



بررسی اثرات الگوهای مختلف توزیع بار جانبی در راستای عرضی در آنالیز استاتیکی غیرخطی (Pushover) برای پلهای منظم بتنی

سید بهرام بهشتی اول^۱، احسان جهان فکر^۲

۱- استادیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، دانشکده عمران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه علم و فرهنگ، دانشکده عمران

beheshti@kntu.ac.ir
ehsan_pj@yahoo.com

چکیده

اولین گام در تحلیل استاتیکی غیرخطی، اعمال الگوی بارگذاری جانبی مناسب برای انجام تحلیل بارافزون می باشد. واضح است که الگوهای بارگذاری مختلف نمودارهای ظرفیت متفاوتی را برآورد می نمایند. با توجه به اینکه در پلهای مختلف ساختارها مکانیزم حاکم بر رفتار پل به علت سختی و مقاومت بالای عرشه به جهت جذب انرژی ایجاد مفاصل خمیری در انتهای ستونها است و این متناظر با طبقه نرم در ساختمانها است، لذا در این تحقیق سعی می شود با در نظر گرفتن الگوهای بار جانبی مختلف موجود در استاندارد ASCE 41-06 که برای ساختمانهای موجود پیشنهاد شده اند و همچنین الگوهای بار پیشنهادی در روش آنالیز استاتیکی غیرخطی دقت این الگوها برای پلهای منظم بتنی در راستای عرضی در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) مورد ارزیابی قرار گیرند. نتایج بررسی های انجام شده مبین دقت بالاتر الگوی بار پیشنهادی تابع نمایی و الگوی بار براساس مود اول موجود در استاندارد ASCE 41-06 نسبت به سایر الگوها می باشد.

کلمات کلیدی: پلهای منظم بتنی، الگوی بارگذاری جانبی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی فزاینده، منحنی ظرفیت

۱. مقدمه

شناخت نسبت به پدیده زلزله روز به روز در حال افزایش است و آئین نامه های طراحی سازه ها به واسطه این پیشرفت ها در حال تکامل می باشند. در سالهای قبل از دهه ۷۰ میلادی، فقط بارهای ثقلی برای مهندسان شناخته شده بود و این بارها در محاسبات سازه ها در نظر گرفته می شدند. مقاومت سازه در برابر حرکات زلزله که تحت نیروهای جانبی باد طراحی گشته بودند، طراحان را بر آن داشت که اثر حرکات زلزله به سازه بصورت نیروهای جانبی که معمولاً ۱۰٪ وزن سازه اختیار می شدند وارد آئین نامه های طراحی گردد. پس از قبول خرابی کنترل شده در سازه ها در برابر زلزله های بزرگ محتمل به دلایل اقتصادی، با کاهش نیروهای فوق با ضریب رفتار (R) که مبین شکل پذیری و اضافه ظرفیت غیر ارتجاعی هستند، فصل جدیدی از نگرش به زلزله آغاز گردید. این روش نیز با اشکالات زیادی رو به رو شد زیرا این ضریب در مواردی خاص با خطای زیادی مواجه بوده و همچنین نمی توان براساس این روش کنترل دقیقی بر رفتار اجزاء سازه و مکانیزم های خرابی در طول زلزله داشت. مجموعه کاستی های روش های نیرویی قبلی نیاز به ارائه روش های جدید را که بر مبنای تحلیل های غیرخطی و در نظر گرفتن رفتار واقعی اجزای سازه در هنگام زلزله استوار باشد را آشکار ساخت. بر این اساس روش «مهندسی زلزله بر اساس عملکرد» معرفی و ارائه گردید.

تحقیقات و بررسی ها در مورد وضعیت اجرای سازه های بتن مسلح نشان می دهد که بسیاری از سازه های بتنی موجود در مقابل زلزله بسیار آسیب پذیرند. وقوع زلزله های متعدد باعث شده که لزوم ارزیابی و بررسی سازه ها در برابر زلزله بیش از پیش مورد توجه واقع شود. در این میان ارزیابی ساختمان ها بیش از سازه های دیگر در پژوهش های علمی مورد بررسی قرار گرفته و ارزیابی و بررسی سازه های خاص همچون پلهای و ... کمتر مد نظر واقع شده است. از آنجا که پلهای به عنوان حلقه های ارتباطی در امداد رسانی پس از زلزله نقش قابل توجهی داشته و ارزیابی آنها چندان در دستور کار نبوده است، بررسی و اصول ارزیابی آنها ضروری به نظر می رسد.



در طراحی سازه پلها، نیروهای جانبی با توجه به ماهیت ناپایدار کننده ای که دارند، از جمله تعیین کننده ترین بارگذاری ها در طراحی به شمار می روند. از آنجائیکه زمان ساخت اکثر پلهای بتنی که امروزه مورد استفاده قرار می گیرند به بیش از ۳۰ سال پیش باز می گردد و با توجه به رایج بودن روش طراحی الاستیک در آن زمان، از ضعف های مربوط به این روش بی بهره نخواهند بود. با توجه به اینکه نتایج حاصل از تحلیلهای خطی از تقریب بالایی برخوردار بوده و نظر به اینکه در ارزیابی لرزه ای سازه ها لازم است نتایج به واقعیت نزدیک باشند، در نتیجه در ارزیابی لرزه ای سازه ها باید از روش های غیرخطی استفاده گردد. با توجه به آنکه روش های غیرخطی از پیچیدگی های زیادی برخوردار می باشند، لذا لازم است این روش ها با دقت بالا و با شناخت نسبت به مفاهیم مرتبط مورد استفاده واقع شوند. در روش های غیرخطی، طراحی یا ارزیابی سازه ها در برابر زلزله براساس تغییرشکل سازه و اجزاء آن صورت می گیرد. لذا لازم است شناخت کافی از تغییرشکل ها و جابجایی های سازه در محدوده فراتر از رفتار ارتجاعی حاصل گردد. متأسفانه در مورد پلها، چنین شناختی به اندازه کافی موجود نبوده و این یکی از مشکلات اساسی در مسیر ارزیابی لرزه ای پلها می باشد، بنابراین از آنجایی که پلهای طراحی شده براساس آئین نامه های گذشته، در هنگام زلزله وارد حوزه رفتار غیرخطی می شوند، لذا نیاز به کاربرد روش های مبتنی بر تحلیل های غیرخطی که بوسیله آنها بتوان رفتار لرزه ای و مکانیزم های خرابی را بطور دقیق تر در این سازه ها مورد بررسی قرار داد، بیشتر از گذشته احساس می شود. به نظر می رسد که آنالیز دینامیکی غیرخطی به علت در نظر گرفتن رفتار واقعی سازه در هنگام زلزله بهترین گزینه باشد. اما یکی از مشکلات عمده آنالیزهای دینامیکی غیرخطی پیچیدگی زیاد آنها می باشد. بر این اساس فلسفه نوین «مهندسی زلزله براساس عملکرد» شکل گرفت که در آن عمدتاً از روشهای ساده آنالیز استاتیکی غیرخطی (بارافزون) برای تعیین رفتار سازه در ناحیه غیرخطی استفاده می شود [۱].

