

تخمین الگوی بار ناشی از ریزش آوار زلزله بر تیرهای فولادی

پویا زرپرور^{۱*}، محمد صافی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

۲- استادیار گروه سازه، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

pouyazarparvar@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۱۷

چکیده- آنچه که در طول یک زلزله و اثر آن بر روی ساختمانها رخ می دهد آسیب و تخریب موضعی ساختمان می باشد. در این شرایط سازه در حین وقوع زلزله و در طی لحظاتی، تحت یک بار شوک و ضربه ناشی از آوار و خرابی اجزاء سازه قرار گرفته و علاوه بر حذف اجزا و المان هایی از سازه بار دینامیکی ناشی از زلزله با آوار ترکیب شده و بار افزایش یافته جدیدی را ایجاد می کند. مدلسازی ضربه کف طبقات بالایی به طبقه پایین تر با استفاده از برنامه های کامپیوتری حرفه ای امروزی که قادر به انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی می باشند امکان پذیر می باشد. اما حجم کاری مدلسازی کامپیوتری بویژه اگر سازه بزرگ و پیچیده باشد و تمام جزئیات نیز در نظر گرفته شوند، بسیار زیاد می شود. در این تحقیق سعی شده است که با محاسبه ی ضریب بار دینامیکی برای نمونه ای از تیرهای فولادی (در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک) به استخراج الگوی بار ضربه ی آوار تحت شرایط مختلف و در نتیجه ارایه ی یک الگوی بار گذاری معادل به منظور تخمین رفتار سازه در مقابل ریزش طبقات فوقانی گام برداشت. در طول تحقیق مشخص می شود که پارامترهایی نظیر زمان تناوب تیر، ارتفاع سقوط و جرم آوار اثر بسزایی بر نتایج بدست آمده دارند؛ بطوریکه با افزایش زمان تناوب و جرم آوار مقدار ضریب بار دینامیکی کاهش و با افزایش ارتفاع سقوط این مقدار افزایش می یابد.

واژگان کلیدی: بار ضربه، بار آوار، ضریب بار دینامیکی، الگوی بار ضربه.

۱- مقدمه

در لحظاتی، تحت یک بار شوک و ضربه ناشی از آوار و خرابی اجزاء سازه قرار گرفته و علاوه بر حذف اجزا و المان هایی از سازه بار دینامیکی ناشی از زلزله با آوار ترکیب شده و بار افزایش یافته جدیدی را ایجاد می کند. در چنین شرایطی این سوال مطرح می شود که چگونه می توان نسبت به کفایت سازه ای و ارزیابی عملکرد آن اظهار نظر نمود و چگونه باید این بار فوق العاده را محاسبه کرد و با چه روشی بار محاسبه شده را به سازه اعمال نمود.

آنچه که در طول یک زلزله و اثر آن بر روی ساختمانها رخ می دهد آسیب و تخریب موضعی ساختمان می باشد که بسته به شرایط مختلف نظیر پارامترهای زلزله (مانند شدت، مرکز، مدت زمان و...)، شرایط ژئوتکنیکی منطقه و چگونگی طراحی مقاوم ساختمان در برابر زلزله میزان آسیب به اجزاء سازه ای و غیر سازه ای ساختمان می تواند متفاوت باشد. در این شرایط سازه در حین وقوع زلزله و

همواره در ارتباط با مسایل و پروژه هایی که جامعه ی مهندسی با آنها روبه رو می شود اصل ساده سازی مسئله یکی از اصول مهمی است که مورد توجه قرار می گیرد. این امر در رابطه با مسایل دینامیکی پر رنگتر می شود چراکه محاسبه ی پاسخ دینامیکی یک سازه (با صرف نظر از وسعت و پیچیدگی سازه) مستلزم انجام تحلیل های زمان بر، استفاده از افراد متخصص و داشتن بستر نرم افزاری مناسب می باشد. آنالیزهای شبه استاتیکی نمونه هایی از این تلاش مهندسی می باشند. با در نظر گرفتن چنین رویکردی این مقاله به محاسبه ی اثر دینامیکی بار ضربه بر نمونه هایی از تیرهای فولادی و استخراج الگوهای بار ضربه می پردازد تا با در نظر گرفتن آنها به توان با توجه به بارهای استاتیکی وارده بر تیر، از رفتار تیرها و در نتیجه از رفتار ساختمان در مقابل سقوط آوار و طبقات فوقانی بر روی طبقات زیرین برآورد مناسبی به عمل آید.

۲- ادبیات فنی و تحقیقات گذشته

خرابی کامل برج های مرکز تجارت جهانی در نیویورک در حین حادثه ی ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱، خاطره غم انگیزی است که همواره یادآور عواقب ویران کننده ی وقوع پدیده ی خرابی پیشرونده^۱ در ساختمان های بلند می باشد. در حقیقت انتشار چنین خرابی های گسترده ای در ارتفاع ساختمان نتیجه ی اثر دینامیکی بار آواری است که خود پیامد وقوع خرابی های موضعی ساختمان در اثر بارگذاری های نامتعارف^۲ می باشد. طراحی برای مقابله با خرابی پیشرونده نیازمند این است که ساختمان ظرفیت لازم برای محدود کردن شکست و خرابی ناگهانی اعضای خود را داشته باشد (Dusenberry 2002). به عبارت دیگر، سازه باید بتواند در مقابل اثر دینامیکی بار ضربه ی آوار ایستادگی کند.

با این وجود تعداد کمی از آیین نامه های موجود و کتب راهنمای طراحی را می توان یافت که روند طراحی ساختمان ها برای مقابله با خرابی پیشرونده، به ویژه اثرات دینامیکی بار ضربه ی حاصل از ریزش آوار، را در نظر گرفته باشند. از جمله آیین نامه های و استانداردهایی که در آنها به موضوع خرابی پیشرونده اشاره شده است عبارتند از:

ASCE7 2002, NRCC 1996, EC8 1994
GSA2000 و USDS 1996.

یکی از روش های رایج طراحی توصیه شده در این آیین نامه ها حذف ناگهانی ستون ها و سایر اعضای بار بر ساختمان می باشد. براساس این روش و نیز با لحاظ کردن روش مسیر های متغیر بارگذاری^۳، استعداد وقوع تخریب پیش رونده در سازه کاهش داده می شود به شرطی که سازه طوری طراحی شده باشد که بتواند خرابی های موضعی پیش آمده در اثر حذف ناگهانی عضو باربر قائم را تحمل کند. با این وجود از جمله محدودیت های روش پیشنهاد شده عدم توجه به خرابی های موضعی در ساختمان است که علت اصلی آسیب پذیری ساختمان در مقابل خرابی پیشرونده بوده و همچنین در نظر نگرفتن سقوط بار آوار و اثر مهم دینامیکی آن بر اعضای زیرین می باشد. وزارت دفاع آمریکا در استاندارد موقت مبارزه با تروریست تا حدی به موضوع ریزش بار آوار پرداخته است و عنوان می کند که به منظور در نظر گرفتن اثر دینامیکی بار آوار، مقدار باری که بر طبقات زیرین سقوط می کند باید تا حدی افزایش یابد (USDD 2001). از آنجایی که تحلیل دینامیکی ساختمان ها بسیار پیچیده و زمان گیر است، در برخی موارد مناسب است تا با استفاده از رویکرد بار استاتیکی معادل که بصورت ضرب مقدار بار آوار در "ضریب اثر دینامیکی"^۴ تعریف می شود، اثرات دینامیکی

3- Alternate Path Loading Method
4- Dynamic impact factor

1- Progressive Collapse
2- Abnormal loading

ریزش طبقات فوقانی بر طبقات زیرین مطالعه شود (Grierson et al. 2004, Safi and Grierson 2004).

