

محاسبه‌ی بار دینامیکی ناشی از برخورد آوار در حالت حدی فروریزش ساختمان‌های فولادی

محمد صافی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

محسن تهرانی‌زاده* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴ (۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۲/۱، ص. ۷۳-۶۵، (پادداشت فنی)

ماهیت پیچیده‌ی بارهای غیرمترقبه و اثرات اولیه‌ی خرابی و ثانویه‌ی ضربه‌ی ناشی از ریزش آوار، تحلیل سازه‌ها را در برابر این نوع بارها با مشکل مواجه می‌کند. در این نوشتار، روش‌های محاسبه‌ی بار ناشی از آوار و چگونگی بررسی مسئله‌ی برخورد آوار با اعضای سازه‌ی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته و نتایج آنها با تجربیات موجود از آزمایش‌های اعضاء فولادی مقایسه شده است. با تهیه‌ی مدل عددی غیرخطی و انجام مطالعه‌ی پارامتری نمودارهای طراحی پیشنهادی جهت تخمین میزان بار ضربه روی قاب‌های خمشی فولادی در شرایط مختلف ارائه شده است. همچنین تحلیلی حساسیت روی شاخص‌های مهم آوار انجام و نمودارهای موردنظر براساس آنها تنظیم شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهند که برخورد آوار در بسیاری از موارد می‌تواند بارهای قابل ملاحظه‌ی بسیار بیشتر از پیش‌بینی آئین‌نامه‌ها ایجاد کند و عواقب خرابی زیادی داشته باشد.

واژگان کلیدی: برخورد آوار، دینامیک تماس غیرخطی، بار غیرمترقبه، تخریب پیش‌رونده.

۱. مقدمه

در بارگذاری سازه‌ها شدت و الگوی توزیع بارهای بهره‌برداری وارده قابل پیش‌بینی است و عموماً به صورت استاتیکی اعمال می‌شوند. در مقابل بارهای فوق‌العاده مانند ضربه و انفجار، الگو و شدت مشخصی ندارند و از طرفی ماهیت دینامیکی آنها، بررسی پاسخ سازه در برابر آنها را پیچیده می‌سازد. گرچه احتمال رخداد این نوع بارها در طول عمر بهره‌برداری سازه خیلی محدودتر است، اما خطر زیاد آنها در مجموع ریسک آسیب‌پذیری سازه در برابر آنها را قابل توجه می‌سازد. اعمال این‌گونه بارها در طراحی‌های متداول نیازمند داشتن تخمینی از میزان این بارها و الگوهای آنها و نیز معادل سازی اثرات دینامیکی آنهاست.

بار انفجار و ضربه، بارهای گذرا و یا بارهایی هستند که به صورت دینامیکی و به شکل یک پالس در مدت زمان کوتاهی به سازه اعمال می‌شوند و در طول این مدت انرژی به سرعت به سازه منتقل می‌شود. پاسخ سازه‌ها هم در برابر این بارها معمولاً به صورت غیرخطی است و لذا تحلیل پاسخ آنها برای طراحی‌های متداول بسیار مشکل خواهد بود.^[۱] بنابراین لازم است با استفاده از مطالعات پارامتری و بررسی‌های تجربی و آزمایشگاهی، اطلاعات لازم برای انجام این‌گونه تحلیل‌ها مورد برآورد قرار گیرد.

اثرات ثانویه‌ی این بارها باید قابل مهار باشد و منجر به گسترش خرابی در سازه

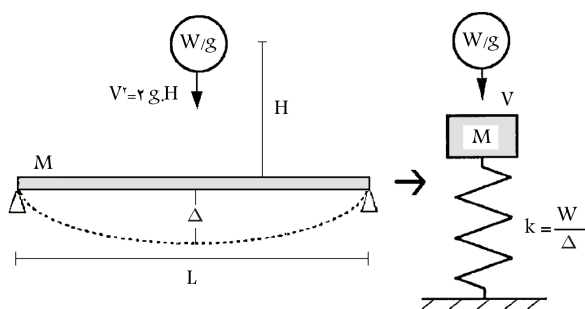
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۱/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۲۲، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۱۹.

نشوند.^[۳] یکی از انواع بارهای فوق‌العاده که می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ی در رفتار سازه‌ها بگذارد، اضافه بار ناشی از ریزش آوار در حین زلزله یا انفجار است. این بار خصوصاً در بررسی تخریب پیش‌رونده و کنترل انسجام سازه‌ی اهمیت بسیاری دارد. در این نوشتار، به بررسی تحلیلی این مسئله و ارائه‌ی رهنمودهایی برای طراحی ساختمان‌های فولادی در برابر چنین بارهایی پرداخته شده است.

نمونه‌های سازه‌های تخریب‌شده به صورت کلی و موضعی در اثر ریزش آوار طبقات فوقانی در وقایع لرزه‌ی، انفجار و تروریستی در دهه‌های اخیر قابل ملاحظه بوده است. از طرفی تقریباً تمام ساختمان‌ها در برابر چنین بارهایی طراحی نشده‌اند و لازم است روش ساده و مناسب برای ارزیابی رفتار آنها تحت این بارها ارائه شود.^[۱] فلسفه‌ی طراحی تحت چنین بارهایی به این صورت است که سازه باید بتواند خرابی‌ها و ضربات ایجادشده را به صورت موضعی کنترل، مستهلک و مهار کند. لذا لازم است اجزاء مختلف سازه برای ایجاد چنین رفتاری طراحی و کنترل شوند.^[۲] رویکرد آئین‌نامه‌ها در مسئله‌ی کنترل انسجام سازه‌ی به دو صورت حذف تصادفی برخی از اعضاء و نیز اعمال بار تشدید یافته در بعضی دهانه‌هاست.^[۳-۵] در آئین‌نامه‌های موجود، میزان تشدید بار معمولاً معادل بیشینه‌ی ضربه‌ی ارتعاشی در نظر گرفته شده است، که وضعیت سقوط و انرژی ناشی از آن را در نظر نمی‌گیرد.^[۵]

در این نوشتار، ابتدا به بررسی روش‌های محاسبه‌ی اثرات ضربه‌ی دینامیکی ناشی از سقوط آوار پرداخته و سپس مدل‌های مختلف ریاضی و عددی در این



شکل ۱. مدل اولیه‌ی مسئله‌ی برخورد ناشی از سقوط اجسام.

