

چکیده

در مقاله حاضر میزان دقت الگوریتم دینامیکی صریح (Explicit) برای تحلیل سازه‌ها در برابر بارهای شدید (Severe Loading) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این ارزیابی، سه نمونه دال بتنی به ابعاد $750 \times 750 \times 30$ ، $1000 \times 1000 \times 40$ و $1250 \times 1250 \times 50$ میلیمتر در برنامه اجزای محدود ANSYS LS-DYNA تحت دو نوع بارگذاری انفجاری با فواصل مقیاس شده $0/518$ و $0/591 \text{ m/kg}^{1/3}$ قرار داده شده، میزان دقت تحلیل دینامیکی با نتایج آزمایشهای انجام شده به صورت کمی و کیفی مقایسه و بحث شده است. از بین موارد تأثیرگذار بر نتیجه تحلیل، اندازه المان به عنوان متغیر، ملحوظ و تابع میزان خطای تحلیل بر اساس فاصله مقیاس شده و اندازه دال به دست آورده شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که مقدار تغییر شکل حداکثر، شعاع ناحیه خردشدگی بتن و حجم ترکها در دال‌های بزرگتر نسبت به دال‌های کوچکتر در فاصله مقیاس شده مساوی، بیشتر است و نتایج مدلسازی عددی برای تغییر مکان حداکثر و شعاع خردشدگی بتن برای همه دال‌ها بیشتر از نتایج حاصل از آزمایشهاست. همچنین، مدل عددی در نظر گرفته شده با تحلیل دینامیکی غیردرگیر برای انفجار با فاصله مقیاس شده بیشتر (بار انفجار کمتر) از دقت بیشتری برخوردار است.

کلمات کلیدی: رویکرد صریح، تحلیل دینامیکی غیردرگیر، مدل اجزای محدود، مدل آزمایشگاهی

بررسی روش آنالیز دینامیکی با رویکرد صریح در بارگذاریهای شدید (مطالعه موردی بر روی سه نمونه دال بتنی)

محمد بحیرایی (نویسندهٔ مسؤول)

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - زلزله، دانشگاه رازی
mbahirai@gmail.com

مهنوش بیگلری

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی

ایمان عشایری

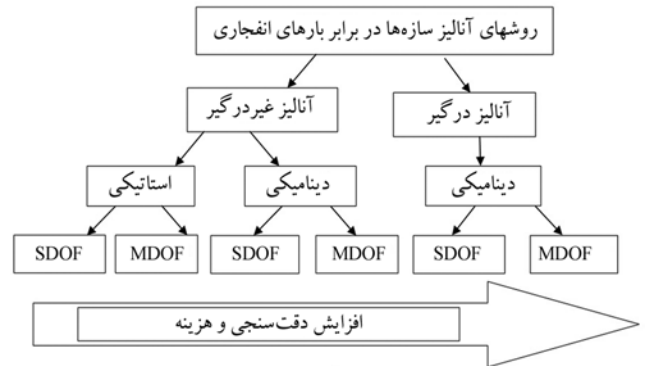
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی

1- مقدمه

می‌آورند. از محتمل‌ترین انواع این بارها می‌توان به بارگذاری ضربه، انفجار، زلزله‌های چند جهته و بسیار نزدیک به گسل نام برد. از بین این بارها، انفجار و زلزله اهمیت ویژه‌ای دارند و از جنبه‌هایی در مراجع با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در مواجهه با سازه‌های تحت بارگذاری انفجاری معمولاً دو نوع تحلیل درگیر و غیردرگیر جد دارد که روش تحلیل درگیر علی‌رغم دقت مطلوب به دلیل سختی، زمانبر بودن و محدودیت حافظه‌های جانبی، فرضیات ساده‌کننده‌ای را به تحلیل اجبار می‌کند و نتیجه‌گیری کلی از خروجیها را به چالش می‌کشد. طبق مدل پیشنهادی وینجت [1] میزان دقت و سختی این روشها مطابق مقایسه ارائه شده در شکل (1) قابل بیان است.

برای حل عددی مسائل دینامیکی دو رویکرد ضمنی (Implicit) و صریح مورد استفاده قرار می‌گیرند. رویکرد ضمنی برای بارگذاریهای شدید موجب قفل‌شدگی (Locking) تحلیل می‌شود و برای رفع آن باید بازه زمانی را بزرگتر گرفت که این باعث خطا در مدل عددی اجزای محدود می‌شود و زمان رخداد بیشینه پاسخ سیستم به درستی مشخص نمی‌شود. به این علت، در تحلیل سازه‌ها تحت بارگذاریهای شدید عموماً رویکرد صریح ترجیح داده می‌شود. در این رویکرد، نتایج تحلیل در انتهای بازه زمانی بدون تکرار برای زمانهای بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بارهای شدید (Severe Loads) به بارهایی اطلاق می‌شود که از نظر بزرگ و زمان تداوم نسبت به بارهای معمولی حالات مخرب‌تری برای سازه به وجود



شکل (1): مقایسه روشهای مختلف تحلیل سازه‌ها تحت بارگذاری انفجاری [1]

تحت روابط نوشته شده در فضای برنامه MATLAB بررسی کرده‌اند. در گانچ و سیگموند [7] با در نظر گرفتن فازهای مثبت و منفی در بارگذاری انفجاری، یک سازه فرضی را در برنامه SAP2000 مورد تحلیل دینامیکی غیر درگیر قرار داده و روش تحلیل بکار رفته در برنامه را به عنوان یک روش کارآمد در تحلیل سازه‌ها پیشنهاد کرده‌اند. نایت [8] برای تحلیل یک قاب فولادی در برنامه S-FRAME بارهای انفجاری از یک منبع انفجار را به صورت دینامیکی و متمرکز بر محل‌های اتصال وارد کرده، مواردی مانند تغییر شکل جانبی قاب در مدهای مختلف سازه در میرایی‌های مختلف گزارش داده است.

لازم به ذکر است که تحلیل‌های استاتیکی چند درجه آزادی نیز توسط برخی محققان استفاده شده است. به عنوان مثال، بیگری و همکاران [9] یکی از پلهای موجود در فهرست پلهای ملی ایالات متحده (National Bridge Inventory, NBI) را تحت تحلیل غیردرگیر استاتیکی در برنامه ANSYS مدل کرده، آثار خرابی این پل را برای محل‌های مختلف بارگذاری انفجاری ارزیابی کرده‌اند. همچنین انوارال [10] یکی از پلهای تپ اشتر را در برنامه STAAD-pro تحلیل کرده، برای اعضای مختلف پل نسبت‌های تقاضا به ظرفیت را به دست آورده است.

تحلیل دینامیکی غیردرگیر اصولاً با الگوریتم صریح انجام می‌شود و لازم است میزان دقت و کارآمدی این تحلیل مورد بررسی قرار گیرد تا اولاً، پیش از انجام تحلیل سازه میزان صحت نتایج در نظر باشد. ثانیاً، تأثیر اندازه اعضا به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در انتخاب بازه زمانی حل در مدل اجزای محدود صریح، بدرستی مشخص شود. به این منظور در این مقاله، سه نمونه دال بتنی تحت انفجارهای مختلف در برنامه ANSYS LS-DYNA به شکل صریح با اندازه‌های مختلف اعضا تحلیل شده است تا پس از مقایسه با آزمایش‌های انجام شده قبلی درستی آزمایشی روش انجام پذیرد. به این ترتیب برای حل سازه‌های سنگین می‌توان با توجه به فاصله اعضا از محل انفجار اندازه مناسب اعضا را انتخاب کرد و مدلسازی تمامی حالات بارهای محتمل را با کاهش زمان حل و دقت لازم تسهیل نمود.

