm (less than 8%) that indicates a good agreement between the obtained results and the validation of the numerical model.

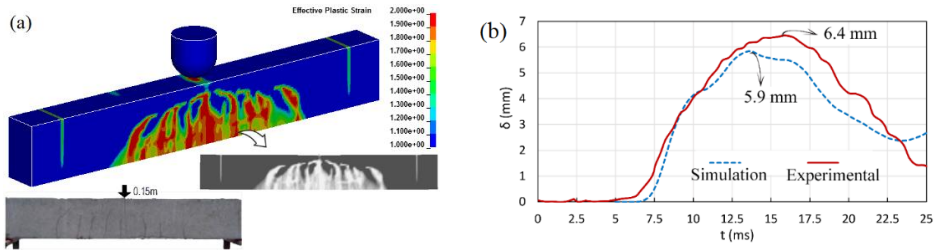


Figure 2. Comparison of experimental and numerical result for Sample S1616; (a) failure mode, (b) RC deflection

As shown in Table 1, the bending deflection of RC beam decreases with the increase of compressive strength. For each 10 MPa increase in concrete compressive strength (from 32 MPa, 42 MPa and 52 MPa), the displacement of the central opening is reduced by approximately 10%. At a loading rate of 10 m/s for low compressive strength (32 MPa) to high compressive strength (52 MPa), the impact force increased by approximately 31%.

Table 1. Comparison of models

Model	LR (m/s)	S_c (MPa)	IF_{max} (kN)	δ (mm)
S1616	1.715	42	120 (EXP)	6.4 (EXP)
			170 (FE)	5.9 (FE)
C2S32	2	32	189	7.7
C4S32	4		403	32
C6S32	6		547	76.1
C8S32	8		622	127
C10S32	10		769	188
C2S42	2	42	189	7.41
C4S42	4		433	29.7
C6S42	6		620	72.3
C8S42	8		790	124
C10S42	10		900	184
C2S52	2	52	197	7.16
C4S52	4		461	27.6
C6S52	6		682	69
C8S52	8		851	121
C10S52	10		1006	181

EXP: Experimental result *Sc: Compressive strength of Concrete*
FE: Finite element result *IF: Impact force*
LR: Loading Rate *δ : Mid span deflection of RC beam*

Conclusion

In this paper, based on experimental and numerical modeling, the bending failure modes of RC beam under free fall hammer impact is investigated. The numerical model can be used to develop a parametric study including types of fall height, arrangement of reinforcement, etc. to evaluate the failure modes of RC beams. A parametric study has been carried out at 5 different loading rates of 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s and 10 m/s for concrete beams with compressive strength 32 MPa, 42 MPa and 52 MPa. The obtained results show:

- 1- The displacement of the middle opening decreases by 10% for every 10 MPa increase in concrete compressive strength.
- 2- The compressive strength of concrete at a low loading rate (2 m/s) does not have a significant effect on the impact force.
- 3- The impact force at the loading rate of 10 m/s increases by approximately 31% for low (32 MPa) to high (52 MPa) compressive strength.
- 4- Increasing the diameter of steel bars on the impact response of concrete free fall in the most critical impact conditions (compressive strength 32 MPa and loading rate 10 m/s) has a negligible effect on the maximum deflection of RC beam.



بررسی تأثیر نرخ بارگذاری و مقاومت فشاری بر مودهای شکست خمشی تیر بتن مسلح تحت بار ضربه به روش آنالیز عددی

احمد رحمتی علائی^{*1}، سید محمدحسین خاتمی²

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

کلید واژگان:

تیر بتن مسلح
مودهای شکست خمشی
نرخ بارگذاری
مقاومت فشاری
آنالیز المان محدود

در این پژوهش تأثیر نرخ بارگذاری و مقاومت فشاری بر مودهای شکست خمشی تیر بتن مسلح تحت بار ضربه‌ای سقوط آزاد با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر نمونه‌های آزمایشگاهی تحلیل و ارزیابی شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده در آنالیز عددی، تغییر شکل دهانه میانی تیر بتن مسلح در مقایسه با آزمایش ضربه سقوط آزاد، کمتر از ۸٪ (معادل 0.5 mm) اختلاف دارد؛ بنابراین مدل عددی که با استفاده از کد المان محدود LS-DYNA توسعه یافته است می‌تواند با دقت قابل قبول برای پیش‌بینی میزان آسیب‌پذیری تیر بتنی و الگوی ترک‌های ایجاد شده به کار گرفته شود. در نمونه بتن مسلح S1616 همسانی مودهای شکست خمشی مطابق کرنش پلاستیک مؤثر مشاهده می‌گردد. در این مطالعه ۵ نرخ بارگذاری متفاوت کم تا زیاد شامل 0.2 m/s ، 0.4 m/s ، 0.8 m/s ، 1.6 m/s و 3.2 m/s برای مقاومت فشاری 0.32 MPa ، 0.42 MPa و 0.52 MPa آنالیز شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد در ازای هر 10 MPa افزایش مقاومت فشاری بتن، بیشینه تغییر شکل تیر بتن مسلح به میزان تقریباً ۱۰٪ کاهش می‌یابد. در نرخ بارگذاری بسیار زیاد (10 m/s)، نیروی ضربه در مقاومت فشاری بین 0.22 MPa تا 0.31 MPa حدود ۳۱٪ افزایش می‌یابد. به‌علاوه بیشینه تغییر شکل تیر با افزایش قطر میلگردهای فولادی در شرایط بحرانی ضربه تأثیر چندانی نخواهد پذیرفت.

*نویسنده مسئول: احمد رحمتی علائی
پست الکترونیکی:
arahmatialaei@tvu.ac.ir



مقدمه

سازه‌های بتن مسلح به‌عنوان سازه‌های استراتژیک و دومین ماده مصرفی پس از آب [۱] می‌بایست به‌گونه‌ای طراحی شوند که اثرات بارهای ضربه‌ای با سرعت پایین همانند ریزش سنگ در مناطق کوهستانی و ضربه ناشی از سقوط آزاد اجسام را تحمل نمایند و در صورت آسیب‌دیدگی ترمیم و تقویت گردند [۲]. از بزرگ‌ترین معایب بتن می‌توان مواردی را همچون شکنندگی، مقاومت کششی کم و انتشار سریع ترک‌ها برشمرد که در مواجهه با بارهای دینامیکی علاوه بر آسیب بر سازه بتنی سبب خسارت به محیط اطراف نیز می‌گردد [۳-۵]. از این رو ارزیابی عملکرد سازه‌های بتن مسلح تحت اثر بار ضربه‌ای و کاهش آسیب‌پذیری آن‌ها به چالشی مهم برای مهندسان و طراحان در سال‌های اخیر تبدیل شده است.

بارگذاری ضربه‌ای یک اعمال بار شدید است که در مدت‌زمان بسیار کوتاه رخ می‌دهد و رفتار مواد تحت اثر آن به ماهیت ناحیه شکست و مکانیسم‌های اتلاف انرژی در اثر ضربه بستگی دارد. به‌طور کلی در مواد ترد و شکننده، انرژی‌های الاستیک به‌عنوان انرژی سطحی بدون تشکیل ناحیه شکست مصرف می‌شود. در مواد نرم و الاستیک، ناحیه شکست مربوط به یک ناحیه پلاستیک است که می‌تواند مقادیر زیادی انرژی را مصرف نماید. در مواد نیمه‌شکننده معمولاً یک منطقه شکست بزرگ که قبل از شکست انرژی زیادی را مصرف می‌کند تشکیل می‌گردد. تا به امروز تحقیقات گسترده‌ای در مورد اثرات بار ضربه‌ای بر بتن انجام گرفته است. استاندارد [۶] ACI 544 آزمون سقوط آزاد چکش را برای ارزیابی مقاومت ضربه‌ای بتن پیشنهاد کرده است. این آزمون به دلیل سهولت و هزینه‌های کم، بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال داده‌های به‌دست‌آمده از طریق آن اغلب پراکندگی بالایی داشته و ضریب تغییرات آن از ۲۵٪ فراتر می‌رود [۷]. در مطالعه ردی و همکاران^۸ [۸] رفتار دال‌های بتنی با مقاومت بالا با دال‌های تقویت‌شده در همان وضعیت مقایسه شدند. آن‌ها نشان دادند معیارهای دینامیکی شامل حداکثر شتاب و شاخص آسیب سازه؛ انرژی مورد نیاز برای ایجاد طول شکست واحد از یک ضربه؛ وابسته به نسبت فولاد است.