مستقیماً به‌دست خواهد آمد. برای سیستم یک درجه آزادی بدون میرایی با اعمال شرایط اولیه‌ی تغییرمکان و سرعت ناشی از سقوط آوار مطابق رابطه‌ی ۳ خواهد بود:

$$u_0 = 0 - \Delta, \quad v_0 = \sqrt{2gH} \quad (3)$$

که در آن، Δ تغییرمکان استاتیکی تحت بار آوار W است، و معادله‌ی حرکت از رابطه‌ی ۴ به‌دست می‌آید:^[۷]

$$(M + \frac{W}{g})\ddot{u}(t) + ku = W \quad (4)$$

که در آن، W/g جرم آوار است که به سیستم ارتعاشی اضافه می‌شود. پاسخ دینامیکی رابطه‌ی مذکور مطابق رابطه‌ی ۵ خواهد بود:^[۷]

$$u(t) = -\Delta \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{2gH}}{\omega} \sin(\omega t) + \frac{W}{k} \quad (5)$$

که با جایگزینی $\Delta = \frac{W}{k}$ و به‌صورت خلاصه‌شده رابطه‌ی ۶ را خواهیم داشت:^[۷]

$$u(t) = \Delta \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2gH}{(\omega\Delta)^2}} \cdot \sin\left(\omega t - A \tan\left(\frac{\sqrt{2gH}}{\omega\Delta}\right)\right) \right] \quad (6)$$

که در آن، بسامد سیستم مطابق رابطه‌ی ۷ خواهد بود:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M + \frac{W}{g}}} \quad (7)$$

و با محاسبه‌ی پاسخ بیشینه‌ی دینامیکی (u^{\max})، ضریب بار ضربه به‌صورت رابطه‌ی ۸ به‌دست می‌آید:

$$DIF = \frac{u_{\max}}{\Delta} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H(Mg + W)}{k\Delta^2}} \quad (8)$$

که در آن، به‌ازاء ارتفاع صفر ضریب بار دینامیکی کمیته‌ی ۲ به‌دست می‌آید، چرا که به هر حال جرم آوار به سیستم ارتعاشی تحمیل شده است. مقدار بیشینه‌ی ضریب ضربه در این سیستم بستگی به شکل بار ندارد و برای پالس مثلثی یا مستطیلی یکسان است. مقادیر به‌دست‌آمده‌ی ضریب ضربه از این رابطه برای تیر ساده بین ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از روش انرژی است.

۳.۲. روش انتشار موج

در این روش بار آوار به‌صورت یک سیستم دینامیکی انتشار امواج محوری در یک میله در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲). این مدل برای بررسی فروریزش کلی آوار در

زمینه معرفی و مقایسه شده‌اند. همچنین نتایج برخی مطالعات تجربی موجود در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است. سپس تئوری تحلیل عددی مسئله‌ی برخورد غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفته و مدل مناسب برای بررسی این اثر انتخاب شده است.

در این بخش مطالعه‌ی پارامتری روی اجزاء سازه‌ی فولادی تحت سناریوهای مختلف ریزش آوار با انجام سناریوهای جامعی از تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی ارائه شده و اثرات رفتار مکانیک تماس غیرخطی در این پاسخ مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت پایانی، نمودارهای طراحی مستخرج از این مطالعات گسترده‌ی پارامتری برای حالات مختلف طراحی و وضعیت‌های متفاوت سازه و آوار، تدوین و برای مقاصد طراحی پیشنهاد شده است.

۲. مقایسه‌ی کمی روش‌های محاسبه‌ی ضربه‌ی برخورد آوار

برای محاسبه‌ی اثرات ضربه معمولاً از مفهوم ضریب ضربه‌ی دینامیکی (DIF) استفاده می‌شود. این پارامتر معرف نسبت پاسخ بیشینه‌ی دینامیکی تحت اثر ضربه با تحلیل دینامیکی به بیشینه‌ی پاسخ استاتیکی به وزن بار ضربه در همان نقطه است.^[۷،۶] این ضریب با ضرب در وزن آوار برای کنترل پاسخ عضو تحتانی به‌کار گرفته می‌شود. روش‌های مختلف محاسبه‌ی ضربه در ادامه به‌طور خلاصه معرفی شده‌اند.

۱.۲. روش‌های مبتنی بر انرژی ضربه

در این روش فرض می‌شود که انرژی جنبشی حاصل از سقوط جسم با جرم M از ارتفاع H به تیر با طول L به‌صورت انرژی کرنشی ارتجاعی مطابق رابطه‌ی ۱ منتقل می‌شود:^[۶]

$$MgH = \int_0^L w(x) \cdot u_y(x) dx \quad (1)$$

که در آن، $w(x)$ شدت بار استاتیکی حاصل از سقوط آوار است. استهلاک انرژی را می‌توان در این رابطه با کسر از انرژی کرنشی اعمال کرد. با استفاده از این رابطه برای تیر با طول L ، مدول ارتجاعی E ، ممان اینرسی I و بار گسترده‌ی آوار برابر w/g و ارتفاع سقوط H ، ضریب ضربه‌ی دینامیکی (DIF) به‌صورت رابطه‌ی ۲ خواهد بود:

$$DIF = 1 + DLF = 1 + \sqrt{\frac{2 \times (100 - \eta)EIH}{wL^3}} \quad (2)$$

که در آن، η ضریب استهلاک انرژی است. در این رابطه به‌ازاء ارتفاع صفر، ضریب ضربه برابر واحد خواهد بود. این روش محاسبه‌ی ضریب بار ضربه در واقع همان روش شبه استاتیکی است، که برای تیرها با رفتار کشسان - خمیری هم به‌کار گرفته می‌شود (شکل ۱).

۲.۲. روش تحلیل دینامیکی

در این روش مدل یک یا دو درجه‌ی آزادی برخورد در نظر گرفته و معادله‌ی ارتعاش دینامیکی آن نوشته می‌شود. با حل معادله و به‌دست‌آوردن پاسخ، ضریب بار ضربه

با مقطع مستطیلی و دایره‌یی وجود دارد. به دلیل استفاده از سرعت‌های بالا، رفتار سازه در این آزمایش‌ها عمدتاً در محدوده‌ی خمیری غیرخطی بوده است. جدول ۱، برخی نتایج ضریب ضربه‌ی به‌دست‌آمده از این نوع آزمایش‌ها روی تیرهای فولادی را نشان می‌دهد.^[۸]

۵.۲. روش‌های دینامیک تماس

یکی از روش‌های عددی پیشرفته برای تحلیل دینامیکی برخورد روش اجزاء محدود صریح است، که پاسخ تاریخی‌ی زمانی سازه تحت ضربه‌ی وارده را ارائه می‌دهد. در بعضی مسائل برخورد هم لازم است ترکیبی از روش‌های دینامیکی صریح و ضمنی مورد استفاده قرار گیرد.

در روش صریح دینامیکی می‌توان از روابط اساسی رفتاری مختلف مصالح مانند: ارتجاعی همسان، ویسکو کشسان، مونی - ریولین، کشسان - خمیری، خمیری سخت‌شونده و بسیاری رفتارهای پیچیده‌ی دیگر استفاده کرد، که برای انجام تحلیل‌های غیرخطی بسیار جالب توجه است.

همچنین با استفاده از این روش می‌توان مسائل تماس غیرخطی با مدل‌های نقطه به نقطه، سطح به سطح و نقطه به سطح را در شرایط تماس سخت یا انعطاف‌پذیر و نیز با در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ را تحلیل کرد. در بخش بعدی، فرمول‌بندی این روش به‌طور اجمالی ارائه شده است.