2- الگوریتم صریح حل مسائل دینامیکی

رابطه تعادل سازه تحت بارگذاری انفجاری عبارت است از:

شکل (1) نشان می‌دهد که روشهای تحلیل درگیر یک درجه آزادی (Single Degree Of Freedom) و چند درجه آزادی (Multiple Degrees Of Freedom, MDOF) نسبت به روشهای غیردرگیر از دقت بیشتری برخوردارند؛ اما این تحلیل‌ها نسبت به تحلیل غیر درگیر چند درجه آزادی پرهزینه‌تر و پیچیده‌تر می‌باشند؛ لذا یکی از روشهای پر کاربرد در تحلیل سازه‌ها، تحلیل دینامیکی غیردرگیر چند درجه آزادی است و تعداد زیادی از محققان از این روش برای مدلسازی سازه‌های پیچیده و ساده استفاده کرده‌اند. وی و همکاران [2] و [3] در یک بررسی عددی با استفاده از امکانات برنامه اجزای محدود ABAQUS ابتدا یک مدل رفتاری برای بتن مسلح را بر روی یک نمونه دال بتنی به صورت دینامیکی غیردرگیر راستی‌آزمایی کرده، سپس با استفاده از این مدل رفتاری و تحلیل دینامیکی در نرم‌افزار برای اجزای مختلف یک پل قوسی، مدل خسارت ارائه کرده‌اند. سوتار و فو [4] برای مقایسه بار زلزله و بارهای طراحی مرده و زنده با بار انفجار ابتدا با استفاده از برنامه AT-BLAST فشار ناشی از انفجار مقادیر مختلف TNT را به دست آورده‌اند و سپس با استفاده از برنامه SAP2000 این بارها را به صورت فشار معادل بر عرشه یک پل معلق اعمال و گسیختگی پیشرونده را در عرشه پل با توجه به روند تشکیل مفاصل خمیری در طول بارگذاری بررسی و گزارش کرده‌اند. وینجت و همکاران [5] با استفاده از برنامه BLASTX فشار ناشی از انفجار را تعیین کرده‌اند و سپس در برنامه SPAN32 اعضای یک پل را به عنوان اعضای یک درجه آزادی معادل در نظر گرفته و تحلیل کرده‌اند.

ون در میر [6] رفتار یک ساختمان بلند مرتبه را تحت اثر بارهای انفجاری و به صورت سازه‌های یک درجه آزادی و چند درجه آزادی

$$\dot{q}\left(t + \frac{Dt}{2}\right) = \frac{2 - c(t)Dt}{2 + c(t)Dt} \dot{q}\left(t - \frac{Dt}{2}\right) + \frac{2Dt}{m_{ii}(2 + c(t)Dt)} (f_{ext_i}(t) - f_{int_i}(t)) \quad (6)$$

در رابطه بالا، $f_{int_i}(t)$ نیروی داخلی و $f_{ext_i}(t)$ نیروی اعمالی خارجی در لحظه t بر درجه آزادی i است. بزرگترین مقدار ویژه یک ماتریس همواره از هر ترم ماتریس کوچکتر است:

$$\omega_i \leq \frac{1}{m_{ii}} \sum_{j=1}^N |K_{ij}| \quad (7)$$

با جایگزینی رابطه (5) در رابطه (7)، رابطه (8) به دست می‌آید:

$$m_{ii} \geq \frac{1}{4} Dt^2 \sum_{j=1}^N |K_{ij}| \quad (8)$$

ضریب میرایی در رابطه (6) را می‌توان از رابطه (9) به دست آورد:

$$\nu = 1 = \frac{c}{2\omega_0} \quad (9)$$

در این رابطه، ω_0 ، c و ν به ترتیب کوچکترین فرکانس ویژه سیستم، ضریب میرایی و کاهش میرایی هستند. کوچکترین فرکانس اصلی سیستم اجزای محدود را می‌توان از تقریب خارج قسمت رایلی (Rayleigh's Quotient) به دست آورد [11]:

$$\omega_0 \leq \frac{q(t)^T K q(t)}{q(t)^T M q(t)} \quad (10)$$

با در نظر گرفتن روابط (9) و (10)، رابطه (11) برای ضریب میرایی در لحظه t به دست می‌آید:

$$c(t) = 2 \sqrt{\frac{q(t)^T K q(t)}{q(t)^T M q(t)}} \quad (11)$$

در این تحقیق اندازه اعضا به عنوان متغیر گرفته شده و انتخاب بازه زمانی مناسب با توجه به اندازه‌های داده شده به برنامه واگذار شده است.

3- تشریح مدل آزمایشگاهی

ونگ و همکاران [12] برای ارزیابی تأثیر اندازه دال بتنی بر میزان خرابی حاصل در بارگذاری انفجاری، سه نمونه دال بتنی با اندازه‌های داده شده در جدول (1) را تحت دو فاصله مقیاس شده قرار داده‌اند.

مقاومت فشاری بتن مورد استفاده 39/5 مگاپاسکال، مقاومت کششی 4/2 مگاپاسکال و مدول یانگ 28/3 گیگاپاسکال است و

$$M \ddot{q}(t) + C \dot{q}(t) + f_{int} = f_{ext} \quad (1)$$

$$f_{int} = Kq(t) \quad (2)$$

که در آنها $\dot{q}(t)$ ، $\ddot{q}(t)$ و $q(t)$ به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی سیستم، M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و f_{ext} و f_{int} به ترتیب بردارهای نیروهای داخلی مقاوم و نیروهای اعمال شده خارجی هستند. نیروهای داخلی در برگیرنده روابط غیرخطی هندسی و موادند که باید در هر بازه زمانی اصلاح شوند. برخلاف الگوریتم ضمنی که در آن برای به دست آوردن مقدار جابه‌جایی در زمان آینده $(t + Dt)$ نیاز به معکوس نمودن ماتریس سختی است، روش صریح از قانون تعادل و رابطه (1) برای محاسبه جابه‌جایی، سرعت و شتاب استفاده می‌کند که باعث کاهش مدت زمان لازم برای حل مسأله خواهد شد. به این ترتیب در یک مدل اجزای محدود می‌توان برای به دست آوردن بردارهای $\dot{q}(t)$ و $\ddot{q}(t)$ تعداد درجات آزادی و در نتیجه تعداد تقسیمات فضای مورد مطالعه را افزایش داد. به عبارت دیگر، در مدت زمان کمتر، تحلیل دینامیکی را با دقت بیشتری انجام داد. یکی از بهترین روشهایی که در برنامه‌های اجزای محدود در حل مسأله به کار گرفته می‌شود، روش تفاضل مرکزی (Central Difference method) است که در آن مطابق روابط (3) و (4) بردارهای شتاب و سرعت به دست می‌آیند:

$$\dot{q}(t) = \frac{1}{Dt} \left(q\left(t + \frac{Dt}{2}\right) - q\left(t - \frac{Dt}{2}\right) \right) \quad (3)$$

$$\ddot{q}(t) = \frac{1}{Dt} \left(\dot{q}\left(t + \frac{Dt}{2}\right) - \dot{q}\left(t - \frac{Dt}{2}\right) \right) \quad (4)$$