در آزمایش ایمنی تیرهای بتن مسلح تحت بارگذاری ضربه‌ای، تخمین ظرفیت خمشی و پاسخ آن‌ها به حداکثر تغییر شکل به‌عنوان شاخص‌های مهم شکست در نظر گرفته می‌شود [۹-۱۲]. از سوی دیگر ارائه یک مدل قابل‌اعتماد بر اساس روش‌های عددی مانند المان محدود، المان مرزی^۹ و ... که امکان مطالعه رفتار سازه‌های بتن مسلح تحت شرایط گوناگون بارهای ضربه‌ای را فراهم نماید، با شناسایی پارامترها و روابط مؤثر بر تشکیل ترک همواره مورد توجه محققان این حوزه بوده و عواملی را برای جلوگیری و کاهش آسیب به این سازه‌ها پیشنهاد نموده‌اند [۱۳-۱۵].

در مقاله حاضر بر اساس تست آزمایشگاهی فوجیکاکه و همکاران^{۱۰} [۱۶] برای سقوط آزاد چکش بر روی یک تیر بتن مسلح، شبیه‌سازی عددی با استفاده از آنالیز غیرخطی المان محدود به کمک نرم‌افزار پیشرفته LS-DYNA انجام شده است. مدل عددی توسعه یافته در این مقاله یک ابزار کاربردی برای پیش‌بینی مودهای شکست

^۱Reinforced Concrete (RC)^۲Reddy et al.^۳Finite Element (FE)^۴Boundary Element (BE)^۵Fujikake et al.

تیرهای بتن مسلح تحت بارگذاری‌های مختلف ضربه‌ای محسوب می‌گردد و می‌تواند به طور قابل توجهی از هزینه تست‌های آزمایشگاهی بکاهد. تطابق نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی اعتبار مدل عددی این مقاله را با دقت قابل قبول تأیید می‌کند. آنالیز همگرایی شبکه‌بندی المان محدود برای میزان تغییر شکل تیر بتن مسلح و نیروی ضربه جهت اطمینان از استقلال نتایج به دست آمده نسبت به اندازه المان‌ها صورت پذیرفته است. با مطالعه پارامتری انجام شده برای اثرات نرخ بارگذاری و مقاومت فشاری بتن، مودهای شکست خمشی تیرهای بتن مسلح با مقاومت‌های 32 MPa ، 42 MPa و 52 MPa در نرخ‌های بارگذاری 2 m/s ، 4 m/s ، 6 m/s ، 8 m/s و 10 m/s مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

تست آزمایشگاهی

پاسخ ضربه‌ای بتن

مطابق شکل ۱ رفتار تیر بتنی تحت بارهای ضربه‌ای در دو مرحله واکنش شامل شکست موضعی و شکست کلی رخ می‌دهد. شکست موضعی توسط امواج تنشی ایجاد می‌شود که در نقطه بارگذاری بلافاصله پس از ضربه رخ می‌دهد. شکست کلی در ارتعاشات آزاد ناشی از تغییر شکل الاستیک-پلاستیک در مدت زمان طولانی‌تری در کل سازه بتنی پس از ضربه رخ می‌دهد. شکست کلی عمدتاً به اثر نرخ بارگذاری و رفتار دینامیکی سازه بستگی دارد.



شکل ۱. پاسخ به ضربه تیر بتنی

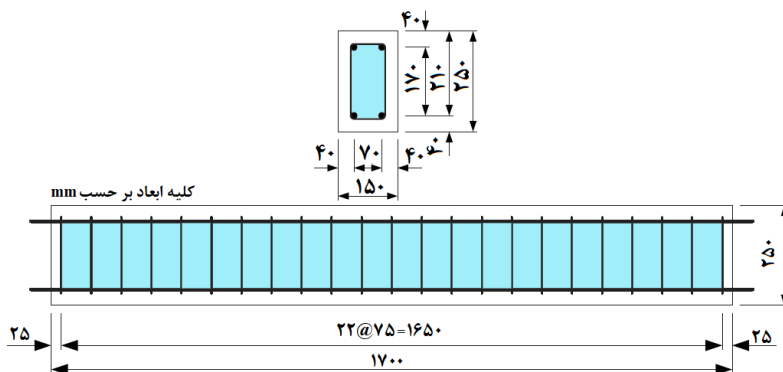
آزمایش سقوط آزاد چکش بر روی تیر بتن مسلح

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نمونه تیر بتن مسلح در آزمایش سقوط چکش [۱۶] دارای ابعاد مقطع 150 mm در 250 mm و طول 1700 mm است. مطابق جدول ۱ میلگردهای طولی $D16$ با مقاومت تسلیم 426 MPa در نمونه تست $S1616$ در نظر گرفته شده‌اند. میلگردهای $D10$ با فاصله 75 mm و حد الاستیک MPa به‌عنوان خاموت استفاده شده است.

جدول ۱. آرایش میلگردها در بتن

حالت فشاری		حالت کششی		نمونه تست
شماره و اندازه (mm)	مساحت A_s' (mm ²)	شماره و اندازه (mm)	مساحت A_s (mm ²)	
۲-D16	۳۹۷	۲-D16	۳۹۷	S1616

^۱Mesh convergence



شکل ۲. ابعاد تیر بتن مسلح با میلگردهای فولادی

مقاومت خمشی و برشی میلگردها بر اساس استاندارد بتن JSCE [۱۷] محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. مقاومت خمشی و برشی میلگردها

نمونه تست	RS/RM	استحکام برشی (kN) $RS = 2V_u$	استحکام خمشی (kN) $RM = 4Mu/L$
S۱۶۱۶	۲/۵۵	۲۳۲	۹۱/۱

نسبت اختلاط بتن مورد استفاده مطابق شکل در این آزمایش در جدول ۳ بیان شده است. چگالی و مقاومت فشاری بتن به ترتیب gr/mm^3 ۰/۰۲۴ و MPa ۴۲ می‌باشد. برای محاسبه درصد هوای بتن در آزمایش، از روش «فشار هوا» (ASTM C231) استفاده شده است. در این روش، نمونه بتن در دستگاه فشار هوا قرار می‌گیرد و با اعمال فشار، حجم هوای موجود در بتن اندازه‌گیری می‌شود. درصد هوا از اختلاف حجم نمونه در فشارهای مختلف محاسبه می‌شود. این دستگاه شامل یک محفظه فشار، پمپ هوا، فشارسنج و یک محفظه نمونه‌گیری است. مشخصات اجزا دستگاه به شرح زیر می‌باشد:

- محفظه فشار: از فولاد ضدزنگ ساخته شده و ظرفیتی حدود $0.2 m^3$ دارد.
- پمپ هوا: فشار ثابت ۱۴ psi ایجاد می‌کند.
- فشارسنج: دقت حداقل ۰/۱ psi برای اندازه‌گیری دقیق فشار.
- محفظه نمونه‌گیری: قابلیت نگهداری نمونه بتن با قطر حدود ۱۵cm و ارتفاع ۳۰cm.
- شیرهای کنترل: برای تنظیم جریان هوا و فشار.