۳- تحلیل دینامیکی ضربه

بنابر مطالب ذکر شده مقاومت ساختمان در مقابل ضربه رابطه ی مستقیمی با میزان توانایی سازه (تحت شرایط جدید) در بازتوزیع نیروها و پایداری سازه بعد از این حوادث شدید دارد. با این وجود، به دلیل مقدار زیاد انرژی جنبشی که کف و یا کف های طبقات بالاتر به هنگام خرابی و سقوط دارند هرچند که بعید به نظر می رسد ولی این امر امکان پذیر است که بخش های پایینی سازه بتواند بار ضربه را تحمل کرده و از وقوع خرابی پیشرونده جلوگیری کند [۱].

از جمله عوامل اصلی و تأثیر گذار در این قابلیت می توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) تعداد کف های خراب شده که بالاتر از طبقه مورد نظر قرار دارند.

ب) مقدار کاهش در انرژی جنبشی کف ها در حین سقوط که در نتیجه جذب انرژی طبقات بالاتر در برابر ضربه صورت می گیرد.

ج) توانایی طبقات پایین تر برای تحمل بار اضافی آوار و محاسبه اثرات دینامیکی مرتبط [۲].

نرم افزار ANSYS جهت تحلیل مسایل دینامیکی در محدوده تغییر شکل های بزرگ و مسایل تماسی پیچیده، حل گر قدرتمندی به نام LS-DYNA را در اختیار کاربر قرار داده است که به روش صریح به حل مسایل دینامیکی می پردازد. بطور کلی هر دو روش ضمنی و صریح نرم افزار از تفاضل محدود برای پیش بینی تغییر فرم مدل در زمان آینده (انتگرال گیری زمانی) استفاده می کنند [۳]. با این تفاوت که در حالت ضمنی از روش Newmark استفاده

می شود و مقدار جابجایی در زمان آینده $(t+\Delta t)$ مستقیماً از رابطه $[K] \cdot \{U\}_{t+\Delta t} = F^a + P_t$ به دست می آید که در آن $[K]$ ماتریس سختی و F^a بردار نیروی اعمال شده به مدل و P_t برداری است که شامل ترم هایی از جابجایی، سرعت، شتاب، ماتریس جرمی و ماتریس میرایی در مرحله زمانی قبل می باشد. اما تفاوت اصلی روش حل صریح نسبت به روش حل ضمنی در آنستکه از قانون تعادل $M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F$ استفاده نموده و مقدار سرعت و جابجایی را در معادلات فوق جایگزین می کند و لذا برای محاسبه U نیازی به معکوس کردن ماتریس سختی ندارد و لذا سرعت حل آن افزایش می یابد [۴].

۳-۱- روش انتگرالی صریح

فرم اولیه روش انتگرالی صریح، مبنی بر روش تفاضلی مرکزی است که شتاب و سرعت در زمان t می تواند مانند زیر نوشته شود:

$$\ddot{U}^t = \frac{1}{\Delta t^2} (U^{t-\Delta t} - 2U^t + U^{t+\Delta t}) \quad (1)$$

$$\dot{U}^t = \frac{1}{2\Delta t} (U^{t+\Delta t} - U^{t-\Delta t}) \quad (2)$$

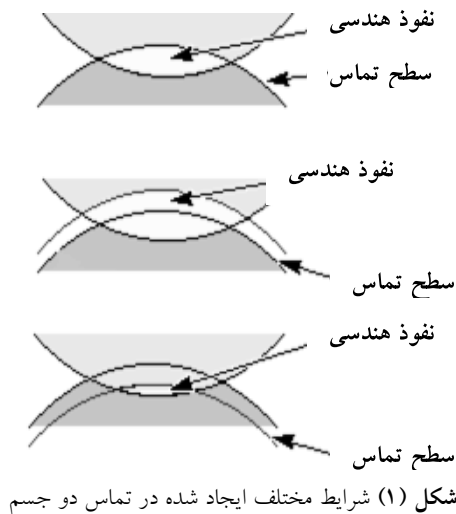
معادله دیفرانسیلی حاکم حرکت زمان t می تواند مانند زیر نوشته شود:

$$[M][\ddot{U}^t] + [K][U^t] + [C][\dot{U}^t] = [F^t(t)] \quad (3)$$

با جایگزینی معادلات (۱) و (۲) در معادله (۳) می توان معادله ی تغییر مکان در زمان $t+\Delta t$ پیدا شود (معادله ۴).

همانطور که از معادله (۴) بر می آید، در روش انتگرالی صریح، بردار تغییر زمان $t+\Delta t$ مبنی بر بکارگیری شرط تعادل دینامیکی در زمان $t+\Delta t$ بکار گرفته شده است. برای محاسبه تغییر مکان در زمان t ، هر دو تغییر مکان در زمانهای $t+\Delta t$ و $t-\Delta t$ باید معلوم باشند. در آغاز آنالیز

تابع پنالتی، به کار می‌روند. روش ضریب لاگرانژ یک روش سختی تکمیل شده هست که در آن متغیرهای اضافی برای حل مسأله نشان داده شده است.



شکل (۱) شرایط مختلف ایجاد شده در تماس دو جسم

سیستم با دو قسمت که دو شبکه اجزا محدود مختلف به کار گرفته شده برای مدل کردن سیستم در شرط استاتیک مانند رابطه (۷) است:

$$[K_1][U_1]=[F_1] \quad [K_2][U_2]=[F_2] \quad (7)$$

معادله متعادل باز شده برای یک سیستم می‌تواند مانند رابطه (۸) نوشته شود:

$$\begin{bmatrix} K_1 & \\ & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

اگر این دو قسمت با یکدیگر تماس برقرار کنند، سیستم تحمیل شده باید برای جلوگیری کردن از نفوذ به کار برده شود. مانند:

$$\begin{bmatrix} L_1^i & L_2^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^i \\ U_2^i \end{bmatrix} = [\delta^i] \quad (9)$$

که در آن i نشان دهنده i امین افزایش است،

دینامیکی، بردار تغییر مکان $[U^{t-\Delta t}]$ نمی‌تواند با استفاده از روشهای متداول محاسبه شود. (یعنی اگر $t=0$ ، بردار تغییر مکان $[U^{-\Delta t}]$ معلوم نیست). دو بردار اولیه $[U_0]$ ، $[\dot{U}_0]$ باید در آغاز آنالیز تعریف شوند (بکارگیری آنالیز استاتیک اولیه یا تعریف کاربر). محاسبه کردن اعضای بردار $[U^{-\Delta t}]$ مانند رابطه (۵) است که i نشان دهنده i امین المان بردار می‌باشد. در حالت ساده که می‌توان از خصوصیات میرایی وابسته به سرعت صرف نظر کرد. ماتریس قطری جرم فرض شده، می‌تواند مانند رابطه (۶) نوشته شود [۵].