در الگوریتم‌های صریح برای بازه زمانی، محدودیت وجود دارد؛ به طوری که این بازه زمانی بحرانی به فرکانس بیشینه مدل اجزای محدود (کوچکترین عضو) وابسته است و در روش تفاضل مرکزی بازه زمانی باید مطابق رابطه (5) باشد:

$$Dt_{critical} \leq \frac{2}{\omega_{max}} \quad (5)$$

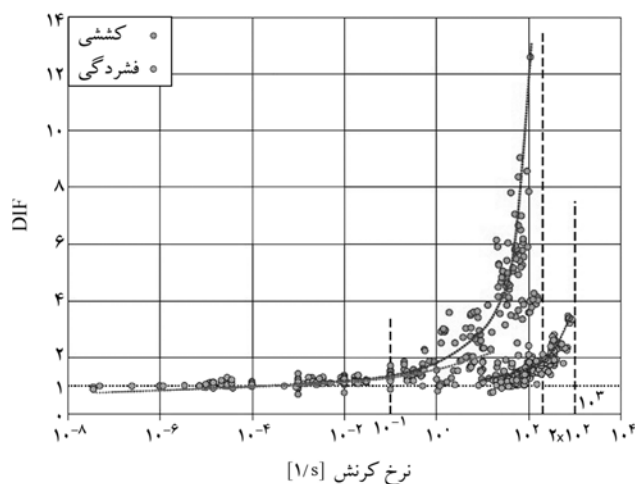
در این رابطه، ω_{max} فرکانس بیشینه مدل اجزای محدود است. با جایگذاری معادلات (3) و (4) در رابطه (1) و در نظر گرفتن $C = cM$ ، رابطه (6) برای حل صریح رابطه حرکت سیستم به دست می‌آید:

4- تشریح مدل اجزای محدود

برای مدل‌سازی عددی دال‌ها از برنامه اجزای محدود ANSYS LS-DYNA استفاده شده است.

4-1- اعضای مورد استفاده و مدل رفتاری مصالح

اعضای بتنی تحت آهنگهای مختلف کرنش، رفتارهای متفاوتی نشان می‌دهند و عموماً با افزایش آهنگ کرنش‌ها، مقاومت اعضا افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت را ضریب افزایش دینامیکی (Dynamic Increase Factor, DIF) می‌نامند. نمودار بتن تحت فشار و کشش مطابق شکل (3) توسط پاژاک [14] ارائه شده است. با توجه به اینکه در بارگذاری انفجاری آهنگ کرنش‌ها در محدوده 0/01 تا 10000 متغیر است [14] و باید مدل رفتاری مناسب با این بازه برای بتن در نظر گرفته شود؛ در این تحقیق از مدل رفتاری ویلت و کوادهوری [13] استفاده شده و ضرایب مربوط به رفتار بتن در نرم‌افزار مطابق با پیشنهادهای این محققان در نظر گرفته شده است. جداول (2) و (3) به ترتیب پارامترهای بتن و پارامترهای خرابی را نشان می‌دهند. معرفی مشخصات به برنامه، مقاومت فشاری بتن برابر مقاومت فشاری در آزمایشها و برابر 39/5 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. بعلاوه ضریب DIF پیشنهادی (Army Corps of Engineering, ACE) برای میلگرد تحت بار انفجاری برابر 1/2 استفاده شده است. همچنین در مدل‌سازی تمامی دال‌های بتن مسلح برای بتن از المان صریح 3D Solid 164 و برای میلگردها از المان صریح Link 167 استفاده شده است.



شکل (3): ضریب افزایش دینامیکی برای بتن تحت آهنگهای کرنش متفاوت [14]

میلگردهای طولی با مقاومت 600 مگاپاسکال و مدول 200 گیگاپاسکال به فاصله 75 میلیمتر در دو طرف دال‌ها با درصد حجمی 1/43 قرار داده شده‌اند.

جدول (1): مقادیر پارامتر رفتاری بتن [13]

مقدار	نماد پارامتر در برنامه	پارامتر مربوط به مدل رفتاری
2400	ρ	چگالی (kg/m^3)
0/19	ν	نسبت پواسون
39/5	f'_c	مقاومت فشاری بتن (Mpa)
58/8	a_0	چسبندگی (Mpa)
0/333	a_1	ضریب سخت‌شوندگی فشاری
1/42	a_2	ضریب سخت‌شوندگی فشاری (E-8)
2/64	a_{0Y}	حد چسبندگی تسلیم (Mpa)
0/75	a_{1Y}	حد تسلیم ضریب سخت‌شوندگی فشاری
3/1	a_{2Y}	حد تسلیم ضریب سخت‌شوندگی فشاری (E-8)
0/39	a_{1F}	حد گسیختگی ضریب سخت‌شوندگی فشاری
1/39	a_{2F}	حد گسیختگی ضریب سخت‌شوندگی فشاری (E-8)
1/25	b_1	پارامتر مقیاس تخریب
4	b_2	پارامتر مقیاس تخریب برای کشش یک محوره
10	b_3	پارامتر مقیاس تخریب برای کشش سه محوره

ماده منفجره مورد استفاده ونگ و همکاران تی‌ان‌تی بوده و جرم آن از 0/13 تا 0/94 کیلوگرم و فاصله آن از 300 تا 500 میلیمتر متغیر در نظر گرفته شده است.

ماده منفجره در وسط و بالای دال‌ها قرار داده شده و از دو طرف مطابق شکل (2) دال‌ها گیردار در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (2): محل قرارگیری ماده منفجره نسبت به دال [12]

$$\alpha = 0.3306Z^4 - 3.1838Z^3 + 11.755Z^2 - 20.308Z + 15.12 \quad (15)$$

$$R_c = \frac{8P_0 + 14P_a}{P_0 + 7P_a} \quad (16)$$

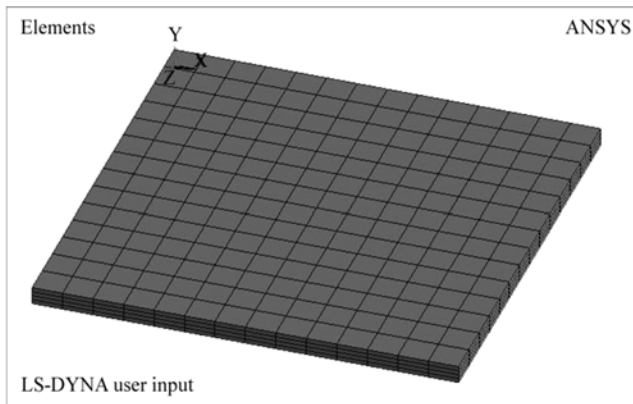
در روابط ذکر شده، W جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم، Z فاصله مقیاس شده مطابق رابطه (17) بر حسب $(m/kg^{1/3})$ و P_a فشار اتمسفر است [2]:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (17)$$

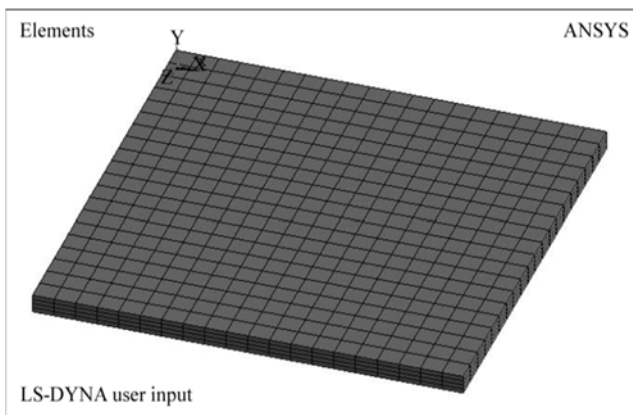
در رابطه (17)، R فاصله المان بر حسب متر است.