در این تست نمونه بتن در محفظه قرار گرفته است و با اعمال فشار ثابت ۱۴psi، حجم هوای موجود در بتن اندازه‌گیری شده است. اختلاف حجم نمونه تحت فشار و بدون فشار، درصد هوای بتن (در اینجا ۴/۵٪) را نشان می‌دهد.

جدول ۳: ترکیب ساختاری بتن [۱۶]

وزن مصالح به ازای m^3					هوا	کارائی و روانی ^۱
W	C	S	G	Ad	(%)	(cm)
۱۸۵	۴۱۶	۷۲۶	۹۴۳	۴۰۱۶	۴٫۵	۱۵٫۵

W: آب
C: سیمان
G: شن
S: ماسه
Ad: افزودنی



سیمان مورد استفاده در بررسی تجربی فوجیکاکه و همکاران [۱۶] از نوع پرتلند تیپ ۱ رده ۴۲۵ بر اساس ASTM C150 [۱۸] بوده که ترکیبی از سنگ آهک، خاک رس، سیلیس و آهک می‌باشد. مواد افزودنی شامل دوده سیلیس و سرباره کوره با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۴ است. حداکثر اندازه سنگ‌دانه مصرفی 10 mm و جنس آن‌ها سیلیسی می‌باشد. ابتدا دانه‌های سنگی با حداکثر اندازه سنگ‌دانه 10 mm مطابق جدول طرح اختلاط توزین شده و از دانه‌های درشت به ریزتر در داخل مخلوط‌کن ریخته می‌شود. سپس مقداری آب به همراه مواد افزودنی و سیمان به مصالح سنگی اضافه می‌گردد. به مدت یک دقیقه عمل اختلاط ادامه می‌یابد، سپس مقداری از آب مانده به آن اضافه می‌شود. مدت تقریبی چرخش بتونیر ۴ دقیقه می‌باشد. در نهایت مخلوط به قالب تیر که از قبل روغن کاری شده است، ریخته می‌شود. تمامی تست‌ها روی تیرهای بتنی در مدت زمان ۴ روز، بعد از گذشت ۷۰ روز از بتن‌ریزی است [۱۶].

جدول ۴: ترکیب ساختاری مواد افزودنی [۱۹]

K_2O	Na_2O	MgO	SO_3	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	درصد ترکیبات
-	-	-	۱/۱	۰/۵	۴/۸	۱/۲	۸۸/۳	سیلیس
۰/۴	۰/۷	۷/۲	۱/۲	۳۹	۰/۶	۱۵/۴	۳۲/۳	سرباره کوره



سیمان

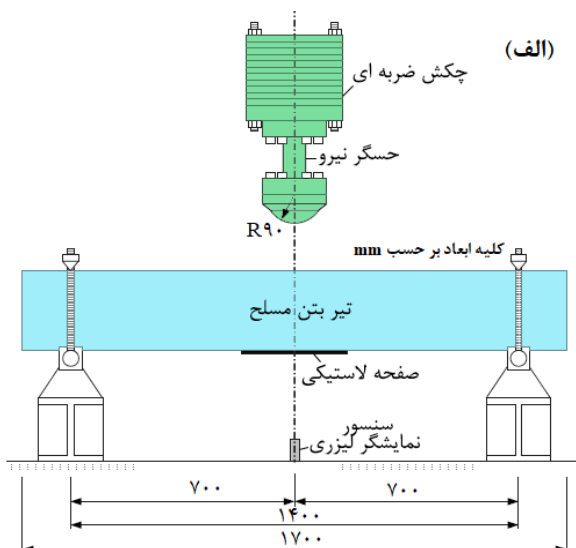


سیلیس



سرباره کوره

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای اعمال بار ضربه از آزمون سقوط آزاد چکش استفاده می‌شود. چکش 400 kg از سطح بالایی و دهانه میانی تیر بتن مسلح از ارتفاع 0.15 m رها می‌شود. تکیه‌گاه تیر بتن مسلح با دهانه 1400 mm دارای طراحی خاصی است که امکان چرخش آزاد را فراهم می‌کند و درجه آزادی جابجایی آن مقید شده است. نیروی تماسی چکش-بتن مسلح و تغییر شکل میانی به ترتیب با استفاده از حسگر نیروی دینامیکی^۱ و سنسور جابجایی لیزری اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳). با قرار دادن یک لایه پلاستیکی نازک در سطح زیرین بتن مسلح، دقت حسگر لیزری در ثبت پاسخ با نرخ نمونه‌برداری 100 kHz افزایش می‌یابد.

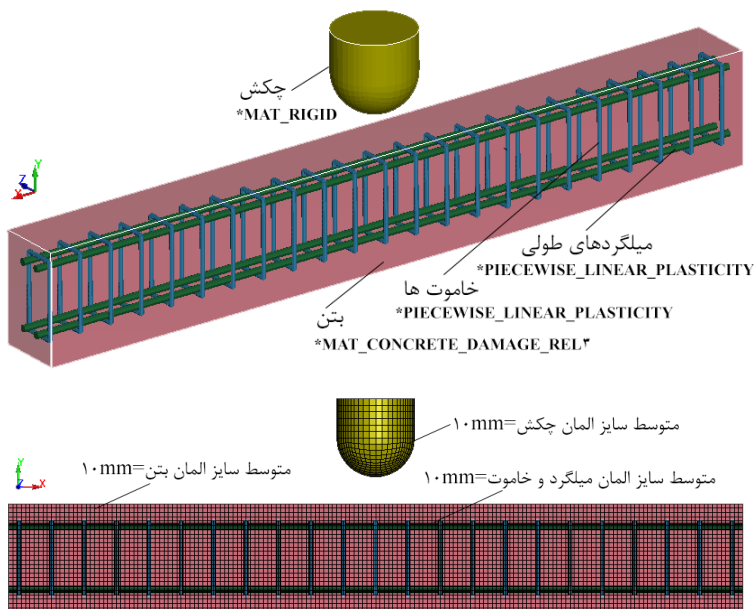


شکل ۳. تست آزمایشگاهی سقوط آزاد چکش بر روی تیر بتن مسلح؛ الف) شماتیک تست، ب) نمای واقعی ج) هندسه چکش با سر نیم کرومی [۱۶]

^۱Load cell

مدل‌سازی عددی با روش المان محدود

در این پژوهش از نرم‌افزار قدرتمند LS-DYNA برای شبیه‌سازی اثر سقوط آزاد چکش بر روی بتن مسلح بر اساس روش المان محدود دینامیکی غیرخطی صریح استفاده شده است. اجزا مدل المان محدود و اندازه شبکه‌بندی المان‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است نوع شبکه‌بندی به‌ویژه در تحلیل صریح اهمیت زیادی دارد و طول المان باید دقیقاً کنترل شده و در شبکه‌بندی منظم و متقارن استفاده شوند. در نرم‌افزار LS-DYNA نزدیک به ۱۹۰ نوع مدل رفتاری ماده و ۱۳ نوع معادله حالت برای توصیف رفتار مواد مختلف توسعه یافته است. با اعمال شرایط صحیح مطابق فیزیک مسئله، از جمله مدل مواد، شرایط مرزی، الگوریتم‌های تماسی، بارگذاری و کیفیت مناسب شبکه‌بندی در مدل المان محدود می‌توان با دقت قابل قبول به نتایج تست آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی دست یافت [۲۰]. برای آنالیزهای عددی پژوهش حاضر از رایانه با مشخصات سخت‌افزاری Intel(R) Core(TM) i9-9880H @ 2.30GHz با ۳۲ GB RAM و همچنین حلگر پردازش موازی MPP استفاده شده است و زمان تقریبی مدل‌های با شبکه‌بندی ۵ mm حدود ۱ ساعت بوده است.