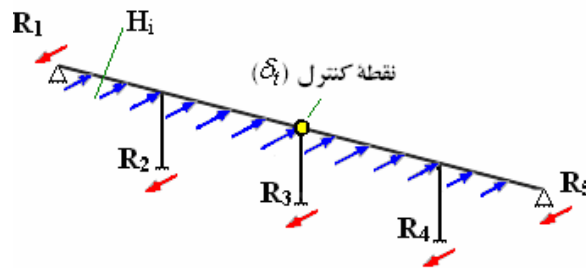
۲. پیشینه کاربرد مهندسی زلزله بر اساس عملکرد در پلها

ضربه های فراوانی در نتیجه خرابی سازه پلهای غیرمقاوم به اقتصاد کشورها تحمیل گشته است. این خسران اقتصادی در صورتی که خسارت های غیر مستقیم را هم در نظر بگیریم افزایش می یابند. این حقایق اجازه می دهد که کمیته های مربوط به آئین نامه ها تصمیماتی فراتر از سطح ایمنی جانی جهت عملکرد مورد پیش بینی سازه های بنیادی را مد نظر قرار دهند. این روند باعث بهبود در طراحی عملکرد سازه ها می گردد. یکی از مزیت های مهم در طراحی براساس عملکرد، مشخص شدن وضعیت عملکرد سازه تحت مولفه های بار متفاوت می باشد. وضعیت عملکرد سازه بدین معنی است که می تواند سطح آسیب را در صورت وجود ارزیابی کند [۱].

آنالیز استاتیکی غیرخطی تاریخچه نسبتاً طولانی دارد و پایه اصلی آن ریشه در کارهایی که به ترتیب توسط محققانی چون Freeman (۱۹۷۵) و Fajfar (۱۹۸۸) انجام یافته است، دارد. برای پلها وضعیت کاملاً فرق می کند، شمار تحقیقات صورت گرفته برای پلها محدود می باشند. در این زمینه کارهایی توسط Fishingher و همکارانش در سال ۲۰۰۶ انجام یافته است، که در آنها به مقایسه روش های مختلف آنالیز پوش آور همچون روش تک مودی (P. Fajfar, P. Gaspersic, ۱۹۹۶)، روش مودال (A.K. Chopra, R.K. Goel, ۲۰۰۲)، روش مودال سازگار (P. Fajfar & H. Krawinkler, ۱۹۹۷) و روش طیف پاسخ فزاینده (P. Fajfar & H. Krawinkler, ۲۰۰۴) پرداخته شده است. تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۳ توسط (Yi Zheng, Tsutomu Usami, Hanbin Ge) تحت عنوان «پیش بینی پاسخ های لرزه ای پلهای فولادی چند دهانه بوسیله آنالیز پوش آور» صورت گرفته است، هدف از این تحقیق بررسی کاربرد آنالیز پوش آور برای پلهای فولادی چند دهانه پیوسته که پایه های آنها با لایه های نازک فولادی تقویت شده اند می باشد. نتایج نشان دادند که برای پلها با توزیعات متناسب از سختی پایه و یا عرشه سخت تر نسبت به پایه ها، مود اصلی در پاسخ سازه حکمفرما می شود و آنالیز پوش آور می تواند با قابلیت اطمینان بیشتری بکار برده شود. به عبارت دیگر، اگر سیستم پل دارای توزیع های نامتناسب از سختی پایه ها و همچنین در عین حال دارای عرشه ای انعطاف پذیر باشد، اثرات موده های بالاتر اهمیت پیدا می کنند و آنالیز پوش آور نمی تواند رضایت بخش باشد. تحقیق دیگری توسط (Chung C.Fu and Hamed AlAyed, ۲۰۰۳) تحت عنوان «آنالیز لرزه ای پلها با استفاده از رویکرد بر مبنای تغییر مکان» انجام یافته است، که در آن آنالیز استاتیکی غیرخطی (NSP) با روش ضرایب تغییر مکان (DCM) برای پلها صورت گرفته است. بدین منظور پارامترهای تغییر مکان هدف، برش پایه و تغییر شکل مفاصل پلاستیک مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته اند. مقایسات صورت گرفته از نتایج دلالت بر محافظه کارانه بودن نتایج حاصله از روش آنالیز استاتیکی غیرخطی (پوش آور) داشتند [۲]. Fenves و Ellery در سال ۱۹۹۸، در تحقیقی از روش استاتیکی غیرخطی جهت ارزیابی سازه پل بزرگراه تحت زلزله نورتریج در سال ۱۹۹۴ استفاده نمودند، آنها پی بردند که منحنی ظرفیت برشی از پایه ای که دچار خرابی و شکست شده است با منحنی ظرفیت (پوش آور) قبل از اینکه جابجایی هدف توسط زلزله حاصل شود، برخورد می کند که این خود سبب شکست در آن پایه می شود. تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۷ توسط (R. pinho, C. casarotti, S. Antoniou) تحت عنوان «مقایسه روش های آنالیز پوش آور برای ارزیابی لرزه ای پلها» صورت گرفته است، مهمترین نتیجه حاصله از این تحقیق این بود که روش های آنالیز پوش آور سازگار بر مبنای جابجایی به طور متوسط نتایج بسیار خوبی در کلیه پلها ایجاد کرده اند، بخصوص اینکه در مورد پلهای نامنظم از دقت بسیار خوبی برخوردار هستند [۱].