۳. دینامیک تماس غیرخطی

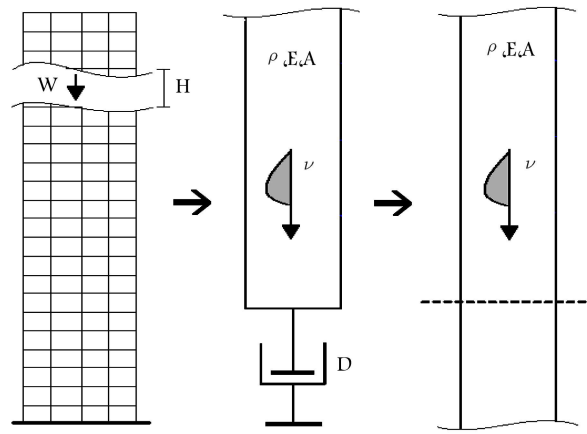
۱.۳. تحلیل صریح دینامیکی برخورد غیرخطی

حل صریح معادله‌ی تعادل دینامیکی برخورد در حوزه‌ی زمان برای مؤلفه‌های سرعت و شتاب بر حسب مؤلفه‌های تغییر مکانی را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ نوشت:^[۹]

$$\begin{aligned} \ddot{U}_t &= \frac{1}{\Delta t^2} (U_{t-\Delta t} - 2U_t + U_{t+\Delta t}) \\ \dot{U}_t &= \frac{1}{2\Delta t} (U_{t+\Delta t} - U_{t-\Delta t}) \end{aligned} \quad (11)$$

روابط مذکور برای حل معادله‌ی دیفرانسیل حاکم به‌صورت رابطه‌ی ۱۲ مورد استفاده قرار می‌گیرند:^[۹]

$$[M][\ddot{U}_t] + [K][U_t] + [C][F_t] = [F_t(t)] \quad (12)$$



شکل ۲. مدل برخورد به روش انتشار موج.

یک ساختمان بلند به‌کارگرفته شده است. معادله‌ی اندازه‌ی حرکت ضربه‌ی موج با صرف‌نظر از اثر شرایط مرزی به‌صورت رابطه‌ی ۹ نوشته می‌شود:^[۸]

$$P_{dyn} = D.V \quad (9)$$

با فرض سرعت بار ضربه‌ی آوار برابر $V = \sqrt{2gH}$ و میرایی $A_{eq} = \frac{A_c}{A_{eq}} \rho$ و سرعت انتشار موج محوری $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ و چگالی معادل میله برابر $\rho_{eq} = \frac{A_c}{A_{eq}} \rho$ و ترتیب سطح مقطع کل ساختمان و سطح کل مقطع اجزاء باربر، ضریب ضربه‌ی دینامیکی مطابق رابطه‌ی ۱۰ خواهد بود:

$$DLF = \frac{P_{dyn}}{W} = \frac{A_c \sqrt{2gH} \rho E}{W} \quad (10)$$

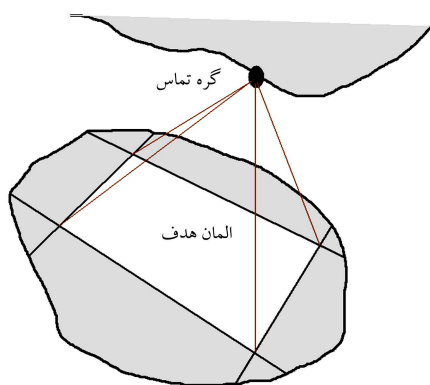
مقادیر به‌دست‌آمده از این رابطه کوچک‌تر از دو روش قبل است. در صورت در نظر گرفتن اثرات شرایط مرزی و انعکاس موج، مقادیر ضریب ضربه‌ی کمتری به‌دست خواهد آمد.

۴.۲. شبیه‌سازی آزمایشگاهی برخورد

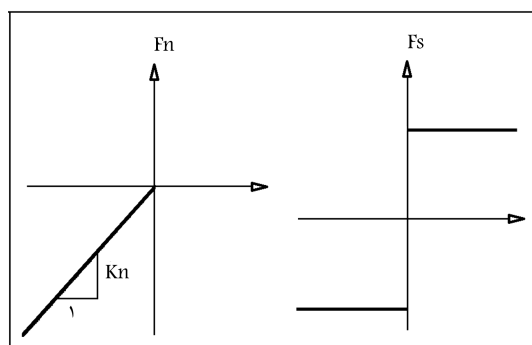
آزمایش‌های برخورد در مقیاس واقعی برای برخی از اجزاء سازه‌های بتنی نظیر دیوارها انجام و نتایج آنها ارائه شده است، اما در مورد سازه‌های فولادی نتایج آزمایش با مقیاس‌های واقعی در دسترس نیست. در مقیاس‌های کوچک‌تر، نتایج آزمایش‌های برخورد پرتابه‌ها با سرعت‌های متوسط و بالا روی تیرهای کوتاه فلزی

جدول ۱. نتایج تحلیل حساسیت به‌دست‌آمده از آزمایش.

مقطع تیر	طول تیر	سرعت سقوط آوار	تغییر مکان دینامیکی	ضریب بار دینامیکی
$b \times h$ (mm)	(mm)	(m/s)	(mm)	DLF
$50 \times 8 \times 3781$	1016	333	347	607
$50 \times 8 \times 3781$	1016	518	606	1060
$50 \times 8 \times 3781$	1016	703	823	1440
$50 \times 8 \times 3781$	1016	980	1135	1986
$50 \times 8 \times 3781$	1016	1147	1250	2186



شکل ۳. گره‌های درگیر در تحلیل عددی تماس.



شکل ۴. مدل رفتار اصطکاک کولمب در تماس.

دو مدل متداول برای فرمول‌بندی ریاضی مسئله‌ی تماس وجود دارد که عبارت‌اند از: روش ضرایب لاگرانژ و روش تابع جریمه.^[۹] روش ضرایب لاگرانژ نتایج دقیق‌تری در مورد فشار تماس و میزان تغییر مکان نفوذی ناشی از برخورد به دست می‌دهد، اما هم‌گرایی آن با افزایش تعداد گره‌های تحت تماس بسیار مشکل می‌شود. از طرف دیگر، روش تابع جریمه جواب‌های تقریبی‌تری می‌دهد، اما در مقابل تعداد مجهولات کمتری برای همگراشدن در محل تماس دارد و سریع‌تر به جواب می‌رسد.

با توجه به نتیجه‌ی پژوهش انجام‌شده در مسئله‌ی برخورد و ریزش آوار برای حصول سریع‌تر به جواب از روش دوم استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه‌ی سختی در تماس به صورت رابطه‌ی ۱۶، روش تابع جریمه سعی می‌کند عبارت ناشی از جای‌گذاری تابع جریمه در معادله‌ی سختی تماس را کمینه سازد:^[۹]

$$[K]_p [U] = [F]_p \quad (۱۶)$$

که در آن عبارات جریمه در تحلیل غیرخطی تماس به صورت روابط ۱۷ ظاهر می‌شوند:

$$[K]_p = [K] + \zeta [G]^T [G] \quad (۱۷)$$

$$[F]_p = [F] - \alpha [G]^T [d]$$

که در آن‌ها، ζ و α پارامترهای جریمه و G ماتریس قید خطی و d بردار گپ یا فاصله‌ی اولیه‌ی تماس و p اندیس نشان‌دهنده‌ی جریمه است. فشار ناشی از تماس در این روش بر حسب میران تغییر مکان نفوذی به صورت رابطه‌ی ۱۸ بیان می‌شود:^[۹]

$$[CP]_p = \zeta \cdot \{ [G] [U] + [d] \} \quad (۱۸)$$

زمانی که روابط صریح در معادله‌ی مذکور جایگزین می‌شوند، پس از ساده‌سازی رابطه‌ی ۱۳ را خواهیم داشت:^[۹]