3- شبکه بندی

برای شبکه بندی از امکان تقسیم بندی دستی نرم افزار استفاده شده است. به این ترتیب که حالات C و D در جدول (1) مبنای مقایسه قرار داده شده است. تعداد اعضا در این تقسیمات از 909 تا 40205 است و در شکل های (4) تا (7) این اعضا نشان داده شده است.



شکل (4): تقسیم دال با ابعاد $40 \times 1000 \times 1000$ میلیمتر به 909 المان



شکل (5): تقسیم دال با ابعاد $40 \times 1000 \times 1000$ میلیمتر به 1805 المان

جدول (3): مقادیر تابع خسارت بتن در برنامه [13]

پارامتر مقیاس تخریب	کرنش پلاستیک مؤثر
$\eta(\lambda)$	$\lambda(E-6)$
0/309	0
0/543	8/62
0/84	21/5
0/975	31/4
1	395
0/79	517
0/63	638
0/469	798
0/383	967
0/247	1410
0/173	1970
0/136	2590

جدول (4): نتایج دال C در فاصله مقیاس شده 0/591

تعداد المانها	a (متر)	a/A	D_{FEM} (متر)	D_e (متر)	(e)
909	/0714	/0714	0/0199	0/015	32/5
1805	0/050	0/050	0/0183	0/015	22
6605	0/025	0/025	0/0172	0/015	14/7
40205	0/001	0/001	0/0168	0/015	12

2-4- بار گذاری

روشهای اعمال بار گذاری انفجاری بر سازه ها به دو نوع استاتیکی و دینامیکی تقسیم می شوند. در این تحقیق از روابط تجربی دینامیکی استفاده شده است. رابطه (12) مربوط به افزایش فشار دینامیکی وارد بر المانهاست:

$$P_d(t) = R_c P_0 \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-\alpha t/t_d} \quad (12)$$

در رابطه (12)، $P_d(t)$ فشار وارد بر سطح عضو (هر عضو) در لحظه t افزایش فشار نسبت به حالت استاتیکی (رابطه 13)، R_c ضریب انعکاس فشار (رابطه 14)، t_d تداوم بار گذاری انفجاری (رابطه 15) و a یک ثابت مطابق رابطه (16) است:

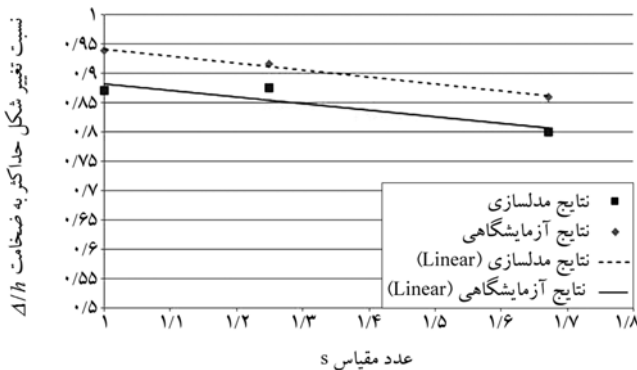
$$P_0 = \frac{808 P_a \left(1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2}} \quad (13)$$

$$t_d = \frac{980 W^{1/3} \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54}\right)^{10}\right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02}\right)^3\right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0.74}\right)^6\right] \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9}\right)^2}} \quad (14)$$

رابطه (18) مبین آن است که با در نظر گرفتن اندازه المان‌های مساوی در یک مدل اجزای محدود، هر اندازه فاصله مقیاس شده کمتر باشد، دقت مدل بیشتر و خطا کمتر می‌شود. به این ترتیب می‌توان گفت که تحلیل غیردرگیر انجام شده برای انفجارهای دورتر دقیق‌تر است و هر اندازه ماده منفجره به سطح عضو نزدیکتر و انفجار تماسی شود، دقت کمتری از آن مورد انتظار است.

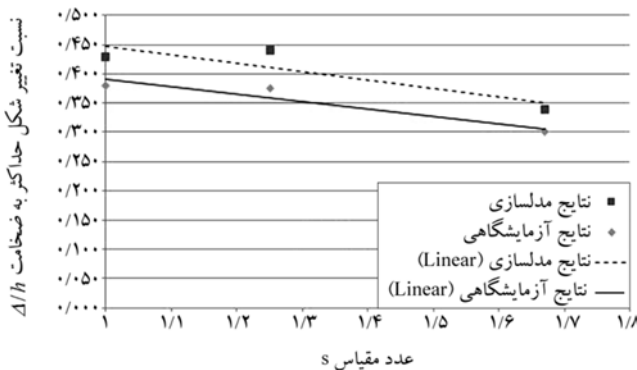
5- تغییر شکل حداکثر دال‌ها

با استفاده از حالت سوم شبکه‌بندی همه دال‌ها در برنامه انجام و تغییر مکان در زمان 0/75 میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (8) و (9) مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای دال‌ها تحت دو فاصله مقیاس شده در برابر عدد مقیاس دیده می‌شود. عدد مقیاس (s) عبارت است از نسبت ابعاد دال مورد نظر به دال با ابعاد 50×1250×1250 که سه مقدار 1/67 و 1/25 و 1 را دارد.



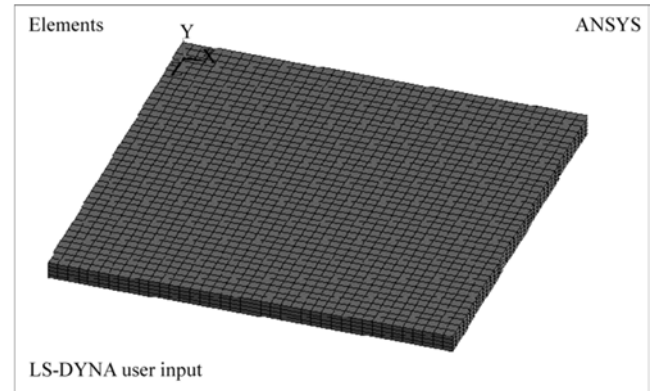
شکل (8): نسبت تغییر شکل حداکثر به ضخامت دال در مقابل عدد مقیاس