۳. روش استاتیکی غیرخطی (بار افزون)

اساس کلی این روش بدین صورت است که یک مدل ریاضی با رفتار غیرخطی از سازه تحت یک الگوی بار جانبی قرار گرفته و این بار جانبی با آهنگ ثابتی افزایش پیدا می کند تا زمانیکه سازه به یک تغییر مکان هدف از پیش تعیین شده برسد. این تغییر مکان هدف در یک نقطه کنترلی اندازه گیری می شود (مرکز جرم عرشه پل). در طول فرایند افزایش صعودی بار جانبی، مقاومت و سختی اجزاء سازه در هر گام با توجه به منحنی رفتاری غیرخطی که از پیش برای آنها تعریف شده اصلاح می شود. اصلی ترین محصول این فرایند، منحنی تغییرات برش پایه در مقابل تغییر مکان کنترلی می باشد که به آن منحنی ظرفیت سازه گفته می شود که هر نقطه روی این منحنی بیان کننده یک حالت خسارت خاص برای سازه است. منظور از برش پایه کل برآیند برش ایجاد شده در پایه ها و برش ایجاد شده در کوله ها در راستای عرضی از پل طبق رابطه ۱ می باشد. همچنین منظور از تغییر مکان، جابجایی در راستای عرضی پل می باشد. محل تغییر مکان هدف در مرکز جرم عرشه پل در نظر گرفته شده است. (شکل ۱)



شکل ۱. نحوه تعیین برآیند برش پایه و محل قرار گیری تغییر مکان هدف [۱]

$$V = \sum_{i=1}^n H_i = \sum_{j=1}^m R_j \quad (1)$$

i : شماره گره ها
 j : شماره تکیه گاه
 H_i : مقدار مؤلفه نیرو در محل گره i
 R_j : مقدار نیرو در محل تکیه گاه j
 V : برش پایه کل

۴. الگوهای بار جانبی

الگوهای بارگذاری جانبی، نشان دهنده نحوه توزیع نیروهای اینرسی در زلزله بر روی سازه می باشند. وضعیت توزیع بار بیشتر از همه، بستگی به شدت تکان های زلزله (درجه پاسخ غیرخطی)، مشخصات فرکانسی سازه و حرکت زمین دارد. بار جانبی مورد نظر که در راستای عرضی به پل اعمال می شود به طور تقریبی بیان کننده توزیع نیروهای اینرسی زلزله می باشد. به طور کلی عدم اطلاع دقیق از الگوی بار جانبی از نقاط ضعف روش تحلیل استاتیکی غیرخطی است، چون طبیعت این نیروها دینامیکی می باشد. برای هر آنالیز براساس استانداردهای موجود باید حداقل از دو توزیع بار جانبی متفاوت در NSP استفاده شود. زیرا استفاده از یک الگوی بار ممکن است نقص های مخفی سازه را تشخیص ندهد. از آنجائیکه اثر مودهای بالاتر در مورد پلهای مورد بررسی (پلهای کوتاه و متوسط) در این تحقیق، حساس نمی باشند لذا در این تحقیق از بررسی رفتار و اثر اینگونه الگوها استفاده نشده است. دو شیوه برای اعمال بار به سازه پل در راستای عرضی وجود دارد. اولین شیوه اعمال بار در عرشه و دومین شیوه اعمال بار در عرشه و پایه ها می باشد. در این تحقیق از آنجائیکه بیشتر اینرسی جرم سازه در عرشه متمرکز شده است، از شیوه اول با تقریب قابل قبول استفاده شده است. (شکل ۲)



شکل ۲. گزینه های اعمال بارگذاری جانبی در راستای عرضی (الف) اعمال بار در عرشه (ب) اعمال بار در عرشه و پایه ها [۱]



۴-۱. الگوهای بار جانبی موجود در ASCE 41-06

در استاندارد فوق توزیع بارهای مختلفی برای بار جانبی در نظر گرفته شده است که به صورت زیر خلاصه می شوند [۳]:
۱. **الگوی توزیع بار براساس مود اصلی در جهت مورد نظر (First Mode):** در این الگو توزیع بار نیروی جانبی متناسب با شکل مود اصلی مطابق رابطه ۲ در جهت مورد نظر بکار می رود.

$$F_M^i = \left(W_i \phi_i / \sum_{i=1}^N W_i \phi_i \right) V \quad (2)$$

که در آن:

- F_M^i : نیروی جانبی در گره i ($i = 1, 2, \dots, N$)
- N : تعداد گره ها
- W_i : وزن مرده اختصاص یافته به گره i
- ϕ_i : دامنه مود اصلی در گره i
- V : برش پایه کل

۲. **الگوی توزیع بار مثلثی معکوس (Inverted Triangular):** در این الگو توزیع بار بطور خطی در طول پل افزایش می یابد و در محل نقطه کنترل به مقدار ماکزیمم خود می رسد.

$$F_T^i = \frac{2X_i}{L} \quad (3)$$

که در آن:

- F_T^i : نیروی جانبی در گره i
- X_i : فاصله هر گره از ابتدای نزدیکتر عرشه
- L : طول کل پل

۳. **الگوی توزیع بار یکنواخت (Uniform):** این الگو بر اساس جرم گره ها بصورت زیر در طول عرشه پل توزیع می گردد.

$$F_U^i = m_i g \quad (4)$$

که در آن:

- F_U^i : نیروی جانبی در گره i
- m_i : جرم اختصاص یافته به گره i

۴. **الگوی توزیع بار مستطیلی (Rectangular):** این الگو تقریباً شبیه همان الگوی توزیع بار یکنواخت می باشد، با این تفاوت که در تمامی گره ها حتی محل پایه ها بار به نسبت یکسانی توزیع می گردد.

$$F_R^i = 1 \quad (5)$$

که در آن:

- F_R^i : نیروی جانبی در گره i

۴-۲. الگوهای بار جانبی پیشنهادی

از آنجائیکه الگوهای ارائه شده در استاندارد ASCE 41-06 برای سازه های ساختمانی که بر خلاف پلها، جرم اصلی سازه در طبقات به شکل ارتفاعی قرار گرفته اند و به منظور ارزیابی بهتر و گسترده تر و نیز مقایسه الگوهای ارائه شده در استاندارد ASCE 41-06 با دیگر الگوهای ممکنه، تعدادی الگوی پیشنهادی براساس محل قرار گیری گره ها در طول پل ارائه می گردد که در زیر به معرفی آنها پرداخته می شود [۱].



۱. الگوی پیشنهادی بر اساس رابطه ارائه شده:

$$F_{\alpha_j}^i = \left(\frac{2X_i}{L} \right)^{\alpha_j} \quad (6)$$

$F_{\alpha_j}^i$: نیروی جانبی در گره i برای α_j

α_j : به آن مقادیر 0.25، 0.5، 0.75، 1.5 و 2 نسبت داده می شود.

X_i : فاصله هر گره از ابتدای نزدیکتر عرشه

L : طول کل پل

این نوع الگوهای توزیع بار، ترکیبی از الگوهای توزیع بار مستطیلی و مثلثی می باشند، که در این تحقیق با نام های نشان داده شده در جدول ۱ برای ضرایب α_j مختلف مشخص شده اند. آنالیزهای انجام یافته نشان می دهند که برای پلهای منظم ضریب α_j چندان متأثر از شکل پذیری و پیروی محدود پلها نمی باشد، لذا این ضریب بصورت ثابت انتخاب شده است [۱].

جدول ۱. نام و مقادیر بکار رفته برای الگوهای بار پیشنهادی [۱]

Name	Tri-Rec-1	Tri-Rec-2	Tri-Rec-3	Tri-Rec-4	Tri-Rec-5
α	0.25	0.5	0.75	1.5	2

۲. الگوی توزیع بار سینوسی (Sin): این نوع الگو بر اساس رابطه ۷ در راستای عرضی پل، بر عرشه اعمال می گردد.

$$F_{Sin}^i = \text{Sin} \left(\frac{\pi X_i}{L} \right) \quad (7)$$

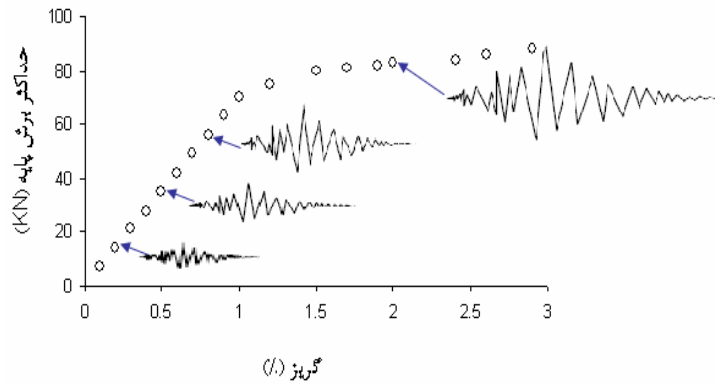
F_{Sin}^i : نیروی جانبی در گره i

X_i : فاصله گره i از ابتدای نزدیکتر عرشه

L : طول کل پل

۵. تخمین منحنی ظرفیت بر اساس تحلیل های دینامیکی افزایشی (IDA)