شکل ۴. مدل المان محدود سقوط آزاد چکش بر روی بتن مسلح

\Explicit nonlinear

\Equation of state (EOS)

مدل‌های رفتاری مواد

نرم‌افزار LS-DYNA از چند مدل ماده برای توصیف رفتار بتن برخوردار است. مدل ماده بتن می‌بایست رابطه کشش-کرنش، معیار شکست و رفتار پس از ترک به درستی توصیف نماید. مدل ماده CONCRETE_DAMAGE می‌تواند رفتار پیچیده بتن تحت فشار و کشش حتی در نرخ کرنش‌های بالا را مدل‌سازی نماید [۲۱]. در این مدل ماده تئوری شکست بتن بر اساس مدل مالوار^۱ [۲۲] است و سطح شکست بتن طبق مدل ویلیام-وارنک^۲ [۲۳] به صورت زیر تعریف شده است:

سطح شکست بیشینه:

$$\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{P}{a_1 + a_2 p} \quad (1)$$

سطح شکست پسماند:

$$\Delta\sigma_r = a_0 + \frac{P}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad (2)$$

سطح شکست تسلیم:

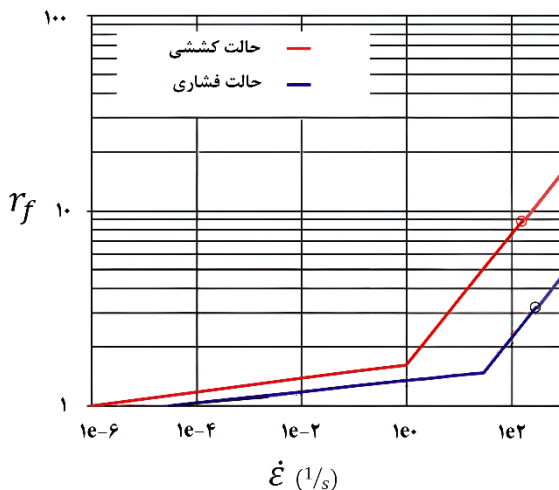
$$\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{P}{a_{1y} + a_{2y} p} \quad (3)$$

سطح شکست پیشرفته:

$$\Delta\sigma_e = r_f \nabla \sigma \left(\frac{P}{r_f} \right) \quad (4)$$

پارامترهای a_0 ، a_1 و a_2 ثابت‌هایی هستند که از آزمایش فشاری سه‌محوره و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره به دست می‌آیند. ضریب افزایش مقاومت بتن r_f مطابق شکل ۵ مشخص می‌گردد. مقاومت افزایش یافته بتن در هر نرخ کرنش از ضرب آن در مقاومت فشاری استاتیکی بتن محاسبه می‌گردد.

¹ Malvar² Willam-Warnke



شکل ۵. ضریب افزایش مقاومت بتن به ازای نرخ کرنش

مدل ماده PEICEWISE_LINEAR_PLASTICITY جهت بررسی رفتار میلگردهای فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل ماده از نوع الاستوپلاستیک با قابلیت تعریف ناحیه پلاستیک در منحنی تنش-کرنش می‌باشد. در این مدل ماده، امکان تعریف اثرات نرخ کرنش نیز وجود دارد. معیار فرسایش المان‌ها برای این مدل ماده، تغییر شکل پلاستیک یا حداقل گام زمانی است. در صورتی که هر یک از المان‌ها در شبکه‌بندی به کرنش شکست برسند یا گام زمانی مسئله در آنالیز عددی کمتر از مقدار مشخص شده در مدل ماده باشد، نرم‌افزار این المان‌ها را از محاسبات حذف می‌کند. مطابق شکل ۶، در این مدل ماده، منحنی تنش-کرنش با توجه به نرخ کرنش تعریف شده است.

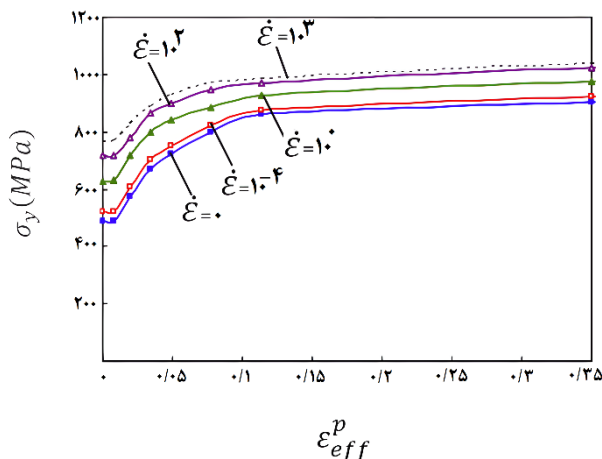
پارامترهای مقاومت افزایشی برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی میلگردهای فولادی در نظر گرفته می‌شود. تابع مقاومت تسلیم بر اساس تئوری ون مایسز^۱ مطابق معادلات زیر است:

$$\sigma_y = \beta \left[\sigma_0 + f_h \left(\epsilon_{eff}^p \right) \right] \quad (5)$$

$$\beta = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/r} \quad (6)$$

$$f_h \left(\epsilon_{eff}^p \right) = E_p \left(\epsilon_{eff}^p \right) \quad (7)$$

¹ Von Mises



شکل ۶. اثر نرخ کرنش بر کرنش پلاستیک مؤثر فولاد [۲۴]

از آنجایی که جنس چکش از فولاد بسیار سخت تر است و تغییر شکل نمی دهد، مدل ماده صلب استفاده شده است. مطابق شکل ۴، چکش (ضربه زننده) و بتن با استفاده از المان های توپر آسه بعدی با اندازه متوسط 10 mm مدل سازی شده اند. این المان از نوع هشت گره ای است که هر گره آن ۹ درجه آزادی شامل جابجایی، سرعت و شتاب دارا است. المان تیر نیز برای مدل سازی میلگردها و خاموت ها انتخاب شده است. اجزای مدل المان محدود، شامل خواص فیزیکی مدل مواد، نوع و تعداد المان ها در جدول ۵ مشخص شده اند.

جدول ۵. اجزای مدل المان محدود

چکش (ضربه زننده)	میلگرد و خاموت	بتن	مدل ماده
*Rigid	*PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY	*CONCRETE_DAMAGE_REL3	مدل ماده
$\rho = 0.15 \frac{gr}{cm^3}$ $E = 2.07e5 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$	$\rho = 0.00783 \frac{gr}{cm^3}$ $E = 2e5 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$ $\sigma_y = 295 \text{ \& } 426 \text{ MPa}$ $E_t = 689 \text{ MPa}$	$\rho = 0.0024 \frac{gr}{cm^3}$ $a_0 = -42 \text{ MPa}$	ضرایب مدل رفتاری ماده
Solid (Hex:CST) ۱۰۳۶۸	Beam (Hughes-Liu) ۱۱۰۴ - ۶۸۰	Solid (Hex:CST) ۶۳۷۵۰	نوع المان تعداد المان ها

پارامترهای ρ ، E ، σ_y ، ν ، E_t و S_c به ترتیب عبارت اند از چگالی، مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، ضریب پواسون، مدول مماسی و مقاومت فشاری بتن.