برای فاصله مقیاس شده انفجاری 0/591

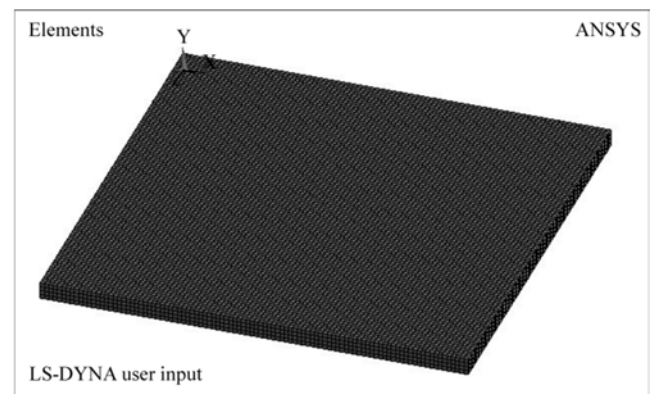


شکل (9): نسبت تغییر شکل حداکثر به ضخامت دال در مقابل عدد مقیاس

برای فاصله مقیاس شده انفجاری 0/518



شکل (6): تقسیم دال با ابعاد 1000×1000×40 میلی‌متر به 6605 المان



شکل (7): تقسیم دال با ابعاد 1000×1000×40 میلیمتر به 40205 المان

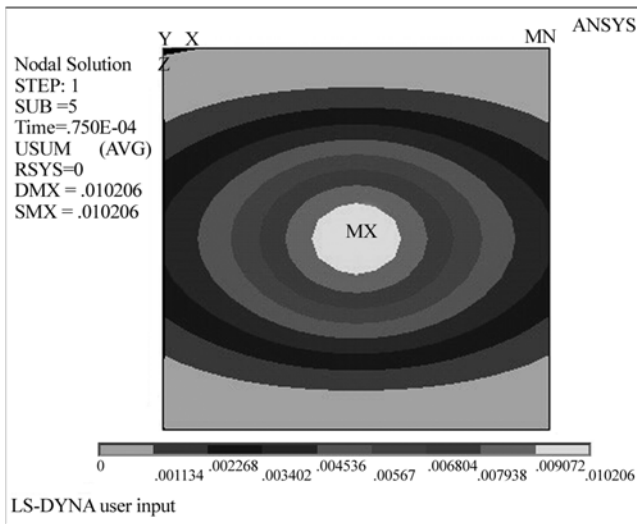
در معیار تغییر شکل با ارائه کانتورهای گره‌ای یکنواخت نتایج مطابق جداول (4) و (5) به دست آمده‌اند. در این جداول، a اندازه المان در جهت جبهه انفجار، a/A اندازه المان به اندازه دال، D_e تغییر شکل حداکثر حاصل از آزمایش، D_{FEM} تغییر شکل حاصل از مدل و e درصد خطاست.

از داده‌های به دست آمده در جداول (4) و (5) می‌توان سطح مناسبی از داده‌ها عبور داد و به رابطه (18) رسید:

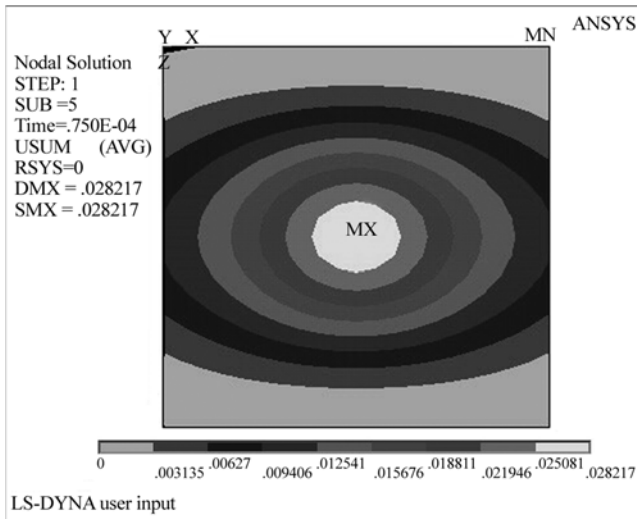
$$e = 0.4772Z^{-0.5869} \left(1 + 13.28 \exp\left(20.35 \frac{a}{A}\right) \right) \quad (18)$$

جدول (5): نتایج دال D در فاصله مقیاس شده 0/518

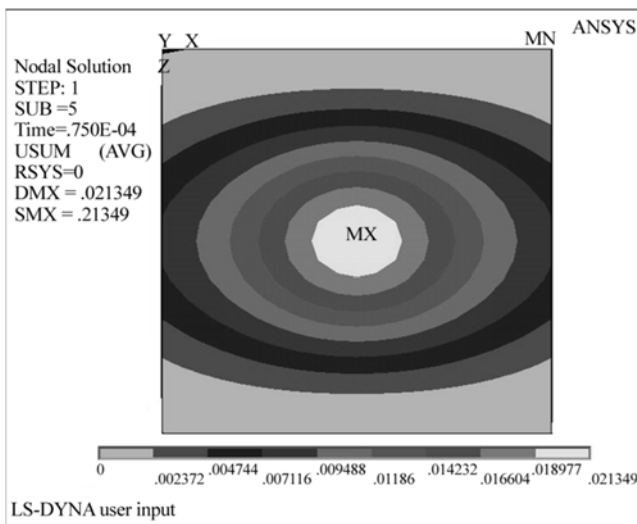
تعداد المان‌ها	a (متر)	a/A	D_{FEM} (متر)	D_e (متر)	e (%)
909	0/0714	0/0714	0/0480	0/035	37/1
1805	0/050	0/050	0/0436	0/035	24/6
6605	0/025	0/025	0/0392	0/035	12
40205	0/001	0/001	0/0384	0/035	9/7



شکل (12): دال با ابعاد $750 \times 750 \times 30$ در فاصله مقیاس شده 0/591



شکل (13): دال با ابعاد $750 \times 750 \times 30$ در فاصله مقیاس شده 0/518



شکل (14): دال با ابعاد $50 \times 1250 \times 1250$ در فاصله مقیاس شده 0/591

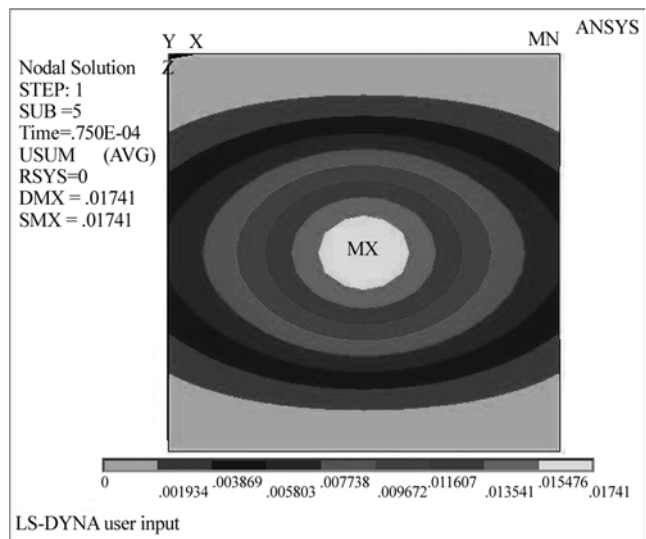
با عبور سطح مناسب از داده‌های آزمایشگاهی و عددی با استفاده از نرم‌افزار MatLab به ترتیب روابط (19) و (20) به دست می‌آیند:

$$\frac{\Delta}{h} = .0802Z^{-6.955} (1 - .8735e^{.0115S}) \quad (19)$$

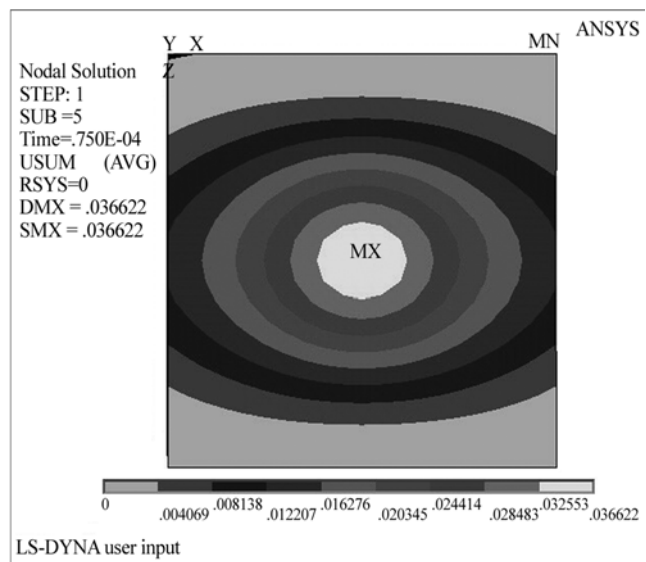
$$\frac{\Delta}{h} = .00842Z^{-6.153} (1 - .7126e^{.1498S}) \quad (20)$$

در روابط بالا، S عدد مقیاس، Δ مقدار تغییر شکل حداکثر دال و h ضخامت دال است.