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) [U_{t+\Delta t}] = [F_t(t)] - \left([K] - \frac{1}{\Delta t^2} [M] \right) [U_t] - \left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) [U_{t-\Delta t}] \quad (۱۳)$$

در این رابطه، پارامترهای U در زمان‌های t و $t - \Delta t$ در هر گام زمانی بر حسب گام قبلی به دست می‌آیند. برای به دست آوردن شرایط اولیه در اولین گام در زمان صفر، که در رابطه‌ی حل صریح پارامتر تغییر مکان بر حسب زمان $-\Delta t$ بیان می‌شود، از رابطه‌ی ۱۴ استفاده می‌کنیم:

$$U_{-\Delta t} = U_0 - \Delta t \cdot \dot{U}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}_0 \quad (۱۴)$$

در حالت ساده با صرف نظر از میرایی وابسته به سرعت، رابطه‌ی حل صریح برخورد به صورت رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] \right) [U_{t+\Delta t}] = [F_t(t)] - \left([K] - \frac{1}{\Delta t^2} [M] \right) [U_t] - \left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] \right) [U_{t-\Delta t}] \quad (۱۵)$$

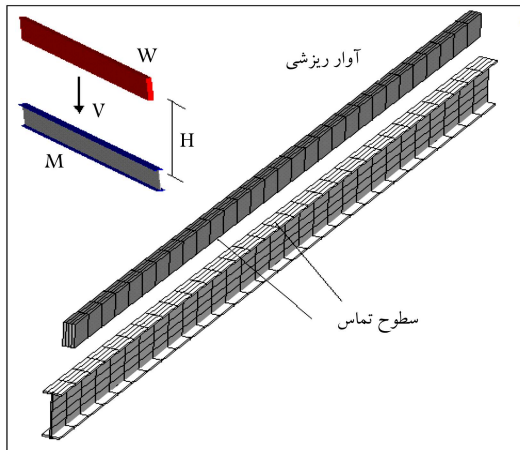
با ترکیب این روابط با روابط مکانیک تماس، روش تحلیل دینامیکی صریح مسائل برخورد به دست می‌آید.^[۱۰]

۲.۳. دینامیک تماس برخورد

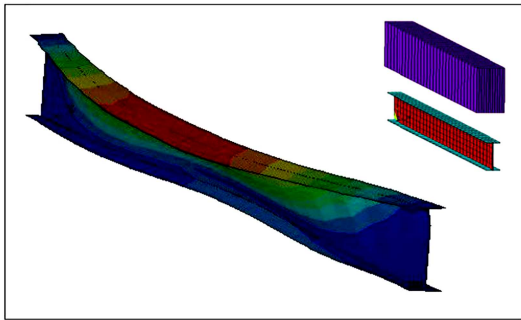
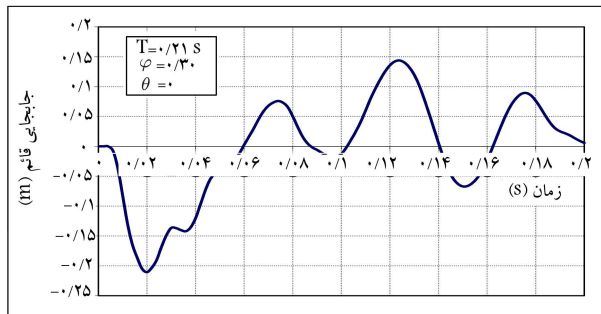
مسائل مهندسی برخورد به شدت غیرخطی است و نیاز به روش‌های عددی پیشرفته و ابزارهای نرم‌افزاری و تحلیلی قدرتمندی برای تحلیل دارند. در تحلیل این‌گونه مسائل، مشکلات زیادی از قبیل: هندسه‌ی غیرخطی، رفتار مصالح دو جسم برخوردکننده، شرایط اولیه‌ی برخورد و تماس و تغییر آن در رفت و برگشت‌های مکرر و سازگاری فیزیکی و مکانیکی دو جسم در طول تحلیل وجود دارد، که هم‌گرایی درست آنها را دشوار می‌سازد.

محدوده‌ی واقعی تماس با تغییر تعریف شرایط اولیه ممکن است با شرایط واقعی تفاوت زیادی داشته باشد. در مسائل برخورد با سرعت‌های کمتر و مصالح سخت معمولاً از برخورد دو جسم سخت و در شرایط غیرخطی شدن یکی از مصالح مانند مسائل شکل‌دهی فولاد در متالورژی از برخورد جسم سخت با جسم انعطاف‌پذیر و در شرایط تغییر فرم هر دو جسم برخوردکننده از برخورد دو جسم انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. طبیعی است که با انعطاف‌پذیر شدن مسئله‌ی برخورد تحلیل و همگراشدن آن در مسائل عددی نیز بسیار مشکل‌تر می‌شود و نیاز به دقت و افزایش بسیار زیاد حجم المان‌ها و تنظیم معیارهای هم‌گرایی دارد. اغلب در این مسائل مطابق شکل ۳ از گره‌های هدف و تماس استفاده می‌شود که مبدأ محاسبه‌ی نیروی اولیه‌ی تماس براساس آن مشخص می‌شود. نوع مسئله‌ی ریزش آوار بسته به ارتفاع ریزش و میزان آوار می‌تواند به تدریج از برخورد سخت به انعطاف‌پذیر تبدیل شود.^[۱۱] مشکل دیگر در این نوع تحلیل‌ها نقش قابل توجه اصطکاک در برخورد است، که به شدت هم‌گرایی این مسائل را تحت شعاع قرار می‌دهد. در تحلیل انجام‌شده‌ی ریزش آوار از مدل برخورد اصطکاکی کولمب استفاده شده است (شکل ۴).

تحلیل صریح دینامیکی برخورد معمولاً برای مسائل تماس در زمان کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرد و اندرکنش اولیه‌ی دو جسم برای استخراج میزان نیروی انتقال یافته در تماس مورد بررسی واقع می‌شود.



شکل ۵. مدل اجزاء محدود برخورد ناشی از ریزش آوار.



شکل ۶. نمونه‌ی تاریخی زمانی و توزیع تغییرمکان در لحظه‌ی بیشینه در برخورد ناشی از ریزش آوار.

نمونه‌ی نتایج تحلیل حساسیت پارامترها در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که ضریب بار دینامیکی با جذر نسبت جرم تیر به سختی خمشی آن یعنی $\sqrt{\frac{M}{EI}}$ نسبت معکوس دارد.