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) [U^{t+\Delta t}] = [F^t(t)] \quad (4)$$

$$-\left([K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right) [U^t] - \left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) [U^{t-\Delta t}]$$

$$U^{-\Delta t}_i = (U_0)_i - \Delta t (\dot{U}_0)_i + \frac{\Delta t^2}{2} (\ddot{U}_0)_i \quad (5)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] \right) [U^{t+\Delta t}] = [F^t(t)]$$

$$-\left([K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right) [U^t] - \left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] \right) [U^{t-\Delta t}] \quad (6)$$

۳-۲- مکانیک و دینامیک تماس در حالت ضربه

طراحان مهندسی پیشرفته اهمیت تماس را در جواب دینامیکی سیستمهای مرتعش درک کرده‌اند. رفتار غیرخطی شدید مسائل تماس به خاطر تغییر شرایط مرزی و آثار اصطکاک می‌تواند منجر به یک آنالیز دینامیکی پیچیده شود. قیودی که به مرزهای سیستم ارتعاش اعمال می‌شوند، می‌توانند بخاطر اضافه یا کم کردن شرایط بارگذاری تغییر کنند (شکل ۱). در چنین حالاتی یک سری از مسائل برخورد موجودند که برای گرفتن جواب‌های آنها، روش آنالیز غیرخطی لازم است. شکل (۱) شرایط تماس سطح به سطح را به صورت شماتیک نشان می‌دهد که در آن نفوذ محدود می‌تواند اتفاق افتد.

اکثر برنامه‌های اجزا محدود که با مسائل تماس سر و کار دارند، برای هر یک از این دو تابع، ضریب لاگرانژ یا

اگر چه در اینجا روش‌های مخصوصی برای به کار گرفتن به منظور ایجاد تقارن در ماتریس سختی تکمیل شده وجود دارد، ماتریس غیر متقارن و شامل مؤلفه‌های قطری صفر است که به یک حل کننده مخصوص برای مسائل تماس احتیاج دارد [۶].

۴- الگوی بار ضربه ای ناشی از ریزش آوار

با توجه به مدهای خرابی حاصل از بار ضربه‌ای و نیز تئوری‌های مربوط به مسئله‌ی برخورد، می‌توان پارامترهای موثر در پیشینه‌ی پاسخ دینامیکی یک تیر تحت بار ضربه‌ای ناشی از ریزش آوار را به‌دست آورد و با انجام آنالیزهای لازم میزان حساسیت پیشینه‌ی پاسخ دینامیکی را نسبت به این پارامترها محاسبه کرد. بنابر این می‌توان تمام عواملی که بر عملکرد تیر تحتانی (تیر تحت اثر ریزش آوار) دخالت دارند به این صورت دسته بندی کرد: جرم آوار (DL)، سرعت برخورد آوار، زاویه برخورد آوار (θ) و زمان تناوب تیر تحتانی (T).

در این پژوهش به منظور بررسی نقش هریک از عوامل فوق و میزان حساسیت پاسخ دینامیکی تیر تحتانی نسبت به آنها، برای هریک از کمیت‌های فوق نمونه‌هایی در نظر گرفته شده و پس از تحلیل برخورد بین دو تیر فوقانی و تحتانی، تعیین پیشینه‌ی پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی و در نتیجه محاسبه ضریب بار دینامیکی اثر هریک از کمیت‌های فوق سنجیده می‌شود. مقادیر و شرایط فرض شده برای هریک از عوامل ذکر شده مطابق جدول (۱) است.

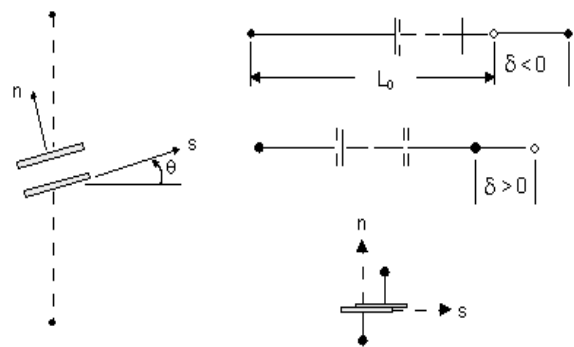
همان‌گونه که در شکل (۳) نمایش داده شده است تیرها به صورت سه بعدی مدل سازی و در مش‌بندی تیرهای فولادی از المان Shell163 استفاده شده است. این المان شامل ۴ گره با قابلیت خمش حول محورهای X و Y، که

$[I_1 \ I_2]$ یک ماتریس ضرایب قید و $[\delta^i]$ بردار است که تغییر مکان‌های اصلاح شده را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از تداخل شبکه‌ها، متغیرهای ضریب لاگرانژ برای بلند شدن نیروهای تماس، بخاطر لمس کردن دو سطح تماس که باید روی دو سطح تماس پخش شده باشد، محاسبه می‌کنند. شکل (۲) شرایط تماس سطح با سطح با اصطکاک را که در بسیاری از مسائل تماس می‌تواند اتفاق افتد، نشان می‌دهد. تغییر ضرایب قید مبنی بر چگونگی تماس بین دو سطح باید مانند زیر محاسبه شود:

$$\begin{bmatrix} J_1^i \\ J_2^i \end{bmatrix} [c^i] = \begin{bmatrix} c_1^i \\ c_2^i \end{bmatrix} \quad (10)$$

که $[J]$ ماتریس ضریب نیرو، $[c^i]$ بردار نیروهای تماس و $\begin{bmatrix} c_1^i \\ c_2^i \end{bmatrix}$ بردار نیروهای گره ای است.