کانتورهای یکنواخت تغییر شکل دال در برنامه ANSYS LS-DYNA در شکلهای (10) تا (15) نشان داده شده‌اند.

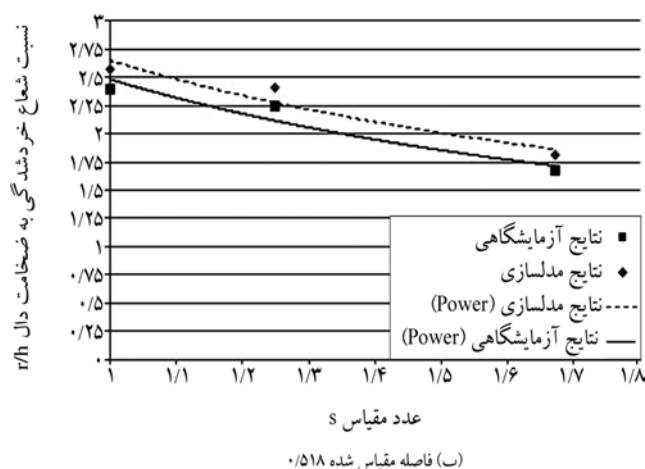
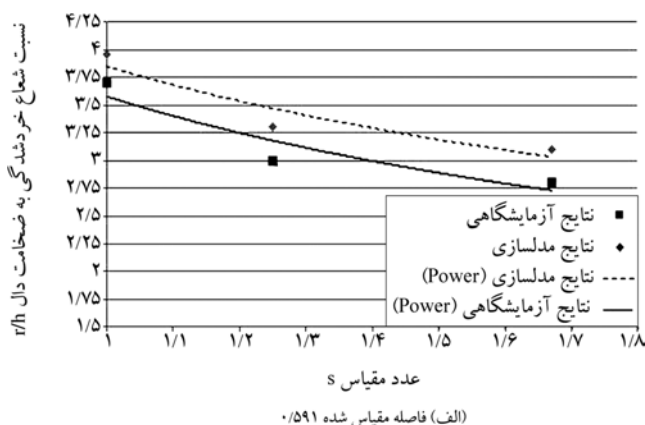


شکل (10): دال با ابعاد $1000 \times 1000 \times 40$ در فاصله مقیاس شده 0/591



شکل (11): دال با ابعاد $1000 \times 1000 \times 40$ در فاصله مقیاس شده 0/518

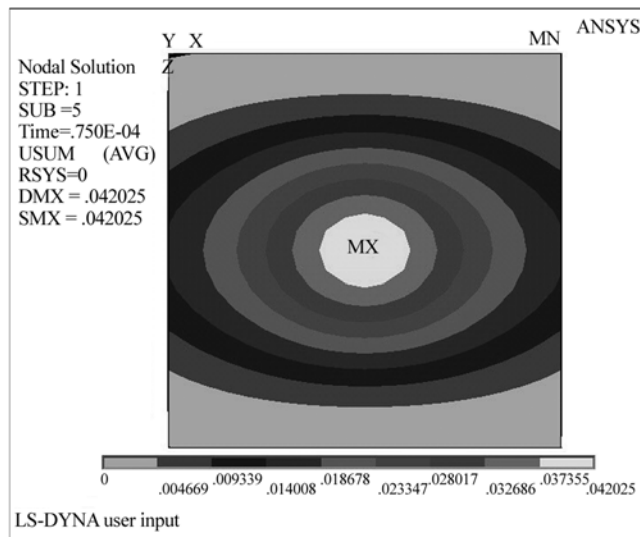
دارد که نزدیکی نمودارها در حالت دورتر این موضوع را اثبات می کند.



شکل (16): نسبت شعاع خردشدگی بتن به ضخامت دال در مقابل عدد مقیاس برای فاصله مقیاس شده

7- گسترش ترک در دال ها

شکلهای (17) و (18) ترکها را در سطح دال ها نشان می دهد. با در نظر گرفتن یک فاصله مقیاس شده دال های بزرگتر از لحاظ اندازه و تعداد ترکها خسارت بیشتری متحمل شده اند. در نزدیکی محل انفجار خردشدگی بیشتر و ترکهای بیشتری دیده می شود که با طبیعت بارگذاری انفجاری همخوانی دارد و هر اندازه که از محل انفجار فاصله بیشتر می شود ترکها کوچکتر و تعداد آنها در مدل عددی و آزمایشگاهی کمتر می شود. با افزایش فاصله مقیاس شده انفجاری ترکها کمتر می شود که این مورد در پارامترهای خرابی دیگر (تغییر شکل و شعاع خردشدگی بتن) نیز مشاهده شد.



شکل (15): دال با ابعاد $50 \times 1250 \times 1250$ در فاصله مقیاس شده 0/518

مشاهده می شود در فواصل مقیاس شده مساوی، دال های بزرگتر تغییر شکل های بیشتری را متحمل شده اند و خروجیهای برنامه بیشتر از نتایج آزمایشهاست. با کاهش فاصله مقیاس شده، افزایش تغییر شکل دال های بزرگتر در مدل عددی و آزمایشگاهی بیشتر است. نزدیک بودن دو نمودار آزمایشگاهی و عددی در حالت دور نشان دهنده دقت بیشتر مدل در نظر گرفته شده برای فاصله دور است که در مورد رابطه (18) نیز این نتیجه بیان شد.

6- شعاع خردشدگی بتن

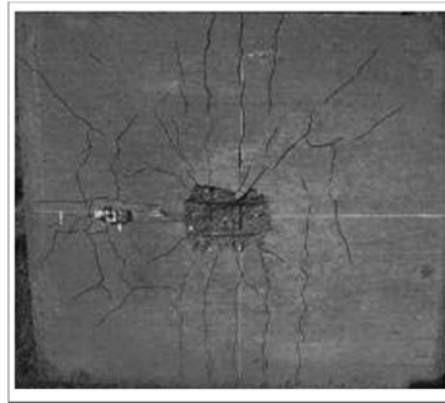
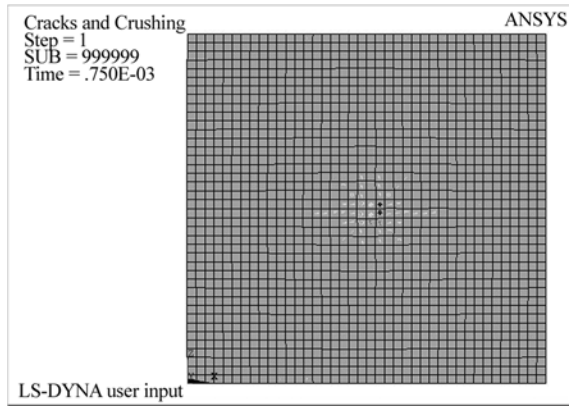
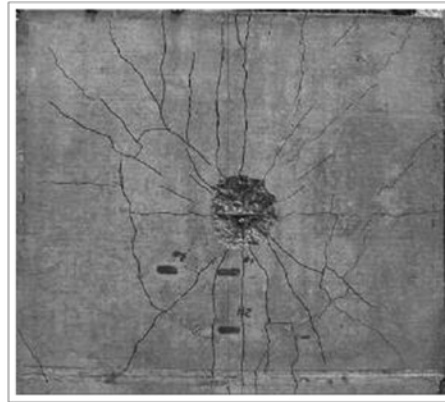
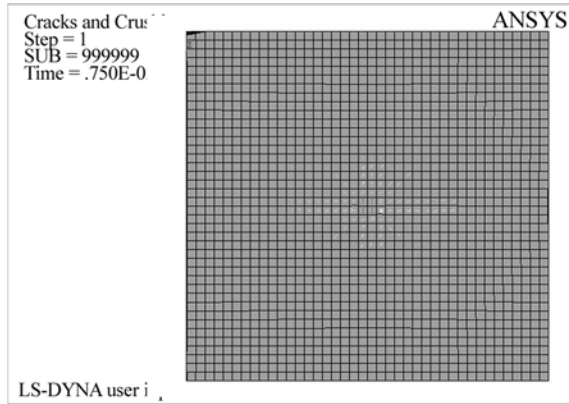
برای به دست آوردن منطقه خردشدگی بتن از معیار تنش و حد f_c استفاده شده است. خروجیهای برنامه و نتایج آزمایشهای انجام شده در شکل های (16، الف و ب) نشان داده شده است. با عبور سطح مناسب از نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی به ترتیب روابط (21) و (22) به دست می آیند:

$$\frac{r}{h} = .3327Z^{-3.0967} (1 + 6.7318e^{-2.7284S}) \quad (21)$$

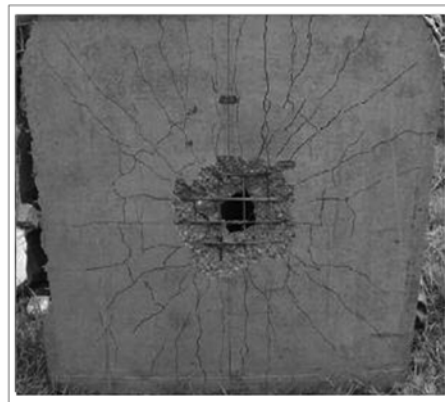
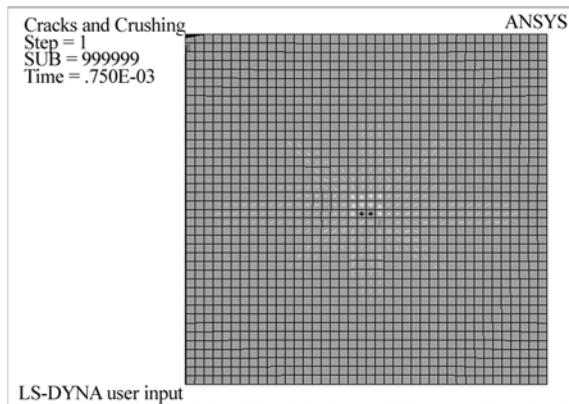
$$\frac{r}{h} = .3018Z^{-3.0064} (1 + 3.334e^{-1.514S}) \quad (22)$$

در روابط بالا r مقدار شعاع خردشدگی بتن دال است.

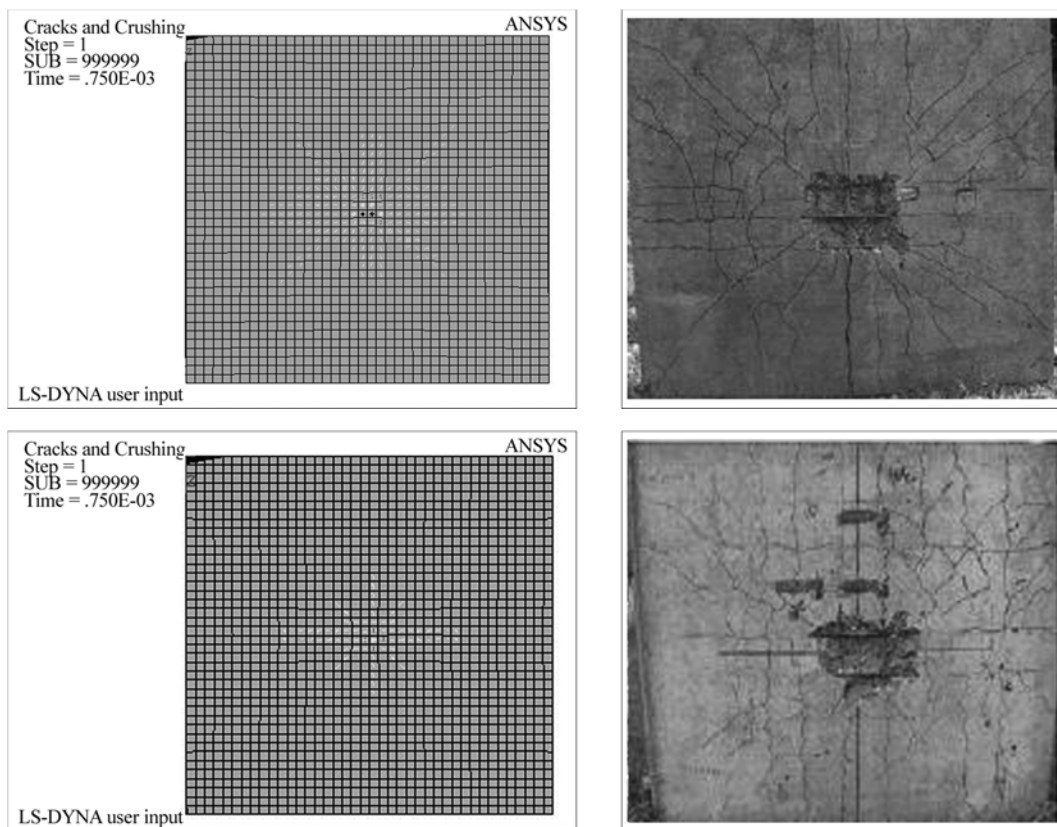
مشاهده می شود که شعاع خردشدگی بتن در دال های بزرگتر بیشتر است و نتایج عددی بیشتر از نتایج آزمایش است. در این حالت نیز مدل در نظر گرفته شده برای فاصله دورتر دقت بیشتری



شکل (17): مقایسه نحوه گسترش ترکها در مدل های آزمایشگاهی و عددی در فاصله مقیاس شده 0/591



شکل (18): مقایسه نحوه گسترش ترکها در مدل های آزمایشگاهی و عددی در فاصله مقیاس شده 0/518



ادامه شکل (18)

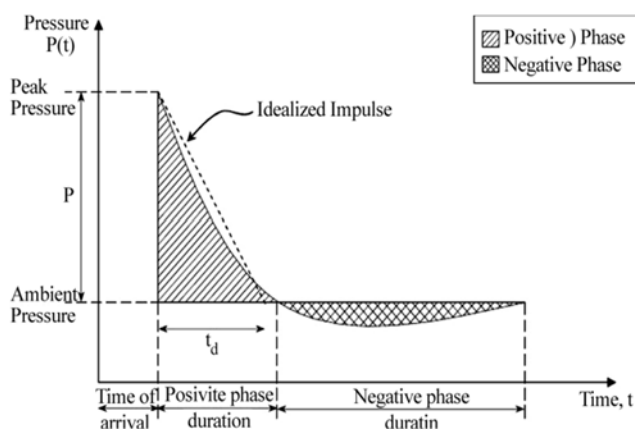
8- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت رویکرد صریح در حل مسائل تحت بار گذاریهای شدید میزان دقت این روش مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله سه نمونه دال بتی در برنامه ANSYS LS-DYNA تحت شش مقدار ماده منفجره در فواصل مشخص قرار داده شد و تحلیل دینامیکی غیردرگیر با الگوریتم صریح انجام و میزان دقت این نوع تحلیل ارزیابی شد. طبق مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشها تغییر شکل و شعاع خردشدگی حداکثر در مدل‌های عددی نسبت به آزمایشها مقادیر بیشتری بودند که دلیل آن را می‌توان ناشی از دو مورد دانست:

الف. روابط تجربی ارائه شده از این جهت که برای مقاصد طراحی ارائه شده‌اند، فشار ناشی از انفجار را اصولاً بیشتر از فشارهای اندازه گرفته شده در آزمایشها نتیجه می‌دهند.