¹Rigid

²Solid

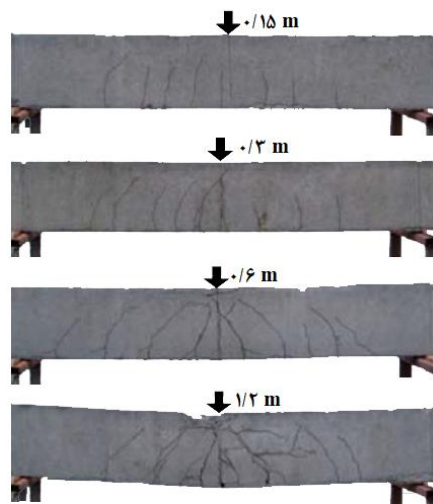
الگوریتم‌های تماس^۱

الگوریتم‌های تماسی در شبیه‌سازی عددی برای بیان مفهوم اندرکنش بین اجزای مختلف استفاده می‌شود. در این مطالعه، از مدل تماس `AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` برای مدل‌سازی اندرکنش بین بتن مسلح و ضربه زننده استفاده شده است. تماس بین میلگردها و تیر بتنی به دلیل رفتار متفاوت فولاد و بتن می‌بایست در آنالیز المان محدود به‌دقت مورد توجه قرار گیرد [۲۵؛ ۲۶]. ناهماهنگی در رفتارهای مختلف فولاد و بتن به دلیل مدول الاستیسیته بالاتر فولاد در مقایسه با بتن و همچنین تفاوت رفتار بتن در شرایط کشش و فشار منجر به جدایش در تماس بین فولاد و بتن می‌شود و در نتیجه لغزش میلگرد، تغییر شکل موضعی و تشکیل ترک را به دنبال دارد. برای این منظور در این مقاله از الگوریتم تماسی `CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID` استفاده شده است.

بحث و بررسی نتایج

اعتبارسنجی مدل عددی

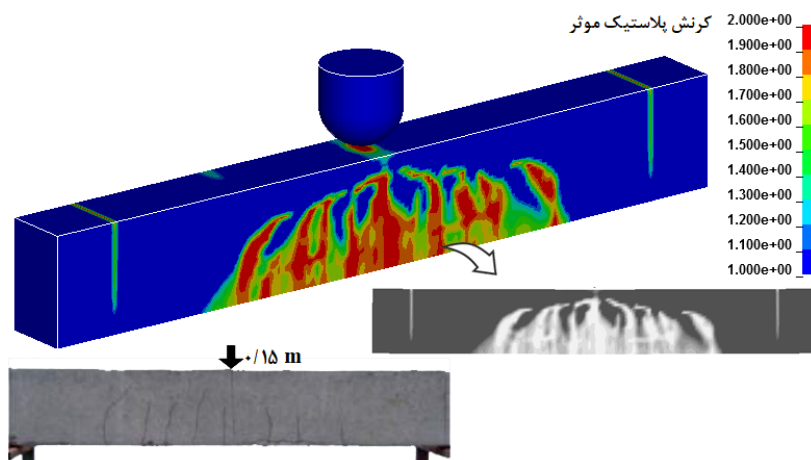
مودهای شکست ایجاد شده در طول آزمایش ضربه سقوط برای نمونه S1616 در شکل ۷ نشان داده شده است. در ارتفاع سقوط $0.15m$ تیرهای بتنی شکست خمشی کلی را نشان می‌دهند. در ارتفاع سقوط کمتر از $1/2m$ شکست موضعی همراه با خرد شدن بتن در نقطه بارگذاری مشاهده می‌شود.



شکل ۷. مودهای شکست تیر بتن مسلح در نمونه S1616

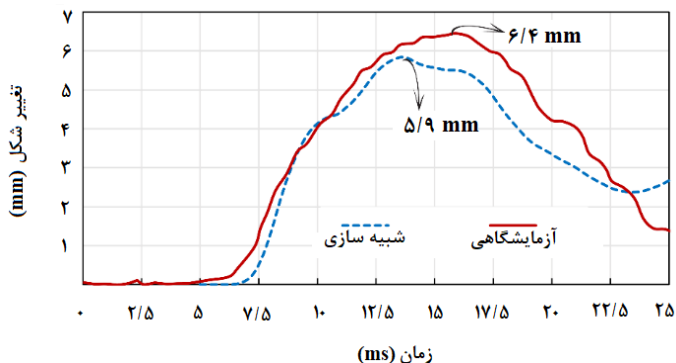
^۱Contact algorithm

شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی عددی را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA برای کرنش پلاستیک مؤثر نمونه بتن مسلح S1616 نشان می‌دهد. همان‌طور که در کانتور کرنش پلاستیک مشاهده می‌شود، مودهای شکست خمشی با نتایج آزمایش ضربه سقوط آزاد در شکل ۷ در ارتفاع $0.15m$ مطابقت دارد.



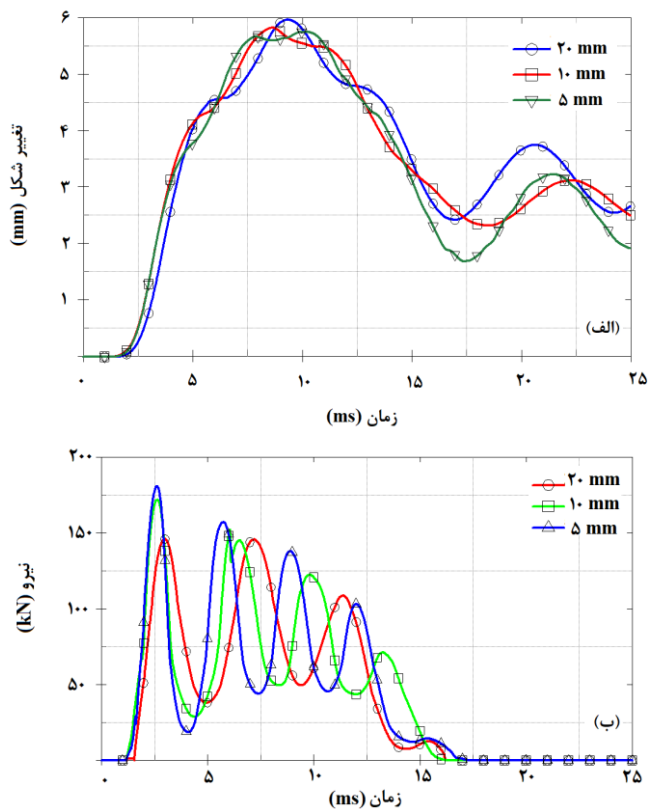
شکل ۸. کرنش پلاستیک مؤثر بتن مسلح؛ نمونه S1616

مقایسه تغییر شکل دهانه میانی تیر بتنی برای آزمایش و مدل عددی در نمونه S1616 با ارتفاع سقوط $0.15m$ در شکل ۹ نشان داده شده است. روند نمودار تغییر شکل تیر بتن مسلح برای مدل عددی و آزمایش مشابه است. همچنین حداکثر مقدار جابجایی تیر بتنی در آزمایش $6/4mm$ و در شبیه‌سازی عددی $5/9mm$ است. تفاوت حدود $0.15mm$ (کمتر از ۸٪) نشان‌دهنده تطابق خوب بین نتایج به‌دست‌آمده و اعتبارسنجی مدل عددی است.