در هر افزایش، ماتریس ضریب نیرو اصلاح می‌شود تا حالت تماس بین دو سطوح را در نظر بگیرد. ماتریس سختی تکمیل شده و بردار بار افزایشی می‌تواند مانند زیر نوشته شوند:

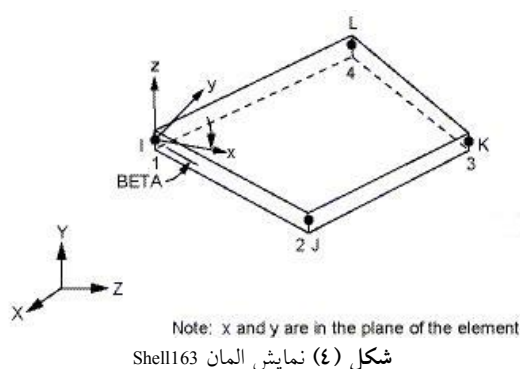


شکل (۲) شرایط تماس سطوح با اصطکاک

$$\begin{bmatrix} K_1 & J_1^i & J_2^i \\ K_2 & L_1^i & L_2^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^i \\ U_2^i \\ c^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^i F_1^k \\ \sum_{k=1}^i F_2^k \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{i-1} c_1^k \\ \sum_{k=1}^{i-1} c_2^k \\ \delta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{i-1} K_1 U_1^k \\ \sum_{k=1}^{i-1} K_2 U_2^k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

جدول (۱) شرایط و مقادیر فرض شده برای پارامترهای ضربه

مقطع تیرهای فولادی	طول تیرها	جرم آوار	زاویه برخورد آوار	ارتفاع سقوط آوار
IPE16 IPE18 IPE20	۴، ۶ و ۸ (متر)	۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ (کیلوگرم بر متر مربع)	۵، ۱۵ و ۳۰ (درجه)	۳، ۴ و ۶ (متر)



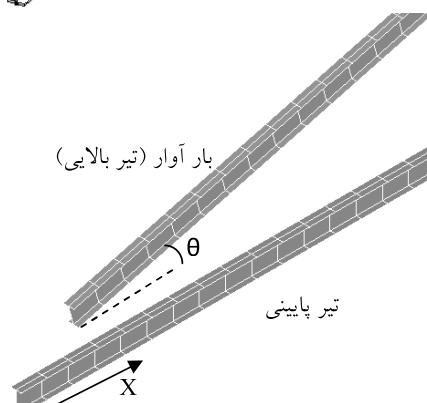
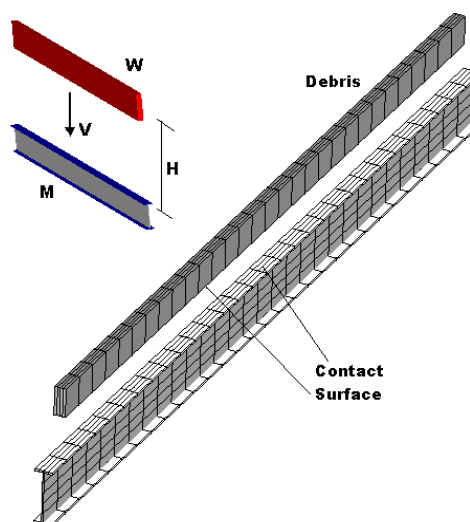
برای هر کدام از تیرها پاسخ دینامیکی حاصل از ضربه ی آوار، با فرض رفتار تیر در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک، به دست آمده و پس از مشخص کردن بیشترین جابه‌جایی هر المان در راستای قائم، منحنی پوش بیشینه‌ی تغییر مکان تیرها رسم می‌شود.

در ادامه با بررسی الگوهای به دست آمده به طور کامل واضح است که پارامتر زاویه‌ی سقوط آوار از جمله عواملی است که نقش به‌سزایی بر شکل کلی الگوی بار ضربه دارد. از آنجایی که نحوه‌ی سقوط آوار به صورت سقوط آزاد است، برای محاسبه‌ی سرعت ریزش آوار، با توجه به ارتفاع فرض شده برای طبقات سازه، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$V = \sqrt{2gH} \quad (۱۲)$$

طبق آنالیزهای انجام شده، ضریب بار دینامیکی که عبارت است از نسبت بیشترین تغییر مکان دینامیکی به تغییر مکان استاتیکی، در نقاط مختلف طول تیر تحت شرایط مختلف،

هر دو در یک صفحه قرار دارند، است. برای هر گره از این المان ۱۲ درجه آزادی تعریف شده است که عبارتند از مولفه‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب در راستای سه محور اصلی، به‌علاوه‌ی دوران حول محورهای اصلی (شکل (۴)). [۳]. همچنین باید گفته شود که باتوجه به مطالعات انجام شده مبنی بر محل تشکیل مفصل پلاستیک در یک تیر دو سر گیردار با مقطع I شکل که تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفته است، طول موثر تیر فوقانی که در اثر مفصل شدن از دو انتهای خود دچار گسیختگی و ریزش می‌شود با قضاوت مهندسی معادل ۰/۸ دهانه تیر در نظر گرفته شده است [۷].



شکل (۳) نمایش مدل سه بعدی تیرهای فولادی، بار آوار و معرفی پارامترهای θ و X .

از پاسخ‌های به دست آمده برای مقدار DLF بازای زوایای مختلف برخورد برای هر دو رفتار الاستیک و پلاستیک نمایش داده شده است. مشخصات فولاد استفاده شده مطابق جدول (۲) است. نکته‌ی مهمی که از بررسی دقیق‌تر نتایج حاصل برای تمام نمونه‌ها به دست می‌آید این است که روند کلی تغییرات مقدار ضریب بار دینامیکی در طول تیر بازای یک زاویه برخورد ثابت به گونه‌ای است که در بخش‌هایی از تیر که در مجاورت محل برخورد آوار قرار گرفته‌اند (انتهای نزدیک)، مقدار DLF به صورت نزولی تغییر می‌کند، این مقدار تقریباً در ناحیه میانی تیر به یک مقدار ثابت رسیده و برای المانهای انتهایی دور تیر با شیب مثبت افزایش می‌یابد.

جدول (۲) مشخصات فرضی برای تیرهای فولادی.

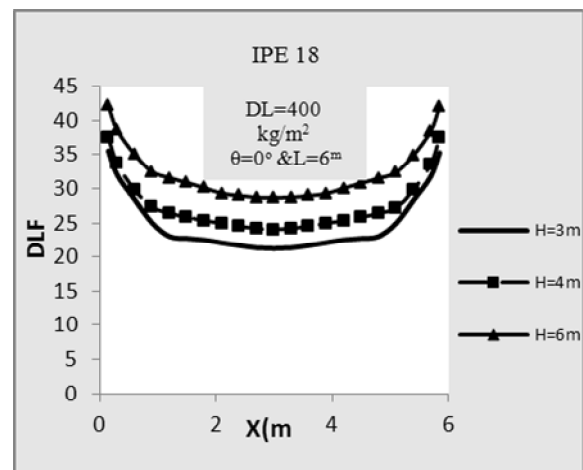
مدول الاستیسیته	$E = 2 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}$
ضریب پواسون	$\nu = 0.3$
وزن واحد حجم	$7850 Kgf/m^3$
تنش تسلیم	$2400 Kgf/cm^2$

با این فرض که برخورد آوار با زاویه ۳۰ درجه صورت می‌گیرد، مشاهده می‌شود که نمودارهای به دست آمده بیشتر شبیه به تابع ضربه‌ی مثلث کاهشی است، به این معنا که در یک نقطه از تیر مقدار DLF به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد و برای سایر نقاط تیر این مقدار در سطحی پایین‌تر به صورت ثابت باقی می‌ماند (شکل ۶).

