

یادداشت پژوهشی

بررسی تأثیر ارتفاع پایه پل‌ها بر دقت روش تک مودی آیین‌نامه آشتو در تحلیل

لرزه‌ای پل‌ها و ارائه پیشنهاد برای اصلاح و توسعه روش

نصرت ا... فلاح، استادیار، گروه عمران، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان

سعید پورزینلی، دانشیار، گروه عمران، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان

حسین کریمی، کارشناس ارشد، گروه عمران، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان

E-mail: fallah@guilan.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های معرفی شده در آیین‌نامه آشتو برای تحلیل لرزه‌ای پل‌ها، روش تحلیل تک مودی است که از جمله روش‌های استاتیکی معادل است. در این آیین‌نامه، شرایطی برای محدوده اعتبار روش تک مودی تعیین شده است که در صورت عدم وجود این شرایط می‌بایست روش‌های دینامیکی برای تحلیل پل استفاده شود. یکی از شاخص‌هایی که در این آیین‌نامه برای تقسیم‌بندی پل‌ها از نقطه نظر انتخاب روش تحلیل در نظر گرفته نشده، ارتفاع پایه‌های پل است. در این مطالعه به بررسی چگونگی تأثیر ارتفاع پایه‌های پل بر دقت روش تک مودی آشتو پرداخته می‌شود، به طوری که از مهم‌ترین دلایل وابستگی دقت نتایج تحلیل به ارتفاع پایه‌های پل در نظر نگرفتن جرم پایه‌ها در فرآیند تحلیل، و اعمال نیروهای ناشی از زلزله، تنها به عرشه پل است. در ادامه، پیشنهادی برای اصلاح و توسعه توانایی روش تک مودی آشتو ارائه می‌شود. دقت روش اصلاح شده با روش تک مودی مقایسه شده و نشان داده خواهد شد که دقت روش اصلاح شده متأثر از ارتفاع پایه‌های پل نبوده و قادر به تحلیل پل‌های مرتفع نیز هست.

۱. مقدمه

پل‌ها از ابنیه فنی مهم و از شریان‌های حیاتی کشورهای به شمار می‌روند و توجه به طراحی مقاوم آنها در مقابل زلزله به ویژه در کشور ما که از لرزه‌خیزی بسیاری برخوردار است، کاملاً ضروری است. با توجه به این که عدم دقت روش‌های تحلیل لرزه‌ای و روابط آیین‌نامه‌ای از جمله عوامل خرابی‌ها بوده است [۱]، لزوم بررسی دقیق و شناخت مبانی آیین‌نامه‌ها در زمینه تحلیل لرزه‌ای پل‌ها بخوبی روشن است. در این راستا، بررسی آیین‌نامه‌های مختلف و مقایسه روش‌های استاتیکی معادل و دینامیکی از ضرورت خاصی برخوردار است. به طور کلی، در اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای ابتدا با توجه به نوع و رفتار لرزه‌ای سازه پل روش تحلیل استاتیکی معادل و یا روش تحلیل دینامیکی انتخاب می‌شود. در روش استاتیکی معادل، با فرض این که اولین مود

ارتعاشی سازه پل در هر راستا (طولی و عرضی)، تعیین کننده پاسخ کلی سیستم است، پروده‌های ارتعاشی در دو راستای طولی و عرضی، محاسبه و به تبع آن نیروهای معادل زلزله به کمک طیف‌های طرح ارائه شده در آیین‌نامه‌ها تعیین می‌شود. این نیروهای معادل به صورت استاتیکی در راستای مورد نظر به سازه پل اعمال شده و نیروهای داخلی محاسبه می‌شوند. صحت هر یک از مراحل فوق، از مرحله نخست که انتخاب روش تحلیل است تا مرحله نهایی که چگونگی اعمال نیروهای معادل زلزله است، می‌تواند مورد تردید واقع شود. با توجه به ملاحظات مذکور، آیین‌نامه‌ها در ویرایش‌های جدید با توجه به نتایج تحقیقات تحقیقات مستمر، به اصلاح ضوابط خود همچون معیارهای انتخاب روش‌های تحلیل، معرفی روش‌های جدید تحلیل و اصلاح طیف‌های طراحی می‌پردازند. همچنین خرابی‌های ایجاد شده در پل‌ها در زلزله‌های اخیر نشان می‌دهند که همچنان،

ضوابط آشتو بر این اساس استوار است که احتمال وقوع نیروهای بزرگتر از نیروهای طراحی در مدت عمر مفید پل کم خواهد بود. پل‌ها و اجزای آن که برای مقاومت در برابر این نیروها طراحی می‌شوند ممکن است به هنگام زلزله دچار آسیب شوند، اما احتمال فرو ریختن آنها کم است. مبنای قواعد کلی این ضوابط عبارتند از:

- ۱- در برابر زمین لرزه‌های کم تا متوسط، اجزای سازه در حد ارتجاعی، مقاومت خود را بدون آسیب قابل ملاحظه‌ای حفظ کنند.
 ۲. سازه به طور جزئی و کلی از خطر فرو ریختن به هنگام زلزله‌های قوی در امان باشد. آسیب‌ها باید به راحتی قابل شناسایی بوده و برای بازرسی در دسترس بوده و امکان ترمیم پل به سهولت عملی باشد.
- در این آیین‌نامه، چهار طبقه‌بندی لرزه‌ای بر حسب موقعیت مکانی پل و درجه اهمیت پل تعریف شده است.