شکل ۹. تغییر شکل تیر بتنی؛ نمونه S1616

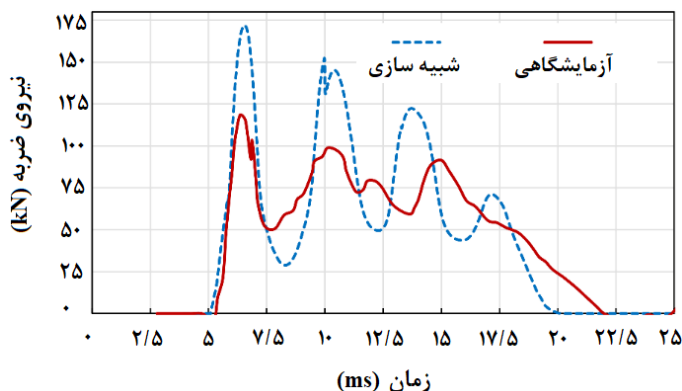
مطالعه همگرایی شبکه‌بندی، برای اندازه‌های المان 5mm ، 10mm و 20mm به ترتیب با تعداد المان‌ها 596512 ، 75902 و 10982 در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور مشاهده می‌شود، بیشینه تغییر شکل دهانه تیر بتن مسلح (شکل ۱۰-الف)، نیروی ضربه (شکل ۱۰-ب) و همچنین روند تغییر نمودارها برای سه اندازه المان مختلف به یکدیگر نزدیک هستند. به همین دلیل برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسبات عددی، در آنالیزها اندازه المان 10mm در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰. همگرایی شبکه‌بندی؛ (الف) تغییر شکل تیر بتن مسلح، (ب) نیروی ضربه

در شکل ۱۱ نیروی ضربه برای آزمایش و مدل المان محدود در نمونه S1616 با ارتفاع سقوط 0.15m نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیروی ضربه با دامنه نوسان زیاد شروع می‌شود و سپس در دامنه نسبتاً کمتر با چندین پیک متوالی در حدود 20ms به صفر می‌رسد. علاوه بر این، تعداد نقاط بیشینه نمودار در مدل عددی با نتایج تجربی مطابقت دارد. شکل ۱۱ اختلافی بین بیشینه نیروی ضربه در مدل‌های عددی و تجربی را نشان می‌دهد و این بدین دلیل است که مطابق شکل ۳ هندسه ضربه زنده مورد استفاده در آزمایش سقوط آزاد

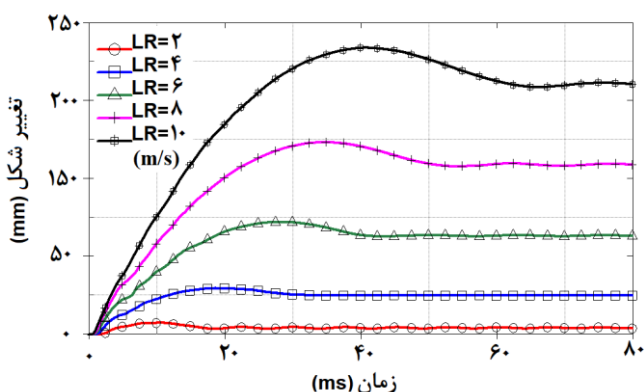
چکش در مقایسه با مدل عددی دقیقاً نیمکره‌ای با شعاع 90 mm نمی‌باشد و در شبیه‌سازی سعی شده است نزدیک‌ترین هندسه به مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شود.



شکل ۱۱. نیروی ضربه برای آزمایش و مدل المان محدود؛ نمونه S1616

اثر نرخ بارگذاری^۱

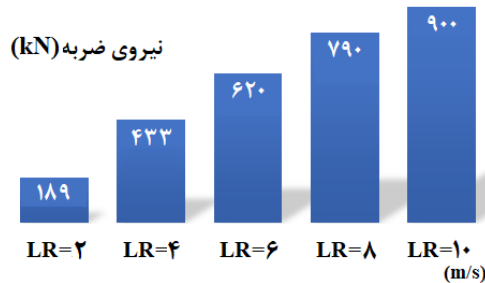
پس از اعتبارسنجی مدل عددی با نتایج تجربی، مطالعه پارامتری برای بررسی اثر نرخ بارگذاری انجام شده است. برای مشاهده رفتار متفاوت نمونه S1616، نرخ بارگذاری از کمترین تا بیشترین مقدار 2 m/s ، 4 m/s ، 6 m/s ، 8 m/s و 10 m/s در نظر گرفته شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود تغییر شکل دهانه میانی تیر بتن مسلح می‌بایست با رشد نرخ بارگذاری افزایش یابد. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که حداکثر تغییر شکل خمشی در نرخ بارگذاری 10 m/s با 184 mm رخ می‌دهد.



شکل ۱۲. جابجایی دهانه میانی تیر بتن مسلح در نرخ‌های بارگذاری مختلف

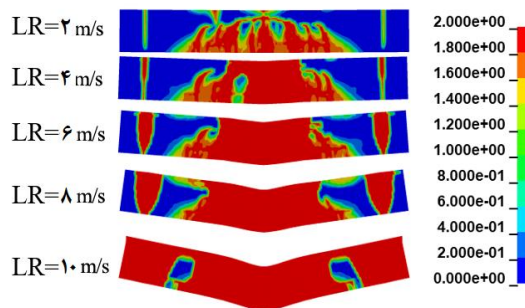
^۱Loading rate (LR)

حداکثر نیروی ضربه تحت شرایط بارگذاری مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با افزایش تدریجی نرخ بارگذاری از 2 m/s به 10 m/s نیروی ضربه نیز به ترتیب از 189 kN به 900 kN افزایش یافته است.



شکل ۱۳. بیشینه نیروی ضربه در نرخ‌های بارگذاری مختلف

همان‌طور که انتظار می‌رود، کانتور کرنش پلاستیک بتن مؤثر در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که حداقل و حداکثر کرنش خمشی به ترتیب در نرخ بارگذاری 2 m/s و 10 m/s رخ می‌دهد.



شکل ۱۴. کرنش پلاستیک مؤثر (مودهای شکست خمشی) بتن در نرخ‌های بارگذاری مختلف

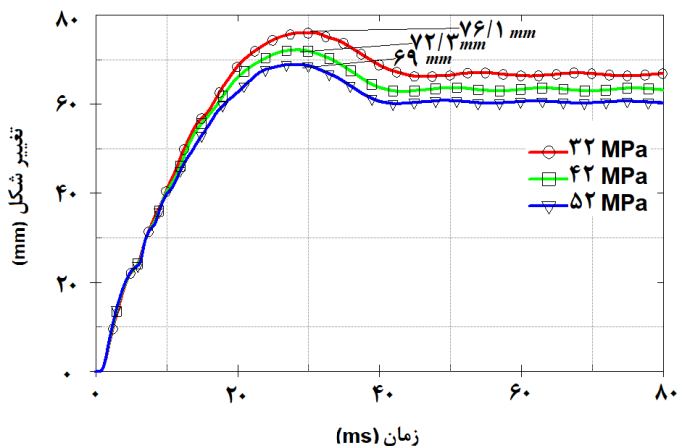
تأثیر مقاومت فشاری بتن

همان‌طور که در شکل ۱۵ و جدول ۶ نشان داده شده است، با افزایش مقاومت فشاری تغییر شکل خمشی تیر بتن مسلح کاهش می‌یابد. به ازای هر 10 MPa افزایش مقاومت فشاری بتن (از 32 MPa ، 42 MPa و 52 MPa)، جابجایی دهانه مرکزی به میزان تقریبی 10% کاهش یافته است.