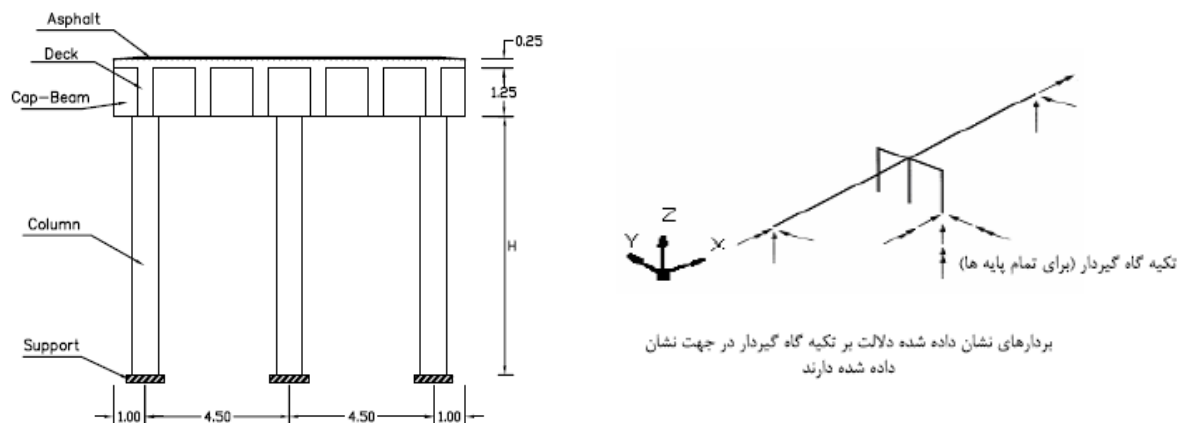
امروزه آئین نامه های طراحی براساس مقاومت به تدریج منسوخ شده و آئین نامه های طراحی براساس عملکرد جایگزین آنها گردیده است. در این آئین نامه ها معیار خرابی سازه ها، نیروی وارده به آنها نبوده بلکه شاخص های خرابی براساس پاسخ سازه در برابر زلزله تعریف می گردند و به همین دلیل یافتن بیشینه شدت زلزله متناسب با عملکرد مورد انتظار سازه بسیار حائز اهمیت می باشد. روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) یک روش آنالیز غیرخطی می باشد که به کمک آن قادر هستیم با اعمال سطوح مقیاس شده یک زلزله مشخص به سازه، میزان پاسخ سازه را برای هر سطح زلزله بدست آوریم (شکل ۳). این روش برپایه تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه چند درجه آزادی (MDOF) استوار است. به کمک منحنی های بدست آمده از این طریق، می توان بیشینه شتاب مجاز در طول عمر سازه برای یک عملکرد خاص و برای شاخص خرابی مورد نظر را بدست آورد. منحنی های حاصل از روش تحلیل دینامیکی افزایشی درک مناسبی از عملکرد سازه همگام با افزایش شدت زلزله ارائه می دهند و از مقایسه آنها با منحنی های ظرفیت حاصل شده از الگوهای توزیع بار بدست آمده از آنالیز پوش آور می توان قضاوتی درست ارائه داد [۴].



شکل ۳. مقادیر ماکزیمم برش پایه کل و جابجایی نقطه هدف بدست آمده از آنالیز دینامیکی افزایشی (IDA) [۱]

۶. معرفی و توصیف پلها و فرضیات مدلسازی

مدلهای بکار رفته در این تحقیق، پلهای بتنی از نوع منظم با طول دهانه های مساوی ۱۵ متری و تعداد دهانه های دو، سه، چهار، پنج و شش می باشند که همگی با استفاده از ضوابط آیین نامه آشتو (AASHTO) [۵] بارگذاری و طرح شده اند. روسازه پل شامل عرشه از نوع دال بتنی که بطور یکپارچه با شاهتیرهای طولی بتن ریزی می شود و دارای مقطع تیر T شکل در تمامی مدلهای می باشد، فرض شده است. تعداد شاهتیرهای طولی برای همه مدلها شش عدد، فاصله محور به محور شاهتیرها ۱/۸ متر و پهنای آزاد بین دو پیاده روی کناری ۹/۴ متر، می باشد. ضخامت لایه آسفالت هفت سانتیمتر در نظر گرفته شده است. عرض کل پل در تمامی مدلها ۱۱ متر و برای دو خط عبور پیش بینی شده است. در محل تیرهای سرستون و کوله ها دیافراگم صلب تعریف شده است. از آنجایی که پلهای انتخابی از نوع پلهای کوتاه و متوسط می باشند، لذا تمامی مدلها در نرم افزار OpenSees [۶] با این فرض که بصورت یکپارچه اجرا می شوند مدلسازی می شوند. لذا اتصال عرشه پل به تیر سرستون در محل پایه ها بصورت اتصال یکپارچه (کامل) فرض و مدلسازی شده است. تمامی مدلسازی های صورت گرفته در این تحقیق بصورت سه بعدی می باشد. همچنین سیستم بکار رفته در زیرسازه از نوع قاب چند ستونی، شامل سه ستون، در همه مدلها می باشد. ارتفاع پایه پلها در مدلها هشت متر در نظر گرفته شده است. در طراحی تمامی مدل ها اثر لاغری ستون با استفاده از کنترل ضریب اندرکنش ستون در نظر گرفته شده است، مقدار این ضریب برای تمامی ستون ها باید کمتر از یک باشد. مقاطع تمامی پایه ها دایره ای می باشند که با میلگرد آجدار با قطر ۳۶ میلیمتر تقویت شده اند. درصد میلگرد های طولی برای پایه ها در محدوده ۱ تا ۲/۵ درصد می باشد. تیر های سرستون در تمامی مدلها صلب (دارای سختی زیاد) و دارای مقطع مستطیلی می باشند. در تمامی مدلها پی ها صلب (دارای تکیه گاه گیردار) فرض شده اند. مشخصات نوع تکیه گاههای مورد استفاده در محل پایه ها و کوله ها در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین مقطع عرضی پل در محل قاب ها در شکل ۵ و مشخصات مقطع عرشه، تیر سرستون و پایه ها در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴. شرایط تکیه گاهی در نظر گرفته شده برای پایه ها و کوله ها [۱]

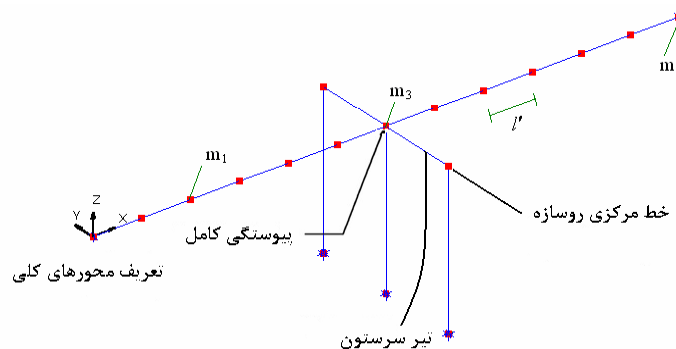
شکل ۵. نمونه ای از مقطع عرضی پل در محل قاب ها (ابعاد به متر) [۱]



جدول ۲. مشخصات مقطع عرشه، تیر سرستون و پایه های پلها [۱]