با افزایش طول تیر تحتانی یا کاهش سختی آن یا افزایش جرم آن، دوره‌ی تناوب ارتعاشی آن افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود که ضریب بار دینامیکی نیز افزایش یابد. از طرفی اگر سختی تیر تحتانی افزایش یابد، تغییرمکان استاتیکی کاهش بیشتری نسبت به تغییرمکان دینامیکی پیدا می‌کند و می‌تواند باعث افزایش ضریب بار دینامیکی شود. برای نمونه‌ی دیگر در مورد جرم آوار در ظاهر به نظر می‌رسد که افزایش آن منجر به افزایش ضریب بار دینامیکی می‌شود، ولی با توجه به اضافه‌شدن آن در محاسبه‌ی تغییرمکان استاتیکی عملاً کاهش ضریب بار دینامیکی هم مورد انتظار خواهد بود. پاسخ چنین شبهاتی عملاً با بررسی نتایج تحلیل پارامتری مسئله‌ی برخورد مشخص می‌شود.^[۱۳]

میزان دقت جواب‌های به‌دست‌آمده از روش فوق به مقدار زیادی تابع پارامتر جرمی می‌باشد. در حالات حدی اگر ζ بسیار بزرگ باشد، تحلیل به سمت ناپایداری می‌رود و در مقابل اگر ζ بسیار کوچک باشد مقادیر باقیمانده‌ی ماتریس قید G غیر قابل توجیه خواهند بود.

۴. تحلیل پارامتری عددی ریزش آوار

۱.۴. مدل تحلیل عددی

در این بخش نتایج تحلیل عددی برخورد ناشی از ریزش آوار در ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌ی مدل اجزاء محدود مورد استفاده در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مدل‌ها جرم تیر یا آوار سقوط‌کننده به صورت جرم معادل آوار و جرم تیر تحت برخورد یا ضربه شامل سهم جرم نوسان‌کننده با آن در طبقه‌ی تحتانی است. المان‌های مورد استفاده دارای ۱۲ درجه‌ی آزادی و ۵ نقطه‌ی انتگرال‌گیری گاوسی هستند. درجات آزادی گره‌ها در برگیرنده‌ی تغییرمکان، دوران، سرعت و شتاب در دستگاه سه بعدی هستند. نفوذ اولیه در لحظه‌ی تماس، تغییر جهت خودکار بردارهای تابع زمان و اثرات ناشی از تغییر ضخامت المان‌ها در تحلیل در نظر گرفته شده است.^[۱۳]

روش انتخاب‌شده برای هم‌گرایی به صورت چند پارامتری است و در زیرگام‌های زمانی براساس نرم‌های بی‌نهایت اعمال شده است. در شکل ۶، نمونه‌ی تاریخی زمانی تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر است، که در حالت سقوط هم‌زمان آوار روی تیر، یعنی زمانی که زاویه‌ی برخورد θ برابر صفر است، به‌دست آمده است.

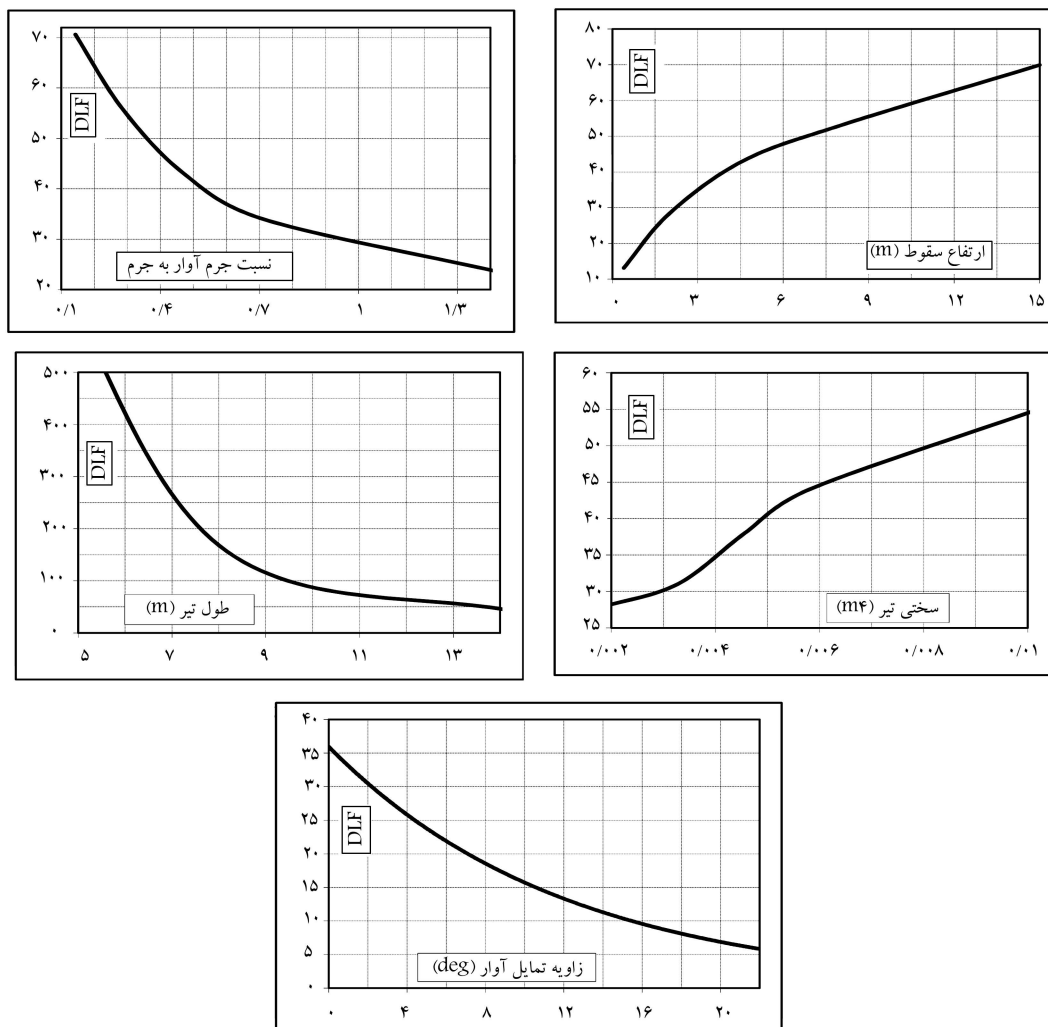
۲.۴. استخراج پارامترهای حساس

برای بررسی پارامتری و استخراج نتایج کاربردی لازم است پارامترهای حساس مسئله شناخته و استخراج شوند. این پارامترها شامل ورودی‌ها، خصوصیات هندسی و مکانیکی سازه و خروجی‌ها هستند. پارامترهای ورودی که عملاً انرژی برخورد و نحوه‌ی ورود آن را تعیین می‌کنند، شامل: وزن آوار W ، ارتفاع سقوط H یا سرعت برخورد V ، زاویه‌ی برخورد θ و نقطه‌ی برخورد ناشی از آن هستند. پارامترهای سازه شامل: طول L ، جرم m ، سختی دینامیکی EI ، شرایط تکیه‌گاهی و نتیجتاً دوره‌ی تناوب ارتعاشی T هستند، که البته در حالت غیرخطی افزایش می‌یابند. دوره‌ی تناوب ارتعاشی اولیه برای تیر تحت برخورد به صورت تحلیلی قابل محاسبه است و برای تیر دوسرگیردار به صورت رابطه‌ی ۱۹ بیان می‌شود:^[۶]

$$T = 0.2808L^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \quad (19)$$

پارامترهای خروجی تحلیلی بسیار متنوع هستند، ولی برای مقاصد طراحی از ضریب بار دینامیکی DLF استفاده می‌شود که در اینجا برابر نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان دینامیکی ناشی از برخورد آوار به بیشینه‌ی تغییرمکان استاتیکی تحت همان بار آوار در نظر گرفته شده است.