جدول ۶. مقایسه مدل‌ها در نرخ بارگذاری‌ها و مقاومت‌های فشاری متفاوت

مدل	نرخ بارگذاری (m/s)	مقاومت فشاری (MPa)	تغییر شکل (mm)	بیشینه نیروی ضربه (kN)
	LR	S_c	δ	IF_{max}

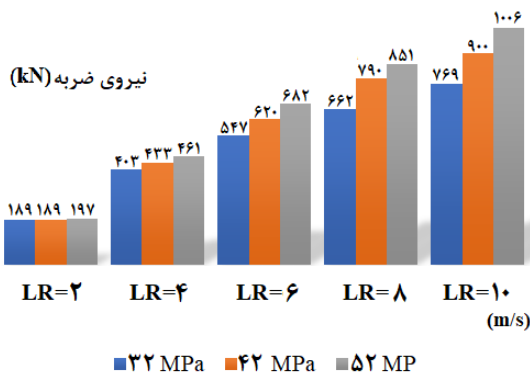
۱۲۰ (آزمایشگاهی)	۶/۴ (آزمایشگاهی)	۴۲	۱/۷۵۱	S۱۶۱۶
۱۷۰ (شبیه‌سازی)	۵/۹ (شبیه‌سازی)			
۱۸۹	۷/۷		۲	C۲S۳۲
۴۰۳	۳۲		۴	C۴S۳۲
۵۴۷	۷۶/۱	۳۲	۶	C۶S۳۲
۶۲۲	۱۲۷		۸	C۸S۳۲
۷۶۹	۱۸۸		۱۰	C۱۰S۳۲
۱۸۹	۷/۴۱		۲	C۲S۴۲
۴۳۳	۲۹/۷		۴	C۴S۴۲
۶۲۰	۷۲/۳	۴۲	۶	C۶S۴۲
۷۹۰	۱۲۴		۸	C۸S۴۲
۹۰۰	۱۸۴		۱۰	C۱۰S۴۲
۱۹۷	۷/۱۶		۲	C۲S۵۲
۴۶۱	۲۷/۶		۴	C۴S۵۲
۶۸۲	۶۹	۵۲	۶	C۶S۵۲
۸۵۱	۱۲۱		۸	C۸S۵۲
۱۰۰۶	۱۸۱		۱۰	C۱۰S۵۲



شکل ۱۵. تغییر شکل نقطه میانی بتن در مقاومت‌های فشاری مختلف

نیروی ضربه بتن با مقاومت فشاری پایین (32 MPa)، مقاومت فشاری متوسط (42 MPa) و مقاومت فشاری بالا (52 MPa) در نرخ‌های بارگذاری مقدار 2 m/s ، 4 m/s ، 6 m/s ، 8 m/s و 10 m/s مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۶ و جدول ۵ مشخص است، در شرایط نرخ بارگذاری پایین (2 m/s)، مقاومت فشاری بتن تأثیر کمی برای پاسخ ضربه داشته است و نیروی ضربه در هر ۳ وضعیت مختلف مقاومت فشاری تقریباً یکسان است. با افزایش نرخ

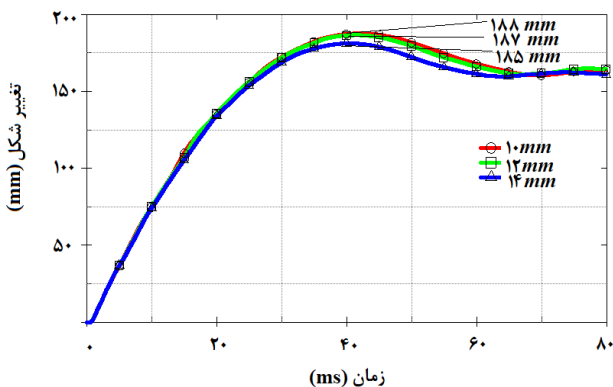
بارگذاری نیروی ضربه، تغییرات قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن اتفاق می افتد. در نرخ بارگذاری 10 m/s برای مقاومت فشاری پایین (32 MPa) تا مقاومت فشاری بالا (52 MPa) نیروی ضربه حدود 31% افزایش یافته است.



شکل ۱۶. نیروی ضربه در مقاومت‌های فشاری و نرخ‌های بارگذاری مختلف

تأثیر قطر میلگردها

در این بخش تأثیر به کارگیری میلگردهای تیر بتنی مسلح را برای سه وضعیت قطر مختلف 10 mm ، 12 mm و 14 mm برای شرایط بحرانی با بیشترین مودهای شکست خمشی یعنی برای مقاومت فشاری 32 MPa و نرخ بارگذاری 10 m/s ارزیابی شده است. مطابق شکل ۱۷ برای سه حالت مختلف نتایج بسیار نزدیک به هم هستند؛ بنابراین تقویت قطر میلگردهای مسلح کننده تأثیر ناچیزی بر پاسخ ضربه سقوط آزاد دارد.



شکل ۱۷. تغییر شکل نقطه میانی بتن در میلگردهای با قطر مختلف

نتیجه گیری

در این پژوهش بر اساس تست آزمایشگاهی و مدل سازی عددی، مودهای شکست خمشی تیر بتن مسلح تحت ضربه سقوط آزاد چکش استخراج شده است؛ لذا یک مدل عددی غیرخطی المان محدود برای پیش بینی مودهای شکست خمشی تیر بتن مسلح با استفاده از نرم افزار مهندسی پیشرفته LS DYNA توسعه یافته است. در

تحلیل‌های سه‌بعدی، سرعت محاسبات عددی مدل معرفی شده در پژوهش حاضر در مقایسه با آنالیزهای عددی دیگر محققان به طور قابل توجهی بیشتر است. مدل رفتاری ماده به کار گرفته شده برای بتن می‌تواند رفتار فشاری و کششی را در نرخ کرنش‌های متفاوت و همچنین الگوی شکل‌گیری ترک‌ها را به دقت توصیف نماید. مدل عددی توسعه یافته می‌تواند به‌عنوان ابزار دقیق با هدف کاهش هزینه‌های آزمایش‌های مخرب مورد استفاده قرار گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشینه تغییر شکل دهانه میانی تیر در آزمایش و شبیه‌سازی عددی کمتر از ۸٪ اختلاف دارند که این نشانگر تطابق خوب نتایج به‌دست‌آمده است. همچنین اعتبار مدل عددی از مقادیر کرنش پلاستیک مؤثر تیر بتن مسلح (نمونه S1616) در ارتفاع سقوط 0.15 m برای الگوهای ترک شکل‌گرفته تأیید شده است. مدل عددی این مقاله را می‌توان جهت توسعه مطالعه پارامتری شامل انواع ارتفاع سقوط، آرایش میلگردهای طولی و ... برای ارزیابی مودهای شکست تیرهای بتن مسلح استفاده نمود. مطالعه پارامتری در ۵ نرخ بارگذاری متفاوت 2 m/s ، 4 m/s ، 6 m/s ، 8 m/s و 10 m/s برای نمونه تیرهای بتنی با مقاومت فشاری 32 MPa ، 42 MPa و 52 MPa انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد:

- ۱- جابجایی دهانه میانی به ازای هر 10 MPa افزایش مقاومت فشاری بتن، ۱۰٪ کاهش می‌یابد.
- ۲- مقاومت فشاری بتن در نرخ بارگذاری پایین (2 m/s) تأثیر قابل توجهی بر نیروی ضربه ندارد.
- ۳- نیروی ضربه در نرخ بارگذاری 10 m/s برای مقاومت فشاری کم (32 MPa) تا زیاد (52 MPa)، تقریباً ۳۱٪ افزایش می‌یابد.
- ۴- افزایش قطر میلگردهای فولادی بر پاسخ ضربه سقوط آزاد بتن در بحرانی‌ترین شرایط ضربه (مقاومت فشاری 32 MPa و نرخ بارگذاری 10 m/s) بر بیشینه تغییر شکل بتنی مسلح تأثیر ناچیزی دارد.