از بررسی نتایج مربوط به ناحیه الاستیک مشخص می‌شود که پاسخ‌های به دست آمده با نسبت $\sqrt{\frac{H}{DL}}$ ، رابطه‌ی مستقیم دارند، H ارتفاع سقوط و DL برابر است با ترکیب بار مرده (در واحد سطح) و درصدی از بار زنده (در واحد سطح) که در بارگذاری لرزه‌ای برای کف طبقات در نظر گرفته می‌شود.

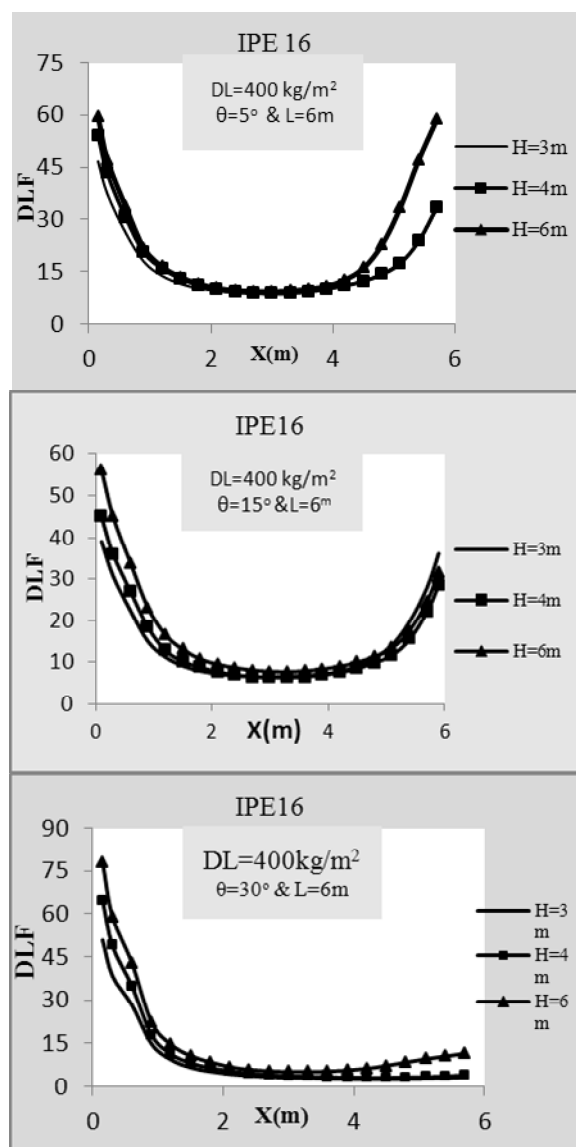
به دست آمده که با مقایسه آنها با یکدیگر می‌توان نقش هر یک از پارامترهای ضربه (ارتفاع سقوط، جرم آوار، زاویه سقوط و زمان تناوب تیر) را بر شکل‌گیری الگوهای بار ضربه مشاهده کرد. به گونه‌ای که با بررسی نتایج حاصل مشخص می‌شود که ضریب بار دینامیکی با جذر نسبت جرم آوار در واحد طول تیر به صلبیت خمشی تیر (EI) و همچنین مجذور طول تیر رابطه‌ی مستقیمی دارد، پس با ترکیب این مقادیر وابستگی بسیار نزدیک مقادیر ضریب بار دینامیکی به زمان تناوب اصلی تیر تحتانی اثبات می‌شود [۸]. با مطالعه‌ی نمودارهای به دست آمده برای زاویه برخورد صفر درجه می‌توان چنین استنباط کرد که متقارن بودن هندسه‌ی سازه و بارگذاری سازه منجر به پاسخ‌هایی متقارن در طول تیر شده است (شکل ۵).

چنانچه فرض شود که برخورد آوار با زاویه ۵ درجه صورت گیرد، نمودارهای به دست آمده برای مقدار DLF در طول تیر در مقایسه با نمودارهای مربوط به زاویه برخورد صفر درجه، از حالت تقارن خارج می‌شود.

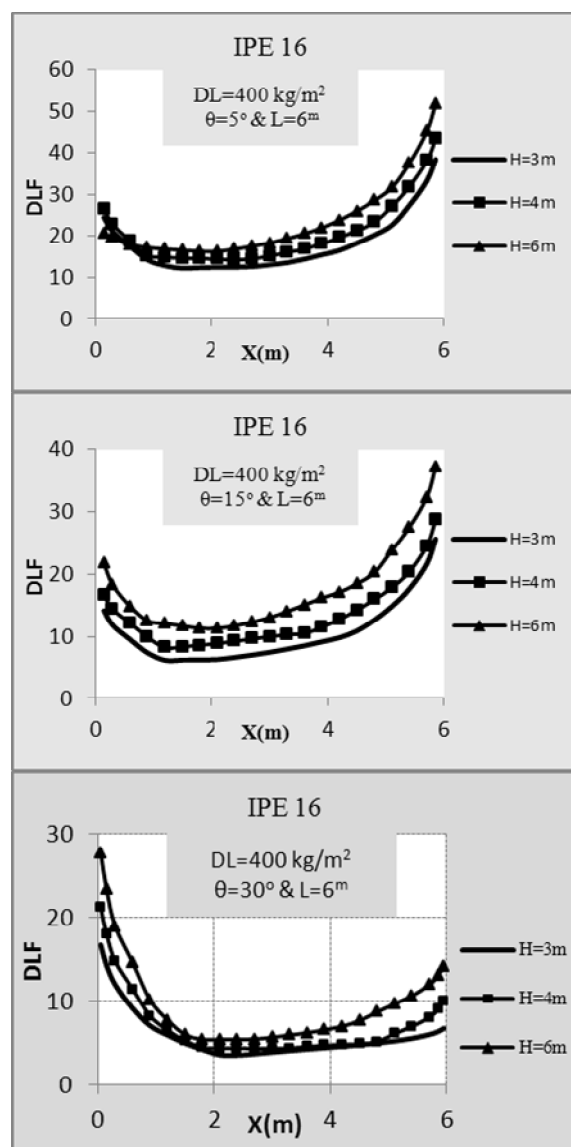


شکل (۵) تغییرات مقدار DLF در طول تیر برای نمونه‌ای از تیرهای فولادی

این تغییرات در پاسخ‌های به دست آمده بازای زوایای ۱۵ و ۳۰ درجه بیشتر ملموس است. در شکل (۶) و (۷) نمونه‌ای



شکل (۷) پاسخ پلاستیک نمونه ای از تیرهای فولادی در برابر ریزش آوار بازای زوایای مختلف برخورد.