۲-۱-۱ محاسبه نیروهای لرزه‌ای در روش استاتیکی معادل
در آیین‌نامه آشتو برای محاسبه نیروهای لرزه‌ای، بر اساس روش استاتیکی معادل، نیاز به تعیین ضرایبی است که در ذیل معرفی می‌شوند.

۲-۱-۱-۱ ضریب شتاب پایه
ضریب شتاب پایه A از نقشه خطوط هم شتاب که توسط این آیین‌نامه ارائه شده است، به دست می‌آید. ضرایب در این شکل‌ها به طور درصد درج شده است.

۲-۱-۲-۱ درجه اهمیت پل
به منظور تعیین طبقه‌بندی لرزه‌ای، برای تمامی پل‌هایی که در محلی با ضریب شتاب بزرگ‌تر از ۰.۲۹، احداث می‌شوند، درجه اهمیت پل مورد نیاز است. پل‌ها بر اساس کارکرد اجتماعی، امدادی، امنیتی و دفاعی آنها از نظر اهمیت به دو درجه تقسیم می‌شوند:

۱- پل‌های مهم، $IC=I$

۲- پل‌های دیگر، $IC=II$

۲-۱-۲-۳ طبقه‌بندی لرزه‌ای
هر پل به یکی از چهار طبقه لرزه‌ای A تا D تعلق دارد که با توجه به ضریب شتاب پایه A و درجه اهمیت آن مشخص

ضوابط آیین‌نامه‌ای خالی از نقص و ضعف نیستند. در نسخه ۲۰۰۲ آیین‌نامه آشتو (AASHTO) [۲] چهار نوع روش تحلیل لرزه‌ای برای پل‌ها معرفی شده است که روش تک مودی از جمله این روش‌ها بوده که در آن بر مبنای روش استاتیکی معادل، به محاسبه نیروی زلزله اقدام می‌شود. در انتخاب هر یک از روش‌های چهارگانه فوق، ارتفاع پایه‌ها به عنوان یک عامل مؤثر مورد توجه نیست. از آنجا که آیین‌نامه پل ایران نیز اقتباسی از روش تک مودی آشتوست، بررسی و مطالعه نقاط ضعف این روش در تحلیل لرزه‌ای پل‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله، تأثیر ارتفاع پایه‌های پل بر دقت روش تک مودی آشتو مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با نشان دادن ناتوانی روش تک مودی در برآورد دقیق نیروهای داخلی، پیشنهاداتی برای اصلاح و توسعه این روش ارائه می‌شود.

۲. آیین‌نامه آشتو و روش تحلیل تک مودی

در امریکا، تا قبل از ۱۹۷۱ طراحی لرزه‌ای پل‌ها مبتنی بر بکارگیری روش استاتیکی معادل بوده است. بعد از زلزله ۱۹۷۱ سان فرانسو، اداره حمل و نقل کالیفرنیا (CALTRANS) راهنمای طرح لرزه‌ای جدیدی را منتشر کرد. در این راهنما، سه متغیر اساسی در تعیین نیروهای لرزه‌ای پل‌ها مورد توجه بوده است. فاصله پل تا گسل فعال، خواص زمین شناسی خاک محل پل و رفتار دینامیکی پل در مقابل بارهای مشخص. در سال ۱۹۷۵ آیین‌نامه آشتو با اصلاحاتی راهنمای پیشنهادی CALTRANS را پذیرفت. در سال ۱۹۸۱، نتایج حاصل از تحقیقات انجام یافته به وسیله شورای تکنولوژی کاربردی (ATC) منتشر شد. یکی از اهداف مهم این تحقیق معرفی یک روش احتمالاتی برای تعیین زلزله طرح بوده است. در سال ۱۹۸۳، گزارش معروف ATC-6 به وسیله آشتو تحت عنوان راهنمای مشخصات طراحی پذیرفته شد [۳]. این راهنما، با اصلاحاتی محدود از سال ۱۹۹۲ به عنوان بخشی از استاندارد آشتو قرار گرفت، به طوری که محتوای آخرین ویرایش دستورالعمل آشتو در طرح لرزه‌ای به روش LRF [۴] مبتنی بر استاندارد ۱۹۹۲ آیین‌نامه آشتو است [۵].