مقطع عرشه	A (m ²)	I ₂₋₂ (m ⁴)	I ₃₋₃ (m ⁴)	J(m ⁴)			
		6.125	59.68	1.31	0.31		
مقطع سرستون	L(m)	B(m)	H(m)	A(m ²)			
	10	D _{col} +0.5	1.25	variant			
مقاطع پایه ها	دهانه	N-Φ36	ρ	D _{col} (m)	A(cm ²)	I ₂₋₂ & I ₃₋₃ (cm ⁴)	J(cm ⁴)
	2	12	1.92	0.9	6362	3220631	6441262
	3	12	1.56	1	7854	4908750	9817500
	4	14	1.81	1	7854	4908750	9817500
	5	12	1.92	0.9	6362	3220631	6441262
	6	10	1.60	0.9	6362	3220631	6441262

محاسبات انجام یافته مبین رفتار ارتجاعی عرشه به علت سختی و مقاومت بالای آن بوده، لذا از یک المان تیر الاستیک (خطی) جهت مدل عرشه استفاده شده است. طول هر المان عرشه ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. اتصال المان عرشه به المان تیر سرستون با فرض اینکه پلها بصورت یکپارچه اجرا شده اند، مدل سازی شده اند. تیرهای سرستون موجود در مدلها، نیز همانند عرشه بصورت المان تیر الاستیک مدل سازی شده است. در این تحقیق، ماکزیم تنش و کرنش مربوط به بتن با استفاده از روابط تعیین شده توسط مندر (Mander-1988) [۷]، برای بتن محصور شده براساس مقدار فولاد عرضی تخمین زده شده اند. پایه ها با استفاده از یک المان تیر - ستون غیرخطی بصورت کاملاً سه بعدی در نرم افزار OpenSees مدل سازی شدند. اثرات P-Δ نیز برای ستون ها در تحلیل لحاظ شده است. از المان غیرخطی در کل طول پایه ها استفاده شده است. برای المان نیز پنج جزء المان تعریف شده است. برای تعریف مقطع عرضی پایه ها، از مقاطع رشته ای (Fiber-Section) استفاده شده است. برای هم هسته (core) و هم پوشش (cover) بتنی در جهت محیطی ۱۲ رشته در نظر گرفته شده است، همچنین در جهت شعاعی برای هسته و پوشش به ترتیب ۸ و ۲ رشته در نظر گرفته شده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای جرم ها براساس موقعیت قرارگیری جرم ها در طول پل تعیین می شود (شکل ۶). همچنین در محاسبه جرم گره های واقع در محل پایه ها وزن تیر سرستون و نصف وزن پایه های قاب اضافه شده است. [۱]



شکل ۶. نمونه ای از نحوه قرارگیری و توزیع جرم ها در نقاط مختلف پل [۱]

۷. تحلیل دینامیکی غیرخطی (تاریخچه-زمانی)

به منظور تعیین میزان دقت پاسخ های بدست آمده از آنالیز استاتیکی غیرخطی، آنالیز دینامیکی غیرخطی فزاینده با هفت رکورد زلزله که همگی آنها با طیف طرح آئین نامه ایران برای خاک نوع III همپایه شده اند، انجام شده است. مقادیر PGA واقعی و مقیاس شده به جهت میزان انرژی یکسان حاصل از طیف مربوط به رکوردهای زلزله در جدول ۳ ارائه شده است [۸].



جدول ۳. شتاب نکاشت های همپایه شده با طیف طرح آئین نامه لرزه ای ایران برای خاک نوع III [۱]

مقدار PGA مقیاس شده بر حسب g	مقدار PGA واقعی بر حسب g	نام رکورد	شماره رکورد
0.6289	0.3485	El-centro	1
1.0327	0.4738	Northridge	2
1.0948	0.4502	Lomaprieta	3
0.5693	0.8213	Kobe	4
0.6449	0.8082	Chi-chi	5
0.7	0.9335	Tabas	6
0.861	0.7235	Naghan	7