ب. در مقاله حاضر از فاز منفی انفجار، که موجب مکش در سطح اعضا می‌شود، صرف نظر شده است (برنامه‌هایی همچون Conwep).

در شکل (19) فازهای مثبت و منفی و t_d زمان رسیدن امواج انفجار بر سطح عضو به همراه حداکثر اضافه فشار در ناحیه‌های فشار



شکل (19): فازهای مثبت و منفی در نتیجه بار انفجار [15]

(مثبت) و مکش (منفی) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود بزرگی فشار در ناحیه مثبت بسیار بیشتر از ناحیه منفی است و به استثنای سازه‌های سبک فشار در ناحیه منفی ناچیز گرفته می‌شود. همچنین از تحلیل‌های عددی انجام شده نیز نتایج زیر به دست آمده است:

1. در فواصل مقیاس شده دورتر میزان دقت مدل در نظر گرفته شده بیشتر است. این مورد از سطح برآزش شده بر خروجیهای

4. Suthar, K.N. and Fu, C.C. (2007). The Effect of Dead, Live and Blast Load on a Suspension Bridge. Master of Science Thesis. University of Maryland.
5. Winget, D.G., Markand, K.A., and Williamson, E.B. (2005). Analysis and Design of Critical Bridges Subjected to Blast Loads. *Journal of Structural Engineering*, 131, p. 1243-1255.
6. Van der meer, L.J. (2008). *Dynamic Response of High Rise Building Structures to Blast Loading*. Research report; Eindhoven University of Technology; A-2008.3, O-2008.8
7. Draganic, H. and Sigmund, V. (2012). *Blast Loading on Structures*. *Tehničkovjesnik*, 19, p. 643-652.
8. Knight, J. (2012). Blast Load Time History Analysis an Example in S-FRAME; work shop and explanation of software. S-FRAME software Inc.
9. بیگلری، مهنوش؛ عشایری، ایمان؛ بحیرایی، محمد. (1392). بررسی رفتار یک پل بتنی مقاوم در برابر زلزله تحت بارگذاری انفجاری. سخنرانی در هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سیستان و بلوچستان.
10. Anwarul Islam, A.K.M. (2005). Performance of AASHTO Girder Bridges under Blast Loading, thesis. U.S.: Florida State University.
11. Rong, B.D. and Xian, L.J. (2009). Numerical Simulation of Bridge Damage under Blast Loads. *wseas transactions on computers*; 8; p. 1564-1574.
12. Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S.C., and Tang, F. (2012). Experimental Study on Scaling the Explosion Resistance of a One-Way Square Reinforced Concrete Slab Under a Close-in Blast Loading. *International Journal of Impact Engineering*, 49, p. 158-164.
13. Pajak, M. (2011). The Influence of the Strain Rate on the Strength of Concrete Taking into Account the Experimental Techniques, *Architecture civil engineering environment*; architecture civil engineering environment; 3, p. 77-86.
14. Wilt, T. and Choudhury, A. (2011). *Response of Reinforced Concrete Structures to Aircraft Crash Impact*. Texas: Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses San Antonio.
15. Department of the Army (1992). Explosives and Demolitions. FM 5-250, U.S. Government. Washington, D.C.: Printing Office Distribution Restriction to U.S Government agencies only

تغییر شکل و شعاع خردشدگی بتن نتیجه می شود. میزان دقت مدل های تحلیل شده به نوع المان، مدل رفتاری بتن، نوع تحلیل (درگیر یا غیردرگیر) و الگوریتم مورد استفاده در تحلیل دینامیکی (صریح یا ضمنی) بستگی دارد.

2. هر اندازه ابعاد دال بیشتر شده، میزان خرابیها نیز افزایش یافته است که این مورد در خروجیهای کمی و کیفی (گسترش ترکها) دیده می شود.

3. در تحلیل دینامیکی صریح، مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر بازه زمانی انتخاب شده، اندازه المانهاست. از طرفی در مدلسازی سازه ها تحت بارهای انفجاری معمولاً تعداد زیاد المانها و زمانبر بودن تحلیل، بررسی تمامی حالات را بسیار دشوار می سازد که می توان با در نظر گرفتن طبیعت بارگذاری انفجاری (ایجاد خسارت موضعی در سازه ها) و تعداد مناسب المانها، زمان را به نحوی اثربخش کاهش داد. رابطه ای که در تحقیق حاضر به این منظور به دست آمد (رابطه 18) برای فواصل مقیاس شده کمتر از $1 \text{ m/kg}^{1/3}$ کاربرد دارد. به این ترتیب برای سازه ای سنگین مانند پل می توان با در نظر داشتن دقتی مشخص برای هر کدام از اعضای پل اندازه المان و متعاقباً تعداد المان مشخصی را در مدل اجزای محدود در نظر گرفت و از مدلسازی تمامی اعضای پل با یک اندازه المان اجتناب کرد. معمولاً برای فواصل مقیاس شده بیشتر از 1 فشار ناشی از محل انفجار به صورت یکنواخت (استاتیکی یا دینامیکی) بر سطح عضو وارد می شود که در این مورد می توان به مراجع [4]، [9] و [10] اشاره کرد.

9- مراجع

1. Winget, D.G. (2003). *Design of Critical Bridges for Security against Terrorist Attacks*. M.S. Thesis, the University of Texas at Austin.
2. Wei, J., Quintero, R., Galati, N., and Nanni, A. (2007). Failure Modeling of Bridge Components Subjected to Blast Loading, Part 1: Strain Rate-Dependent Damage Model for Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 1, p. 19-28.
3. Wei, J., Quintero, R., Galati, N., and Nanni, A. (2007). Failure Modeling of Bridge Components Subjected to Blast Loading, Part 2: Estimation of the Capacity and Critical Charge. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 1, p. 29-36.



Numerical Assessment of Explicit Dynamic Analysis of Structures in Severe Loading (Case Study of Three Concrete Slabs)

Mohammad Boheirae

M.S. Graduate, Department of Civil Engineering, Razi University,
Daneshgah Blvd., Kermanshah, Iran.
(Corresponding Author). Email: mbahirai@gmail.com

Mehrnoosh Biglari

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi
University, Daneshgah Blvd., Kermanshah, Iran.

Iman Ashayeri

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi
University, Daneshgah Blvd., Kermanshah, Iran.

In the present study the accuracy of the explicit dynamic approach for analysis of structures under severe loading is evaluated. Accordingly, three concrete slabs with dimensions of $750 \times 750 \times 30$, $1000 \times 1000 \times 40$, and $1250 \times 1250 \times 50$ cubic millimeters are modeled in ANSYS LS-DYNA under two different explosion loading at two scaled distances of 0.518 and $0.591 \text{ m/kg}^{1/3}$ and the accuracy of the results are compared with full scale tests both qualitatively and quantitatively. Amongst influencing parameters, the element size was considered and the function of analysis error was restored in terms of scaled distance and slab size. The results show that the maximum deformation, wreck radius and volume are larger for larger slabs at equal scaled distance. Furthermore, the numerical results are slightly larger than full scale tests for maximum deformation and wreck radius for all slabs and numerical results of uncoupled dynamic analysis are more accurate at larger scaled distances in equal explosion load.

Keywords: Explicit Approach, Uncoupled Dynamic Analysis, Finite Element Model, Full Scale Test.