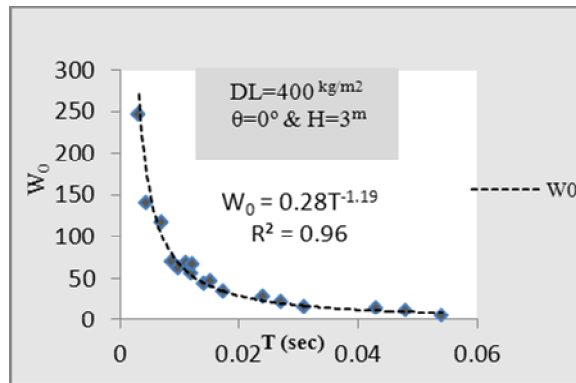


شکل (۶) پاسخ الاستیک نمونه ای از تیرهای فولادی در برابر ریزش آوار بازای زوایای مختلف برخورد.

رفتارهای مشاهده شده برای ناحیه پلاستیک مشابه رفتارهای ناحیه الاستیک است با این تفاوت که پاسخ‌های به دست آمده برای این ناحیه در قیاس با نتایج ناحیه الاستیک نسبت به متغیر ارتفاع سقوط حساسیت کمتری دارند و همان‌گونه که انتظار می‌رود مقادیر DLF نیز تغییر می‌کند (شکل ۷). پس می‌توان با ارایه نمودارهایی مشابه برای نواحی الاستیک و پلاستیک (البته با مقادیر مرزی

همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش ارتفاع ریزش آوار مقادیر ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی نیز افزایش می‌یابد چرا که بر اساس اصل کار و انرژی، با افزایش ارتفاع سقوط، انرژی پتانسیل آوار در لحظه سقوط و در نتیجه انرژی جنبشی آن در لحظه برخورد با تیر افزایش می‌یابد و این امر منجر به افزایش نیروی ضربه، افزایش تغییر مکان دینامیکی تیر و در پایان افزایش مقدار DLF می‌شود.

بیشینه‌ی تغییر مکان دینامیکی به تغییر مکان استاتیکی تیر برای تمامی نقاطی که در فاصله‌ی 0.25L تا 0.75L قرار گرفته‌اند، مطابق شکل (۸)، یک رابطه‌ی تقریبی برای مقدار W_0 برحسب زمان تناوب اصلی تیر تعریف کرد.



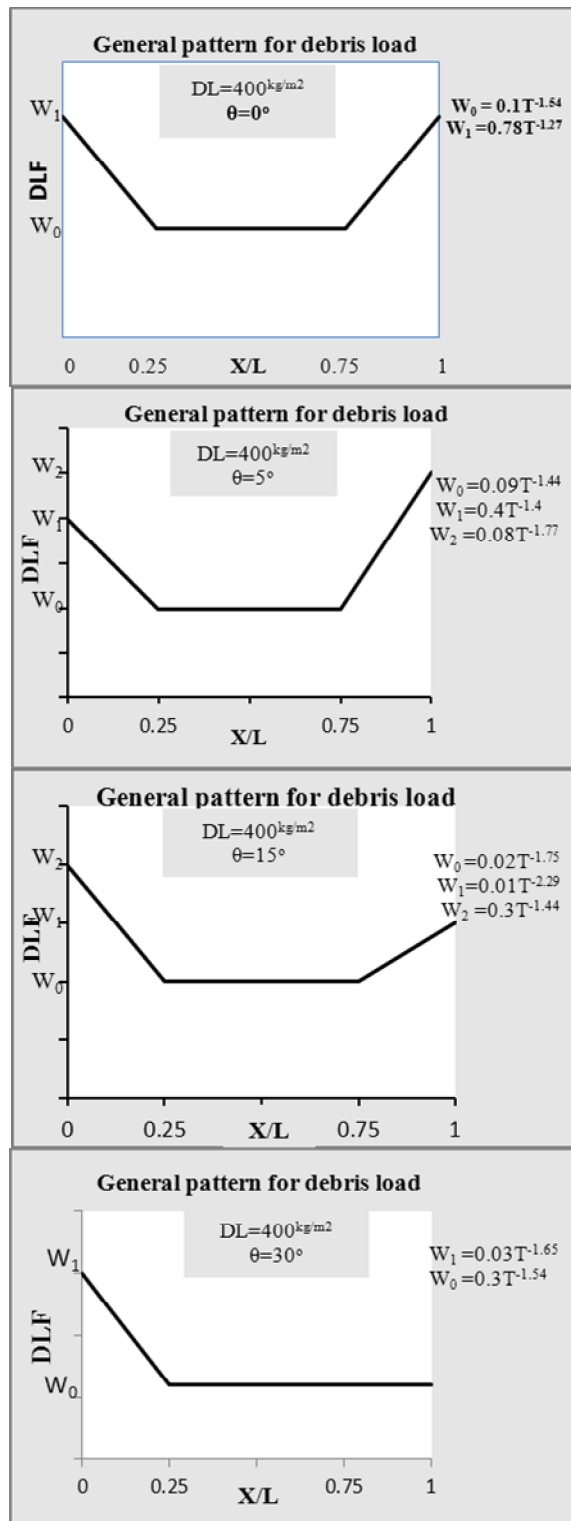
شکل (۸) نمایش تغییرات مقدار پارامتر W_0 برحسب زمان تناوب اصلی تیر.

پس از انجام محاسباتی مشابه، در پایان در شکل‌های (۹) و (۱۰) الگوهای پیشنهادی برای بارگذاری معادل برای برآورد عملکرد تیر در مقابل بار ضربه‌ی ریزش آوار برای نواحی الاستیک و پلاستیک نمایش داده شده‌اند. نکته لازم که در هنگام استفاده از این الگوها باید مدنظر قرار داد این است که الگوهای پیشنهاد شده با فرض $DL=400 \text{ kg/m}^2$ و $H=3\text{m}$ به دست آمده‌اند و چنانچه لازم باشد، برای محاسبه الگوها و مقادیر آنها بازای سایر مقادیر DL و H می‌توان از ضرایب اصلاحی $\sqrt{\frac{133/33H}{DL}}$ برای ناحیه الاستیک و $\sqrt{\frac{400}{DL}}$ برای ناحیه پلاستیک استفاده کرد. لازم به ذکر است از آنجایی که نتایج ناحیه پلاستیک برای ارتفاع‌های مفروض تا حد زیادی نزدیک به هم است منطقی به نظر می‌رسد که از یک نمودار میانگین به عنوان الگوی بارگذاری برای هر سه ارتفاع مختلف مفروض استفاده کرد. بنابراین نمودارهای پیشنهادی در شکل (۱۰) مستقل از ارتفاع سقوط آوار است.