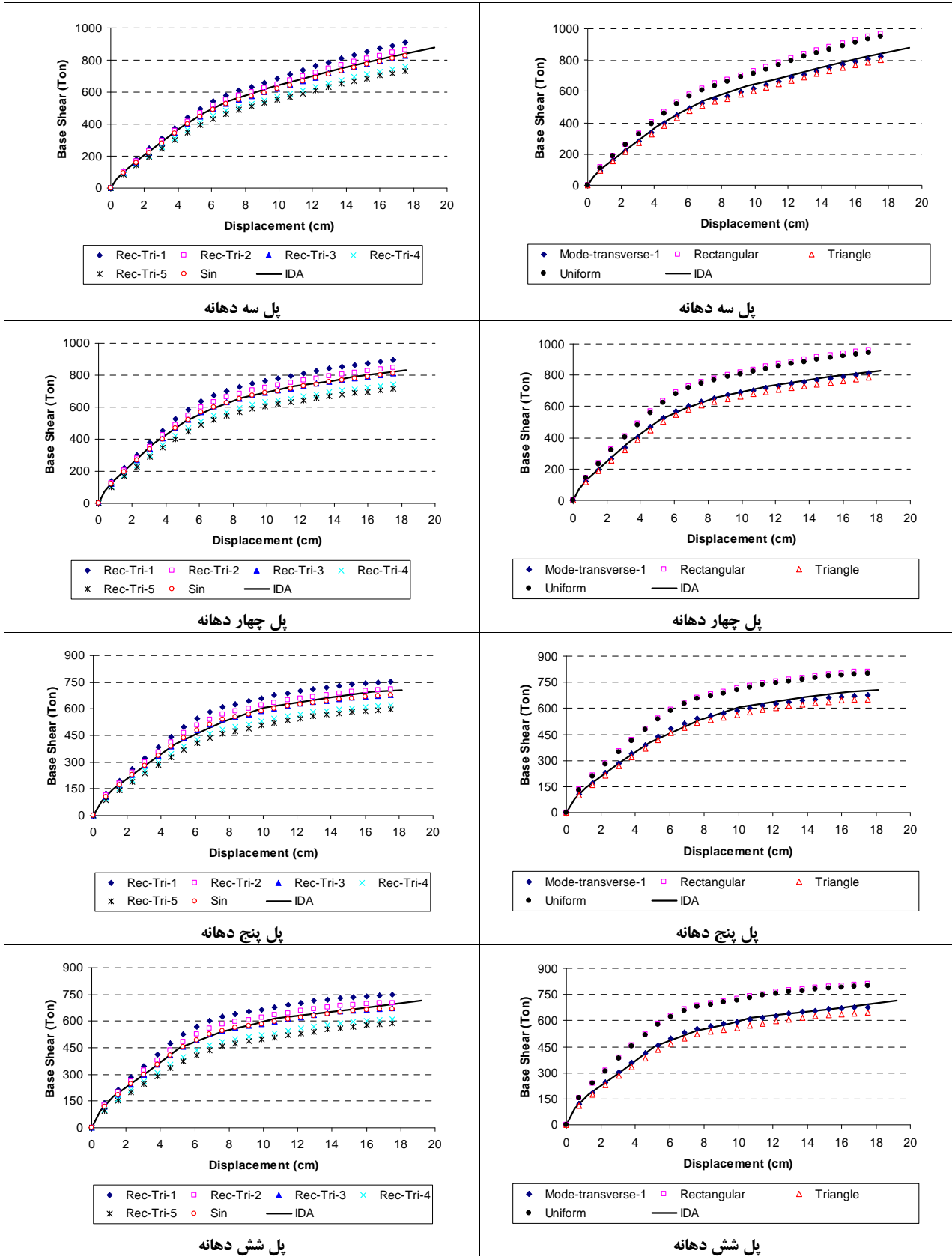
۸. فرایند و شیوه بررسی نتایج

در این تحقیق با اعمال الگوهای بار موجود در ASCE 41-06 و الگوهای بار پیشنهادی بر روی مدل‌های انتخاب شده، به مقایسه دقت منحنی ظرفیت (پوش آور) بدست آمده از الگوهای بارگذاری مختلف با نتایج بدست آمده از آنالیز دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی - زمانی) افزایشی (IDA) به عنوان روش دقیق، پرداخته می شود. به جهت بررسی مقبولیت هر یک از الگوها جابجایی هدف (جابجایی مرکز جرم عرشه) حاصل از الگوهای مختلف با جابجایی حاصل از میانگین مقادیر هفت شتابنگاشت برابر قرار داده شده است. برای انجام آنالیزها از نرم افزار OpenSees استفاده شده است این نرم افزار دارای امکانات مناسب برای انجام آنالیزهای استاتیکی غیرخطی و همچنین تحلیل های دینامیکی غیرخطی می باشد [۶].

۸-۱. ارزیابی و تفسیر نتایج

در نمودارهای ۷ پاسخ های محاسبه شده از روش های مختلف (الگوهای بار متفاوت) و همچنین نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ غیرخطی (NL-RHA) به عنوان روش دقیق و مبنای مقایسه برای تعدادی از مدلها نشان داده شده است. در این نمودارها محور افقی نشان دهنده جابجایی و محور قائم مقدار برش پایه نظیر را نشان می دهد.

مطابق شکل ۷ از میان الگوهای بار ASCE 41-06 الگوهای بار مستطیلی و یکنواخت برش پایه عرضی را دست بالا در نظر می گیرند. این دو الگو نسبت به دو الگوی بار مثلثی و مودی دارای درصد خطای بالاتری هستند. درصد خطای الگوهای بار مثلثی در محدوده خطی بسیار کمتر از مقدار خطای آن در محدوده غیرخطی می باشد، این الگو نسبت به دیگر الگوهای ASCE 41-06 از نتایج دست پائین تری برخوردار است. در میان الگوهای بار معرفی شده براساس استاندارد ASCE 41-06 الگوی بار براساس مود اول عرضی از دقت بسیار بالاتری برخوردار است. این الگوها هم در محدوده خطی و هم در محدوده غیرخطی از دقت قابل قبولی برخوردارند و دارای درصد خطای کمتری نسبت به دیگر الگوهای ارائه شده توسط استاندارد ASCE 41-06 می باشند. پاسخ های حاصله از الگوهای بار پیشنهادی برای کاهش یا افزایش مقدار α در رابطه ۶ برای تعریف این الگوها از مقدار معینی به بعد باعث می شوند که بترتیب تخمین های دست بالا و دست پائین تری از برش پایه تخمین زده شود. از بررسی نتایج می توان پی برد که در نظر گرفتن مقدار α در محدوده (۰/۷۵ - ۰/۵) نتایج دقیق تری را نسبت به دیگر مقادیر α برای مدل‌های انتخابی بخصوص در محدوده خطی در این تحقیق را دارند. لذا چنین به نظر می رسد که در پلهای نزدیک بودن پیرو آنها حتی برای پلهای با تعداد دهانه های متفاوت، سبب تشابه شمای بارگذاری جانبی معادل نیروهای اینرسی حاصل از زلزله واقعی می گردد. با افزایش یا کاهش α از محدوده (۰/۷۵ - ۰/۵) به درصد خطای ایجاد شده در نتایج افزوده می شود. با افزایش مقدار α در رابطه پیشنهادی، الگوی بار ایجاد شده تخمین های دست پائین تری را برای سختی و مقاومت مدل ها، مورد ارزیابی قرار می دهد. این موضوع اساساً منجر به این حقیقت می شود که برای برش پایه یکسان، برآیند نیروهای اعمالی به بخشهای میانی عرشه عموماً بیشتر هستند. لذا در اینگونه محلها جابجایی های بزرگتری ایجاد می گردد. همانطور که از شکل ها پیدا است منحنی ظرفیت برای الگوهای بار با مقادیر α بزرگتر یعنی ۱/۵ و ۲ نسبت به بقیه منحنی ظرفیت ها به سوی پائین تنزل پیدا کرده است. اثر سختی شوندگی در منحنی پوش آور را می توان چنین توصیه نمود که زمانی که پایه ها ظرفیتشان اشباع گردد، کوله های الاستیک نیاز لرزه ای اضافی را جذب می کنند، و این اثر بطور کامل توسط روسازه الاستیک که دارای سختی بیشتری است، انتقال داده خواهد شد. بنابراین به تناسب پاسخ، برش افزایش می یابد، از اینرو سختی شوندگی در منحنی ظرفیت ملاحظه خواهد گردید. این اثر با کاهش α یعنی برای مقادیر ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۲۵ الگوی پیشنهادی مشاهده شده است و همچنین برای الگوهای بار مستطیلی و یکنواخت در استاندارد ASCE 41-06 رخ می دهد. یعنی این الگوها تخمین های دست بالا تری را برای سختی و مقاومت مدل ها، مورد ارزیابی قرار می دهند. با توجه به تفسیر های صورت گرفته و نتایج حاصله می توان گفت که از میان الگوهای بار معرفی شده توسط استاندارد ASCE 41-06، الگوی بار براساس مود اول و از میان الگوهای بار پیشنهادی الگوهای بار $F_{\alpha_j} = \left(\frac{2X_i}{L}\right)^{0.75}$ و $F_{Sin}^i = \text{Sin}\left(\frac{\pi X_i}{L}\right)$ نتایج دقیق تری نسبت به دیگر الگوهای توزیع بار برای منحنی ظرفیت ارائه می دهند [۱].