مرحله‌ی بعدی تعیین نحوه‌ی تغییرات این پارامترها یا حساسیت آنها نسبت به یکدیگر و خصوصاً در میزان خروجی است. اثر تعدادی از این پارامترها قابل پیش‌بینی است. برای مثال با افزایش ارتفاع یا سرعت برخورد انرژی ورودی افزایش می‌یابد، که طبیعتاً باعث افزایش ضریب بار دینامیکی می‌شود. اثر برخی پارامترها نیز به سادگی قابل پیش‌بینی نیست.



شکل ۷. تحلیل حساسیت منفرد ضریب بار دینامیکی.

برخورد تأثیر قابل توجهی می‌گذارد. انرژی انتقالی ناشی از برخورد از طرق مختلفی می‌تواند مستهلک شود، که از جمله مهم‌ترین آنها رفتار غیرخطی اتصالات و ظرفیت جذب قطعات الحاقی و غیرسازه‌یی در حد فاصل محل تماس است. نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان می‌دهد که چگونه استهلاک انرژی می‌تواند باعث کاهش ضریب بار دینامیکی شود. همچنین این نمودار ارتباط جالبی بین پارامترهای حساس و جذب انرژی ایجاد می‌کند. برای مثال با کاهش ارتفاع سقوط به $0.76H$ می‌توان با کاهش انرژی ورودی، 40% استهلاک انرژی به دست آورد. همین کار را می‌توان با تغییر پارامتر φ به 0.77φ انجام داد.

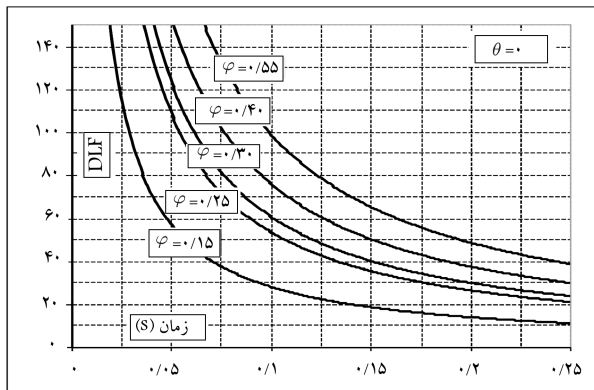
۳.۴. نمودارهای ضریب بار دینامیکی ریزش آوار

پس از تعیین پارامترهای حساس و اثر آنها در ضریب بار دینامیکی، نمودارهای کاربردی طراحی برای تعیین ضریب بار دینامیکی ضربه‌ی ناشی از ریزش آوار ارائه می‌شوند. این نمودارها براساس ۳ پارامتر اصلی دوره‌ی تناوب ارتعاشی سازه تحت برخورد، پارامتر φ و زاویه‌ی برخورد آوار تهیه شده‌اند که نمونه‌ی آنها در شکل ۱۰ ارائه شده است، که در آن تغییرات ضریب بار دینامیکی بر حسب دوره‌ی تناوب ارتعاشی اول سازه به ازاء زاویه‌ی سقوط آوار برابر صفر برای مقادیر مختلف φ از

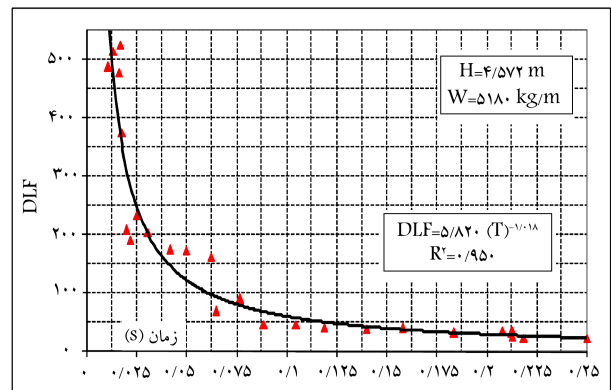
همچنین این پارامتر با مربع طول تیر یعنی L^2 هم نسبت عکس دارد. بنابراین در مجموع ضریب بار دینامیکی نسبت معکوس با دوره‌ی تناوب اول ارتعاشی تیر خواهد داشت. نتایج تحلیل‌ها همچنین نشان داده است که ضریب بار دینامیکی متناسب با جذر نسبت ارتفاع سقوط به وزن واحد طول تیر، یعنی $w = \frac{W}{L}$ است؛ که این نسبت در قالب پارامتر $\varphi = \sqrt{\frac{H}{w}}$ بیان شده است. نهایتاً برای استخراج پارامترهای حساس در به دست آوردن نمودارهای طراحی دو پارامتر T و φ مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرند. پارامترهای غیرحساس نظیر سختی آوار نیز در استخراج نتایج کاربردی ثابت فرض شده‌اند. البته که تغییرات پارامترها برای تحلیل حساسیت در محدوده‌ی واقعی و کاربردی آنها در نظر گرفته شده است.

شکل ۸، منحنی تغییرات ضریب بار دینامیکی به ازاء $\varphi = 0.3$ را برحسب دوره‌ی تناوب ارتعاشی تیر نشان می‌دهد. تغییرات ضریب بار دینامیکی به نسبت عکس دوره‌ی تناوب در این منحنی مشخص است.

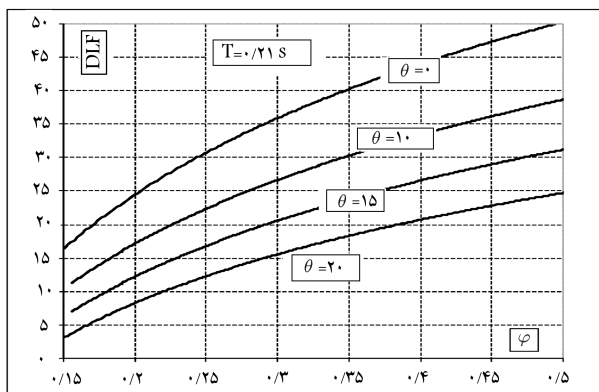
پارامتر دیگری که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، میرایی است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که میرایی لزجی در آوار و سازه در ضریب بار دینامیکی بیشینه که در لحظات اول برخورد رخ می‌دهد، نقش زیادی ندارد؛ ولی البته در تاریخچه‌ی زمانی



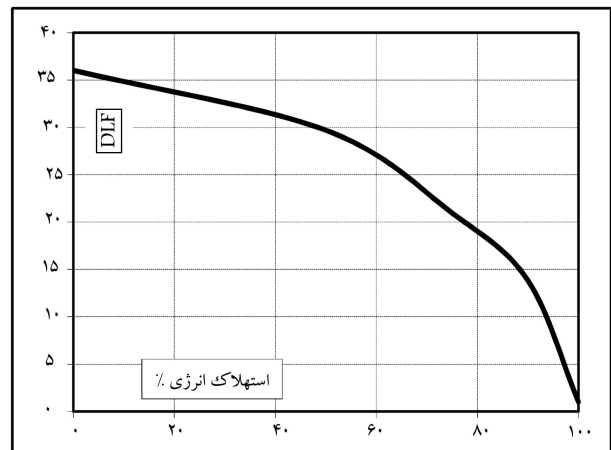
شکل ۱۰. تغییرات ضریب بار دینامیکی با دوری تناوب ارتعاشی تیر به ازاء مقادیر مختلف φ .