متفاوت بر روی نمودارها) اثر شکل پذیری مصالح را نیز در طراحی در مقابل بار ضربه در نظر گرفت. باید به این نکته توجه داشت که مقادیر به دست آمده DLF برای نمونه‌های مطالعه شده، مقادیر بزرگی است و علت این امر در محاسبه‌ی زمان تناوب تیر است، چرا که در این مقاله زمان تناوب واقعی تیر و با احتساب وزن خالص تیر (بدون در نظر گرفتن بار کف وارده بر تیر) محاسبه شده است. این درحالی است که در سازه‌های واقعی مقدار زمان تناوب تیرهای مقادیر بسیار بزرگتر (معمولاً ۰/۱ تا ۰/۲ ثانیه) از مقادیر محاسبه شده در این پژوهش است. پس برای چنین تیرهایی با زمان تناوب‌هایی که در یک سازه‌ی واقعی از خود نشان می‌دهند مقادیر DLF برای نمونه‌های بررسی شده تا مقادیر پایین‌تر از ۱۰ کاهش یافته و بیشتر به طور میانگین مقدار ۵ را به خود اختصاص می‌دهند. این در حالی است در بسیاری از مقالات و کتب راهنمای طراحی مقادیر کوچکتی در حدود ۲ را برای DLF پیشنهاد داده‌اند.

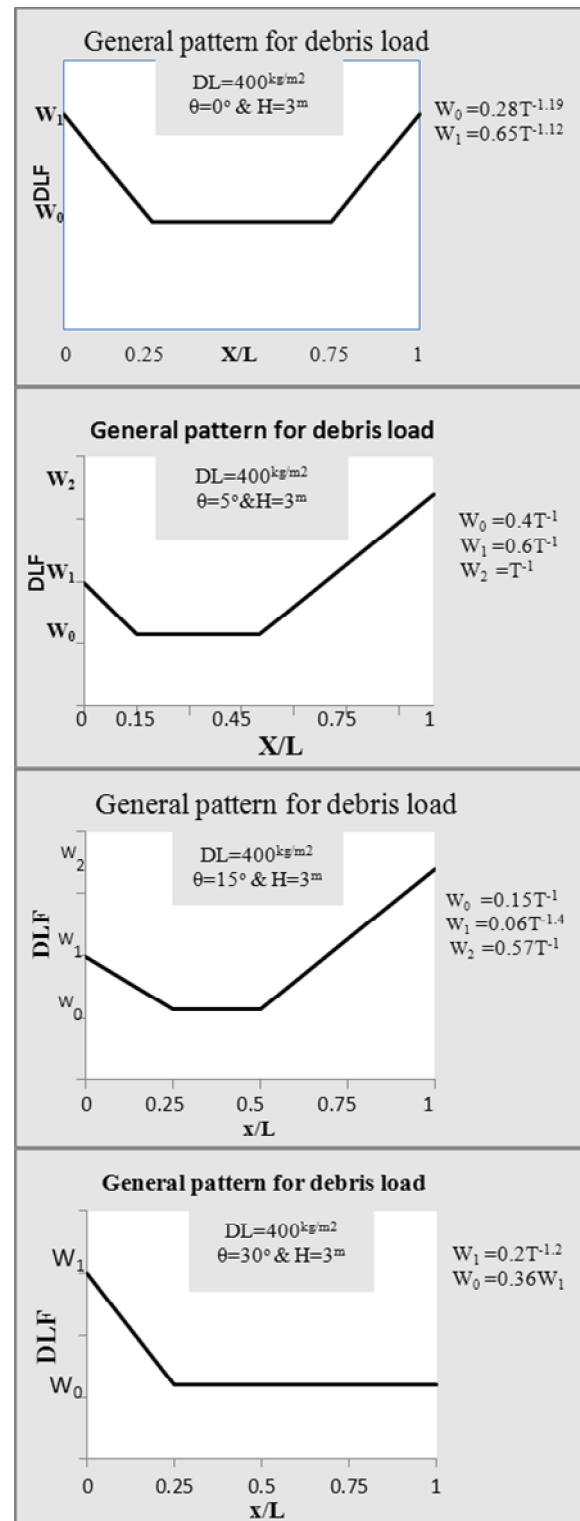
به منظور دست یافتن به یک الگوی کلی برای هریک از شرایط برخورد سعی شده است تا با توجه با نتایج حاصل در شکل‌های (۶) و (۷) و سایر نتایج مشابه، پاسخ کلی تیر به چند ناحیه خطی تقسیم شده و ضابطه‌ی مربوط به هر ناحیه (مقادیر مرزی نواحی خطی) از برآزش کل نتایج مربوط به هر ناحیه به دست آید. به عنوان مثال برای نموداری شبیه به شکل (۵) می‌توان پارامتر W_0 نسبت بیشینه‌ی پاسخ دینامیکی به پاسخ استاتیکی تیر، تحت بار تعریف شده در فاصله‌ی 0.25 L از تکیه‌گاه‌ها را در نظر گرفت که این مقدار به شکل خطی تا نقاط تکیه‌گاهی افزایش می‌یابد و به مقدار W_1 می‌رسد.

با بررسی و پردازش نمودارها و نتایج تحلیل مربوط به تمام نمونه‌ها می‌توان پس از محاسبه‌ی مقدار نسبت



شکل (۱۰) الگوی بارگذاری ضربه ای ریزش آوار برای ناحیه پلاستیک

بازای زوایای مختلف برخورد؛ با فرض $DL=400\text{ kg/m}^2$ و $H=3\text{m}$



شکل (۹) الگوی بارگذاری ضربه ای ریزش آوار برای ناحیه الاستیک

بازای زوایای مختلف برخورد؛ با فرض $DL=400\text{ kg/m}^2$ و $H=3\text{m}$

در خصوص ضرایب اصلاحی پیشنهاد شده باید گفته شود به منظور جلوگیری از ارایه‌ی الگوهای متعدد و پیچیده کردن محاسبات، این ضرایب به صورت میانگین و تا حدی برای اطمینان، از بررسی میزان حساسیت مقادیر به دست آمده برای DLF برای نمونه‌های مختلف به دست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری و بحث

با بررسی ضرایب بار دینامیکی در واحد طول هریک از این نمونه‌ها مشخص می‌شود که در حوزه‌ی الاستیک پارامترهایی مانند زمان تناوب تیر، ارتفاع سقوط و جرم آوار اثر زیادی بر نتایج به دست آمده دارند به گونه‌ای که با افزایش زمان تناوب و جرم آوار مقدار DLF کاهش و با افزایش ارتفاع سقوط این مقدار افزایش می‌یابد. همچنین در ارتباط با اثر زاویه برخورد آوار با تیر تحتانی لازم به ذکر است که بحرانی‌ترین حالت به برخورد آوار تحت زاویه صفر درجه اختصاص دارد و هر چه زاویه برخورد افزایش می‌یابد مقادیر حاصل برای DLF کاهش می‌یابد.