شکل ۳. مقایسه منحنی ظرفیت حاصله از الگوهای توزیع بار جانبی (NSP) با روش IDA [۱]

الف) الگوهای بار ASCE 41-06 (ب) الگوهای بار پیشنهادی



۸-۲. جمع بندی و نتیجه گیری

- ۱- نحوه قرارگیری منحنی های ظرفیت حاصله از الگوهای مختلف بارگذاری در راستای عرضی نسبت به هم در تمامی پلهای مورد مطالعه در این تحقیق تقریباً شبیه به هم می باشد.
- ۲- الگوی بار جانبی هرچه از درجه یکنواختی بیشتری برخوردار باشد، آن الگو سختی و مقاومت بیشتری برای مدل ها، مورد ارزیابی قرار می دهد. لذا این موضوع اساساً منجر به این حقیقت می شود که برای برش پایه یکسان، برآیند نیروهای اعمالی به بخشهای میانی عرشه عموماً بیشتر هستند. لذا در اینگونه محلها جابجایی های بزرگتری ایجاد می گردد و بالعکس.
- ۳- در بین الگوهای پیشنهادی توسط ASCE 41-06 منحنی ظرفیت حاصله از الگوی بار مستطیلی بیشترین و منحنی ظرفیت حاصله از الگوی بار مثلثی کمترین تخمین از سختی و مقاومت برای مدل ها، مورد ارزیابی قرار می دهند.
- ۴- از بین الگوهای پیشنهادی در این تحقیق براساس رابطه تعریف شده منحنی ظرفیت حاصله برای $(\alpha = 0.25)$ بیشترین و منحنی ظرفیت حاصله برای $(\alpha = 2)$ کمترین تخمین از سختی و مقاومت برای مدل ها، مورد ارزیابی قرار می دهند.
- ۵- از میان الگوهای بار معرفی شده توسط ASCE 41-06 الگوی بار براساس مود اصلی و از میان الگوهای بار پیشنهادی الگوی بار به ازای $(\alpha = 0.75)$ و الگوی بار سینوسی نتایج دقیق تری را در مقایسه با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) در برآورد منحنی ظرفیت پل نشان می دهند.
- ۶- از روی منحنی ظرفیت حاصله از الگوهای پیشنهادی می توان پی به این واقعیت برد که با افزایش یا کاهش α در رابطه پیشنهادی از محدوده $(.75 - .5)$ به درصد خطای ایجاد شده در نتایج بخصوص در محدوده غیرخطی، افزوده می شود.
- ۷- در تمامی مدل ها از بین الگوهای بار ASCE 41-06 دو الگوی بار مستطیلی و یکنواخت در برآورد جابجایی گره ها از تخمین دست پائینی برخوردار می باشند، و نسبت به دو الگوی دیگر ASCE 41-06 یعنی الگوی بار مثلثی و مودی از درصد خطای بالاتری برخوردارند.

۹. مراجع

۱. جهان فکر، احسان، "مقایسه شمای بارگذاری در آنالیز استاتیکی غیرخطی (پوش آور) برای پلها و پیشنهادی برای بارگذاری بهینه" پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ تهران، ۱۳۸۸
2. Chung C.Fu, H.Alayed. "Seismic Analysis Of Bridges Using Displacement-Based Approach", University of Maryland, TRB Annual Meeting 2003.
3. ASCE/SEI, "Seismic Rehabilitation of Existing Building (Book)", American Society of Civil Engineers, 2007.
4. Dimitrios Vamvatsikos and C.Allin Cornel, "Incremental Dynamic Analysis" Stanford University, CA 94305-4020, U.S.A
5. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges", American of state Highway and Transportation Officials Inc., Washington, DC, 2000.
6. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., Fenves, G. L. and Jeremic, B. "Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)" [Command Language Manual], University of California, Berkeley, USA, (2003).
7. Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. (August 1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete", Journal of the Structural Engineering, 114(ST8): 1804-1826.
8. Lestuzzi P., Schwab P., Koller M., Lacave C. "How to Choose Earthquake Recordings for Nonlinear Seismic Analysis of Structures" 13 WCE, No. 1241, 2004.