شکل ۸. استخراج منحنی تغییرات ضریب بار دینامیکی به ازاء $\varphi = 0.3$.



شکل ۱۱. تغییرات ضریب بار دینامیکی با پارامتر φ به ازاء مقادیر مختلف زاویه θ آوار با تیر در برخورد.



شکل ۹. اثر استهلاک انرژی تخریب در ضریب بار دینامیکی.

ضریب بار دینامیکی از نسبت بیشینه نیروی دینامیکی به بیشینه نیروی استاتیکی استفاده می شود.

در شکل ۱۲، تغییرات ممان بیشینه دینامیکی غیرخطی به ممان بیشینه خمیری مقطع به ازاء زاویه سقوط صفر و تنش بیشینه جاری شدن 30° مگاپاسکال و ۵٪ سخت شونده کرنش نشان داده شده است.

در این تحلیل ها سرعت بارگذاری طوری در نظر گرفته شده است که رفتار غیرخطی کاملاً حاصل شود. در حالتی که رفتار به سمت خطی میل می کند، یعنی تقریباً به ازاء مقادیر ضریب بار دینامیکی حدود ۳ تا ۴، نتایج روش خطی و غیرخطی به یکدیگر نزدیک می شوند. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل غیرخطی برای بررسی نحوه تغییرات ضریب بار دینامیکی نیز صورت گرفته است. نمونه ای از نتایج برای میزان تنش جاری شدن و میزان سخت شونده مدل غیرخطی مصالح در شکل های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

همان طور که ملاحظه می شود با افزایش تنش جاری شدن فولاد ضریب بار دینامیکی کاهش می یابد. از طرف دیگر، با افزایش میزان سخت شونده کرنش فولاد در مدل دوخطی نیز ضریب بار دینامیکی روند کاهشی از خود نشان می دهد.

برای بررسی صحت مدل دینامیکی غیرخطی از نتایج آزمایش های انجام شده موجود بر روی نمونه های کوچک می توان استفاده کرد. این آزمایش ها برای تیر دو سر ساده و دو سر گیردار انجام شده است. شکل ۱۵، نمونه ای از این نتایج را برای یک تیر فولادی با مقطع مربع به ابعاد 8×5 میلی متر و طول 10.6 میلی متر با تنش جاری شدن 337 مگاپاسکال نشان می دهد.^[۱۵]

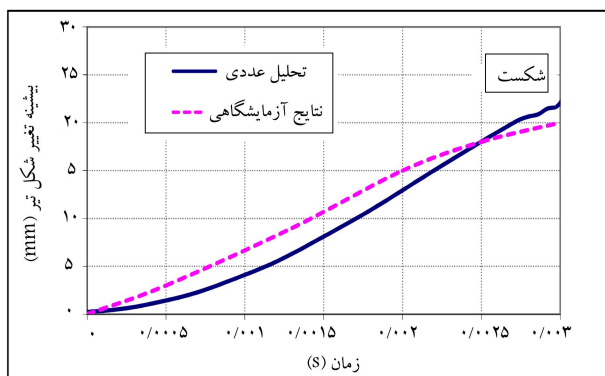
0.15 تا 0.55 مشاهده می شود. با افزایش این پارامتر مقدار ضریب بار دینامیکی هم افزایش نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، افزایش دوری تناوب سازه تحت برخورد باعث کاهش شدید ضریب بار دینامیکی می شود.

در تیرهای کوتاه تحت برخورد آوار مود خرابی برشی عمدتاً حاکم است و شکست آبی در ناحیه ای نزدیک به تکیه گاه یا اتصال اتفاق می افتد. افزایش دوری تناوب سازه با افزایش طول یا تغییر خصوصیات تیر و نیز رفتار غیرخطی آن میسر خواهد بود.

در شکل ۱۱، تغییرات ضریب بار دینامیکی ریزش آوار بر حسب پارامتر φ به ازاء مقادیر مختلف زاویه برخورد آوار با سازه از 0° تا 20° درجه برای دوری تناوب اول ارتعاشی تیر برابر 0.21 ثانیه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، افزایش زاویه برخورد که طبیعتاً همراه با تغییر مختصات نقطه برخورد بوده است، باعث کاهش ضریب بار دینامیکی شده است. این روند تغییرات به ازاء مقادیر متفاوت سایر پارامترها ثابت باقی می ماند.

۴.۴. اثرات رفتار غیرارتجاعی

در حالت رفتار غیرخطی نسبت تغییرمکان بیشینه دینامیکی به تغییرمکان بیشینه استاتیکی تعریف مناسبی برای ضریب بار دینامیکی نخواهد بود. چرا که برخلاف تحلیل ارتجاعی، در حالت دینامیکی غیرخطی و خمیری شدن مقاطع نرخ افزایش تغییرمکان دینامیکی غیرخطی به سرعت افزایش می یابد و مقادیر ضریب بار دینامیکی به طور غیرواقعی افزایش می یابد. در این نوع تحلیل برای به دست آوردن



شکل ۱۵. مقایسه‌ی نتایج مدل دینامیکی غیرخطی با نتایج آزمایش‌های موجود روی تیرهای فلزی.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه ضمن معرفی و مقایسه‌ی روش‌های مختلف، محاسبه‌ی ضربه‌ی دینامیکی ناشی از فروریزش آوار با انجام تحلیل‌های حساسیت دینامیکی صریح تماس غیرخطی برخورد، ضمن شناسایی پارامترهای مؤثر و حساس بر روی سازه، نمودارهای پیشنهادی طراحی برای تعیین ضریب ضربه‌ی ناشی از بار دینامیکی ریزش آوار استخراج شده است.

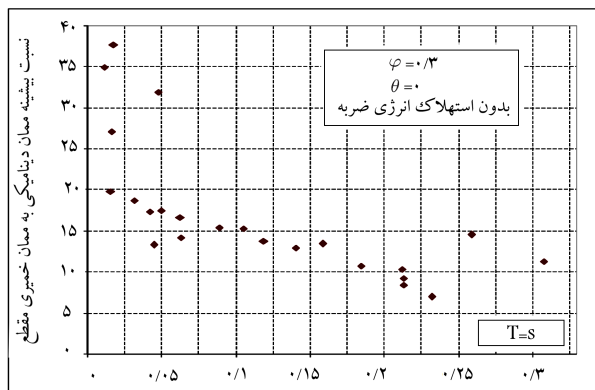
مقادیر معمول ضریب بار دینامیکی بدون احتساب استهلاک انرژی برای ساختمان‌های متداول بین ۲۰ تا ۵۰ به دست می‌آید، که در حالت ایده‌آل منجر به شکست کامل سازه تحت اثر آن می‌شود. به‌طور واقع‌بینانه و با احتساب حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد استهلاک انرژی ناشی از شکل‌پذیری سازه در سازه‌های با سطح شکل‌پذیری متوسط، اثر استهلاک پوشش‌های غیرسازه‌ی و سقوط تأخیری آوار از ۰ تا ۵۰ درصد تأخیر زمانی و احتساب زاویه‌ی سقوط واقعی که معمولاً بیش از صفر درجه است، مقادیر ضریب بار دینامیکی ناشی از ریزش آوار به حدود ۲ تا ۱۰ می‌رسند. این محدوده‌ی بار در بسیاری از شرایط با احتساب فرضیات فوق منجر به فروریزش سازه نمی‌شوند، گرچه برای مقادیر حد بالا یعنی نزدیک‌تر به ۱۰، خمیری‌شدن کامل و تخریب یا فروریزش می‌تواند قابل تصور باشد.