راجع به الگوهای به دست آمده برای بار ضربه در ناحیه الاستیک آنچه که از اهمیت برخوردار است ارایه‌ی نمودارهای چند خطی به منظور تخمین بار دینامیکی ضربه است. در این نمودارها سعی شده است نقش هریک از پارامترهای ضربه تا حد امکان در نظر گرفته شود. از آنجا که روند تغییرات مقدار DLF در طول تیرها متفاوت است برای هر بخش از این نمودارهای چند خطی یک رابطه‌ی جداگانه محاسبه شده است. با مشاهده‌ی الگوهای ارایه شده برای زوایای مختلف بر خورد آوار، نکته‌ی قابل توجه حرکت نمودارها از حالت متقارن برای زاویه برخورد صفر به سمت نمودار مثلثی برای زاویه برخورد ۳۰ درجه است. اهمیت این تغییر رفتار در الگوهای پیشنهادی بازای زوایای مختلف در این است که در شرایط مختلف محل

وقوع نیروی برشی و لنگرخمشی بحرانی در طول تیر متفاوت بوده و بسته به شکل های متفاوت بارگذاری باید بیشترین مقادیر محتمل برای هریک از این تلاش‌های داخلی و ظرفیت تیر برای تحمل آنها محاسبه شوند. اما در خصوص نمودارهای به دست آمده برای ناحیه پلاستیک اثر ارتفاع‌های فرض شده برای سقوط آوار تا حد قابل ملاحظه‌ای کم رنگ شده و علت این امر را می‌توان در ظرفیت جذب انرژی توسط رفتار پلاستیک تیر و پر رنگ‌تر شدن نقش سایر پارامترهای ضربه جستجو کرد. قابل ذکر است که به منظور استفاده از الگوهای پیشنهادی برای تخمین DLF باید از زمان تناوب اصلی تیرهای مورد نظر در سازه‌ی واقعی استفاده کرد. به عبارت دیگر حتما باید در محاسبه‌ی زمان تناوب تیرها مقدار سهم تیر از بارگذاری کف را به صورت وزن تیر در نظر گرفت.

لازم است که برای جلوگیری از وقوع خرابی‌های پیشرونده در ساختمان های بلند، در آیین‌نامه‌های مربوط به طراحی سازه‌ها، بسته به اهمیت سازه، این دسته از بارهای فوق العاده در نظر گرفته شوند و برای برآوردی مناسب از رفتار واقعی سازه از نمودارهایی مشابه به آنچه که در این پژوهش ارایه شده‌اند، با در نظر گرفتن سایر مطالعات تکمیلی و قضاوت های مهندسی، استفاده شود. نباید فراموش کرد که هدف اصلی این پژوهش معرفی رویکردی جدید به منظور بررسی ظرفیت و مقاومت سازه در برابر وقوع محتمل خرابی‌های پیشرونده است، پس به منظور ارایه‌ی روش‌هایی مانند روش‌های شبه استاتیکی و یا بارگذاری معادل که تحلیل سازه‌ها را ساده‌تر می‌کنند باید نمونه‌های بیشتری همراه با شرایط متنوع‌تری مطالعه و بررسی شود تا به یک روند جامع و کامل برای پیشبینی رفتار سازه تحت اثر بار ضربه‌ی ناشی از ریزش طبقات فوقانی بر طبقه‌ی تحتانی دست یافت.

۶- منابع و مراجع

- [5] Aliabadi M. H., Brebbia C. A; *Computational Methods in Contact Mechanics*, Computational Mechanics Publications, Bell & Bain Ltd, Glasgow, Great Britain, 1993.
- [6] HERR, A. M; SAFI, M; "Impact wave propagation in tall buildings using advanced spectral element method", , *Struct. Design Tall Spec. Build*, Wiley Inter Science, No 12, 2003, pp 127-143.
- [7] JONES,N; *Structural Impact*, Cambridge university press, 1989, page: 9-15.
- [8] Safi, M; Zarpavar, P; "Estimation of Dynamic Impact Factors for Seismic Debris Loads on Buildings", *Sixth international conference of Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran, 2011
- [1] Vlassis A.G, Izzuddin B.A, Elghazouli A.Y, Nethercot D.A; "Progressive Collapse of Multi-Storey Buildings due to Failed Floor Impact", *Engineering structures* ,Volume 31, Issue 7, July 2009, pp1522-1534.
- [2] Izzuddin, B.A., Vlassis, A.G., Elghazouli, A.Y., and Nethercot, D.A; "Assessment of Progressive Collapse in Multi-Storey Building, Buildings and Structures"; *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 2007, 160(SB4), pp. 197-205.
- [3] *ANSYS General Purpose F.E. program*, Revision 5.6, Ansys Inc., Houston, PA, USA, 1997.
- [4] Bathe K. J; *Finite element procedure in engineering analysis*; Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.

«Research Note»

Estimation of the Pattern of Debris Load Caused By an Earthquake on Steel Beams

P. Zarparvar^{1*}, M. Safi²

1- M.Sc. Student of Earthquake, Dep. of Civil Eng., Power and Water Uni. of Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Prof., Dep. of Civil Eng., Power and Water Uni. of Technology, Tehran, Iran.

pouyazarparvar@yahoo.com

Abstract:

During an earthquake and its effect, what happens on buildings is local damage and destruction which is different due to different characteristics such as diverse earthquake and geotechnical characteristic, different methods of analysis for earthquake-resistant structures, etc. Therefore, in addition to removing structural elements and their falling as debris, a shock and impulsive load could be added to the dynamic load imposed by the earthquake. Impact loads with extreme severity are loads with very low frequency of occurrence, but with extraordinary consequences. Undoubtedly appearing greater success in designing buildings resistant against extraordinary loads is required to forecast the real pattern and the impact of the impulsive loads. In other words, identify all possible failure modes of structures under extraordinary loads is necessary, which requires nonlinear analysis of structures under various loading conditions. Detailed modeling of the impact of an upper floor onto the floor below is feasible using current sophisticated nonlinear dynamic analysis software. Yet the computational effort in the case of large and complex structural systems can be excessive, especially if a detailed model of the whole structure is considered. Moreover, such analysis requires structural engineers with considerable expertise in nonlinear structural dynamics. Due to these limitations, detailed impact modeling is not practical for design applications. Hence, there is an evident need for simple, yet sufficiently accurate methodologies that can be used to establish whether the strength, ductility supply and energy absorption capacity of the lower impacted floor are adequate to withstand the imposed dynamic loads from the falling floor(s).

This paper proposes a new design methodology for progressive collapse assessment of floor within multi-storey buildings subjected to impact from an above failed floor. The amount of debris and its scattering and distribution on different floors of a building play an important role in the operation of the impact load. The important point is that how these parameters should be considered in the dynamic analysis and how much the structure's respond is sensitive to the impact characteristics such as impact velocity, the mass of debris and its distribution. This study has attempted to calculate the dynamic load factor (DLF) for samples of steel beams with an elastic-plastic behavior, and to extract the pattern of debris impact load in order to provide an equivalent loading pattern to estimate the performance of

structures subjected to above failed floor(s). The study of dynamic load factors for the samples illustrates that the period of beam, the height of falling and the mass of debris have a noticeable effect on the result so that the DLF decreases by increasing in amount of the period of beams or the mass of debris, as well as it increases by increasing the height of falling. About the achieved patterns for the impact load what is important is providing multi-line graphs in order to estimate the dynamic effect of the debris impact.

Keywords: Impact load, Debris load, Dynamic load factor, Progressive collapse, Impact load pattern.