فهرست علائم

A_s	سطح مقطع میلگرد mm^2
RM	مقاومت خمشی میلگرد kN
RS	مقاومت برشی میلگرد kN
D	قطر میلگرد mm
a_0, a_1, a_2	ثابت تست فشاری سه‌محوری
p	فشار محدودکننده بتن در سطح شکست MPa
$\Delta\sigma_m$	تنش بتن در حداکثر سطح شکست MPa
$\Delta\sigma_y$	تنش بتن در سطح شکست تسلیم MPa
$\Delta\sigma_r$	تنش بتن در سطح شکست پسماند MPa
$\Delta\sigma_e$	تنش بتن در سطح شکست پیشرفته MPa
r_f	ضریب افزایش مقاومت بتن
f_h	عملکرد سخت‌شدگی
ε_{eff}^p	کرنش پلاستیک مؤثر
σ_0	تنش تسلیم اولیه MPa

سختی MPa	E
سختی مماسی MPa	E_t
نرخ کرنش	$\dot{\epsilon}$
سختی پلاستیک	E_p
چگالی g/cm^3	ρ
پارامتر نرخ کرنش	β
نسبت پواسون	ν

References

- [1] Moharrer, A., Gholhaki, M., Rezaeifar, O., & Kheyroddin, A. (2021). *Examining the Impact of Magnetic Field on Compressive Strength of Cement Paste with Quartz Aggregate and Zeolite*. Karafan Quarterly Scientific Journal, 18(Special Issue 1), 151-166. (in Persian) <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.132815>
- [2] Ahani, G. (2022). *Optimization of Coefficients of FRP-Confined Concrete Columns Compressive Strength Estimation Models using Whale Algorithm*. Karafan Quarterly Scientific Journal, 19(3), 433-460. (in Persian) <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.329031.2003>
- [3] Fang, C., Rasmussen, J. D., Bielenberg, R. W., Lechtenberg, K. A., Faller, R. K., & Linzell, D. G. (2021). *Experimental and numerical investigation on deflection and behavior of portable construction barrier subjected to vehicle impacts*. Engineering Structures, 235, 112071. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112071>
- [4] Peyman, S., & Heydari Digesara, P. (2020). *Investigation of crack propagation behavior of impact-resistant functionally graded concrete*. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 51(6), 1111-1128. (in Persian) <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14226.5618>
- [5] Abadel, A., Abbas, H., Siddiqui, N., Elsanadedy, H., Almusallam, T., & Al-Salloum, Y. (2023). *Numerical investigation of projectile impact behavior of hybrid fiber-reinforced concrete slabs*. Case Studies in Construction Materials, 19, e02533. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02533>
- [6] Day, K. W. (2006). *Concrete mix design, quality control and specification*. CRC press. <https://doi.org/10.4324/9780203967874>
- [7] Dalvand, A., & Sivandipour, A. (2015). *Assessment of Statistical Variations in Experimental Impact Resistance and Energy Absorption of High Strength Concrete*. Experimental Research in Civil Engineering, 2(4), 133-141. (in Persian)
- [8] Reddy, A. R., Sreenivasappa, N. M., Prabhakara, R., & Reddy, H. J. (2020). Effect of Steel Ratio on Dynamic Response of HSC Two Way Slab Strengthened by Entrenched CFRP Strips Using Drop Test. In *Recent Trends in Civil Engineering: Select Proceedings of ICRTICE 2019* (pp. 157-173). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5195-6_12
- [9] Fujikake, K., Senga, T., Ueda, N., Ohno, T., & Katagiri, M. (2006). *Study on impact response of reactive powder concrete beam and its analytical model*. Journal of advanced concrete technology, 4(1), 99-108. <https://doi.org/10.3151/jact.4.99>

- [10] Mollaei, S., Babaei, M., & JalilKhani, M. (2021). *Assessment of damage and residual load capacity of the normal and retrofitted rc columns against the impact loading*. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 9(1), 29-51. <https://doi.org/10.22075/jrce.2020.20000.1394>
- [11] Cai, B., Lu, S., & Fu, F. (2024). *Behavior of steel fiber-reinforced coal gangue concrete beams under impact load*. Engineering Structures, 314, 11830. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118306>
- [12] Zhang, Y., Cheng, X., Diao, M., Li, Y., Guan, H., & Sun, H. (2023). *FRP retrofit for RC frame substructures against progressive collapse: Scheme optimisation and resistance calculation*. Engineering Structures, 289, 116289. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116289>
- [13] Sun, J.-M., Chen, H., Yi, F., Ding, Y.-B., Zhou, Y., He, Q.-F., Zhang, W.-X., & Yi, W.-J. (2024). *Experimental and numerical study on influence of impact mass and velocity on failure mode of RC columns under lateral impact*. Engineering Structures, 314, 118416. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118416>
- [14] Zhou, Y., Cheng, X., Li, Y., & Liu, F. (2023). *Simplified numerical model for the collapse analysis of RC frame under oblique impact*. Magazine of Concrete Research, 76(3), 159-175. <https://doi.org/10.1680/jmacr.23.00046>
- [15] Khomami Abadi, M., & Alijani, A. (2018). *A new approach to finite element modeling of crack in RC beams*. Concrete Research, 11(2), 51-65. (in Persian) <https://doi.org/10.22124/jcr.2018.7577.1197>
- [16] Fujikake, K., Li, B., & Soeun, S. (2009). *Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation*. Journal of structural engineering, 135(8), 938-950. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.000003](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000003)
- [17] Miyagawa, T., Morikawa, H., Otsuki, N., Miyamoto, A., Eguchi, K., Hamada, H., Hattori, A., Harada, T., Inoue, S., & Kaneko, Y. (2003). *STANDARD SPECIFICATION FOR CONCRETE STRUCTURES, -2001 "MAINTENANCE"*. 대한토목학회 학술대회, 5629-5640.
- [18] Standard, A. (2009). *C150: Standard Specification for Portland Cement*. Annual Book of ASTM Standards.
- [19] Sukontasukkul, P., Komkham, S., Jamnam, S., Zhang, H., Fujikake, K., Puttiwongrak, A., & Hansapinyo, C. (2024). *Eco-friendly 3D Printing Mortar with Low Cement Content: Investigation on Printability and Mechanical Properties*. Civil Engineering Journal, 10(03). <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-03-010>
- [20] Hosaini, H., & Khalilzadeh Vahidi, E. (2023). *Numerical Study of the Seismic Behavior of a Composite Shear Wall Consisting of Steel Sheet and Reinforced Concrete Cover*. Karafan Quarterly Scientific Journal, 20(1), 389-408. (in Persian) <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.324473.1941>
- [21] Hallquist, J. O. (2007). *LS-DYNA keyword user's manual*. Livermore software Technology corporation, 970, 299-800.
- [22] Malvar, L. J., Crawford, J. E., Wesevich, J. W., & Simons, D. (1997). *A plasticity concrete material model for DYNA3D*. International journal of impact engineering, 19(9-10), 847-873. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)00023-7)
- [23] Kumar, P., & Srivastava, G. (2018). *Effect of fire on in-plane and out-of-plane behavior of reinforced concrete frames with and without masonry infills*. Construction and Building Materials, 167, 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.116>

- [24] Nam, J.-W., Kim, H.-J., Kim, S.-B., Yi, N.-H., & Kim, J.-H. J. (2010). *Numerical evaluation of the retrofit effectiveness for GFRP retrofitted concrete slab subjected to blast pressure*. *Composite Structures*, 92(5), 1212-1222. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.031>
- [25] Cuong, N. H., An, H., Han, T.-V., An, S., Shin, J., & Lee, K. (2024). *Structural test and FEM analysis of a thermal bridge connection employing the UHPC system for concrete cladding wall*. *Results in Engineering*, 22, 102191. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102191>
- [26] Reifarth, C., Castedo, R., Santos, A., Chiquito, M., López, L., Pérez-Caldentey, A., Martínez-Almajano, S., & Alañón, A. (2021). *Numerical and experimental study of externally reinforced RC slabs using FRPs subjected to close-in blast loads*. *International journal of impact engineering*, 156, 103939. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103939>