نتایج تحلیل‌های غیرخطی نشان می‌دهند که در حالت رفتار غیرارتجاعی ضریب بار دینامیکی به دست آمده برای تیرهای معمول مورد مطالعه اعدادی بین ۸ تا ۱۲ بوده است. البته تحلیل‌های فوق نشان داده است که تحقق رفتار خمیری خمشی کامل و جذب بیشینه‌ی انرژی در سرعت‌های معمول سقوط آوار مثلاً از یک طبقه رخ نمی‌دهد.

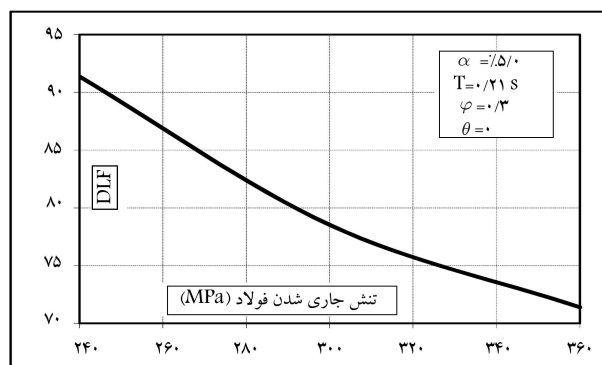
مود شکست در سازه‌ها با اتصالات مفصلی بیشتر به سمت مفاصل خمیری برشی در اتصالات خواهد بود و جذب انرژی زیادی حاصل نمی‌شود. [۱۷، ۱۶] بنابراین باید از سایر تمهیدات برای افزایش شکل‌پذیری اتصالات و ایجاد مکانیزم شکست نرم و در نتیجه کاهش آوار ریزشی استفاده کرد. [۱۸]

تشکر و قدردانی

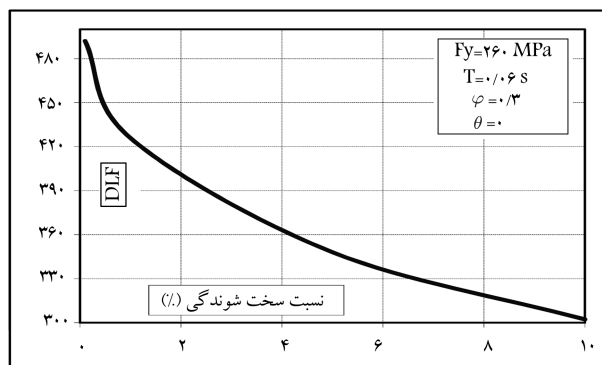
از حمایت‌های فنی دفتر فناوری شرکت کلان اندیشان پویا قدردانی می‌شود.



شکل ۱۲. تغییرات ممان بیشینه‌ی دینامیکی غیرخطی به ممان بیشینه‌ی خمیری مقطع به ازاء زاویه‌ی سقوط صفر و تنش بیشینه‌ی جاری شدن ۳۰۰ مگاپاسکال و ۵٪ سخت‌شوندگی کرنش و $\varphi = 0.3$.



شکل ۱۳. حساسیت ضریب بار دینامیکی به میزان تنش جاری‌شدن فولاد.



شکل ۱۴. حساسیت ضریب بار دینامیکی به میزان سخت‌شوندگی کرنش فولاد در مدل غیرخطی سخت‌شونده.

مقایسه‌ی تاریخچه‌ی زمانی پاسخ نشان می‌دهد که مدل کشسان خمیری دوخطی در تحلیل دینامیکی برخورد نتایج قابل قبولی به دست می‌دهد. در مورد نمونه‌ی انتخاب‌شده، میانگین اختلاف ۸٫۶٪ بوده است.

جدول ۱ نیز نتایج مقایسه‌ی تحلیل حساسیت آزمایش را نشان می‌دهد که روند تغییرات به دست آمده از تحلیل حساسیت عددی را تأیید می‌کند. البته تفاوت جزئی شرایط مرزی آزمایش و تحلیل، اختلاف کمی در بیشینه‌ی تغییرشکل شکست دو مدل ایجاد کرده است.

(References) منابع

1. U.S. General Services Administration, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for new Federal Office Buildings and Major Modernization Projects (2004).
2. AISC, *Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design. I*, American Institute of Steel Construction, Inc. (2008)
3. Dusenberry, D.O. "Review of existing guidelines and provisions related to progressive collapse", MMC's Workshop on Prevention of Progressive Collapse, Illinois (2002).
4. Eurocode8, *Design Provisions for Structures*, European Committee for Standardization (2004).
5. National Research Council of Canada, *National Building Code of Canada*, Ottawa, Canada (2010).
6. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, 3rd Edition, Prentice Hall, New York (2006).
7. Bathe, K.J., *Finite Element Procedure in Engineering Analysis*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall (1995).
8. Kausel, E. "Inferno at the world trade center", NY, Massachusetts Institute of Technology <http://web.mit.edu/civenv/wtc> (2001).
9. Aliabadi, M.H. and Brebbia, C.A., *Computational Methods in Contact Mechanics*, Computational Mechanics Publications, Bell & Bain Ltd., Glasgow, Great Britain (2003).
10. Jones, N. "Quasi-static analysis of structural impact damage", *Journal of Constructional Steel Research*, **33**(3), pp. 151-177 (1995).
11. Horr, A.M. and Safi, M. "Multi-layered energy absorber frames for tall building under high speed impact", *Int. Jour. of Structural Design of Tall Buildings & Special Structures*, **5**(12), pp. 423-450 (2004).
12. ANSYS General Purpose F.E. Program, Ansys Inc., Houston, PA, USA (2011).
13. Wu, K.Q. and Yu, T.X. "Simple dynamic models of elastic-plastic structures under impact", *International Journal of Impact Engineering*, **25**(8), pp. 735-754 (2001).
14. Liu, J. and Jones, N. "Experimental investigation of clamped beams struck transversely by a mass", *Int. J. of Impact Engineering*, **6**(4), pp. 303-335 (1987).
15. Yang, J.L. and Xi, F. "Experimental and theoretical study of free-free beam subjected to impact at any cross-section along its span", *International Journal of Impact Engineering*, **28**(7), pp. 761-781 (2003).
16. U.S. Department of State, Office of Foreign Buildings Operations, "Progressive collapse design guidelines, Phase 1: Literature search" (2001).
17. U.S. Department of Defense, *Interim Antiterrorism/Force Protection Construction Standards*, Guidance on Structural Requirements (2001).
18. Gurley, C. "Progressive collapse and earthquake resistance", *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, ASCE, **13**(1), pp. 9-23 (2008).