بخش لرزه‌ای آیین‌نامه ۲۰۰۲ آشتو [۲]، ضوابط طراحی و ساخت پل‌ها را برای به حداقل رساندن آسیب‌پذیری آنها در برابر زلزله فراهم می‌کند. تعیین نیروهای طراحی زلزله طبق

می‌شود. حداقل ضوابط تحلیل و طراحی با توجه به طبقه‌بندی لرزه‌ای پل تعیین می‌شود.

۲-۱-۴ اثرات محل اجرای پل

تأثیرات محلی بر رفتار لرزه‌ای پل می‌بایستی با تعیین ضریب خاک محل (S)، با توجه به بافت خاک محل ساخت، تعیین به طور. در این آیین‌نامه چهار تیب برای بافت‌های مختلف خاک در نظر گرفته شده است.

۲-۱-۵ ضریب پاسخ ارتجاعی زلزله

ضریب ارتجاعی زلزله C_s که برای تعیین نیروهای طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به وسیله فرمول بدون بعد زیر تعیین می‌شود به طوری که:

$$C_s = \frac{1/2 AS}{T^3} \quad (1)$$

که در آن:

A: ضریب شتاب پایه

S: ضریب بدون بعد مربوط به خاک محل

T: پریود ارتعاشی پل

مقدار C_s لزومی ندارد که از ۲/۵ برابر A تجاوز کند.

برای خاک تیب III در مناطقی که $A \geq 0/3$ است مقدار C_s الزاماً از ۲ برابر A تجاوز نمی‌کند.

۲- روش تک مودی

۳- روش چند مودی

۴- روش تاریخچه زمانی

در روش‌های فوق فرض شده است که تمامی تکیه‌گاهها، پایه‌ها و کوله‌ها در هر لحظه تحت اثر حرکات یکسان زمین لرزه قرار می‌گیرند.

حداقل ضوابط برای انتخاب روش تحلیل برای یک پل خاص در جدول ۱ آورده شده است. انتخاب روش با توجه به منظم یا نامنظم بودن پل و همچنین طبقه‌بندی لرزه‌ای آن انجام می‌شود. پل‌های منظم کمتر از ۷ دهانه دارند و نیز دارای تغییرات ناگهانی و یا غیر معمول جرم، سختی یا هندسه در راستای طولی نبوده و همچنین تفاوت زیادی بین این متغیرها در تکیه‌گاههای مجاور هم وجود ندارد. معیارهای پل منظم در جدول ۲ ارائه شده‌اند. هر پلی که معیارهای جدول ۲ را برآورده نسازد، به عنوان یک پل نامنظم در نظر گرفته می‌شود. مطابق جدول ۱ روش تک مودی آیین‌نامه آشتو، برای تحلیل پل‌های منظم با تعداد دهانه‌های بیشتر از دو که در طبقه‌بندی لرزه‌ای B, C و یا D قرار دارند، استفاده می‌شود. برای تحلیل پل‌های نامنظم از روش تحلیل چند مودی استفاده می‌شود. در مواردی که پل‌ها دارای پیچیدگی‌های بیشتری باشند، می‌توان از روش چهارم یعنی روش تاریخچه زمانی نیز استفاده کرد.

جدول ۱. حداقل ضوابط تحلیل

پلهای نامنظم با ۲ دهانه و یا بیشتر	پلهای منظم با ۲ الی ۶ دهانه	طبقه بندی لرزه ای
نیازی نیست	نیازی نیست	A
روش ۳ مورد استفاده قرار گیرد	روش ۱ یا ۲ مورد استفاده قرار گیرد	B, C, D

جدول ۲. ویژگی‌های پل منظم

تعداد دهانه				
6	5	4	3	2
90	90	90	90	90
1/5	1/5	2	2	3
2	3	4	4	-

۱-۱ انتخاب روش تحلیل

چهار روش تحلیل که در آیین‌نامه آشتو ارائه شده‌اند، عبارتند از:

۱- روش بار یکنواخت

۲-۳ روش تک مودی

مراحل روش تحلیل تک مودی در ذیل به صورت گام به گام تشریح شده و برای تحلیل در هر دو جهت طولی و عرضی مورد

استفاده قرار می‌گیرد.

گام ۳- محاسبه پریود پل با استفاده از رابطه زیر:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{P_0 g \alpha}} \quad (5)$$

که در آن g شتاب ثقل است.

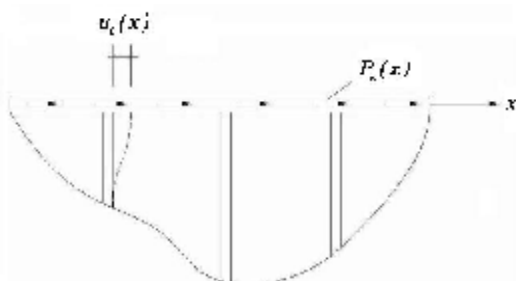
گام ۴- از طریق رابطه زیر بار $P_e(x)$ که معادل استاتیکی بار زلزله می‌باشد، تعیین می‌شود به طوری که:

$$P_e(x) = \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x) u_s(x) \quad (6)$$

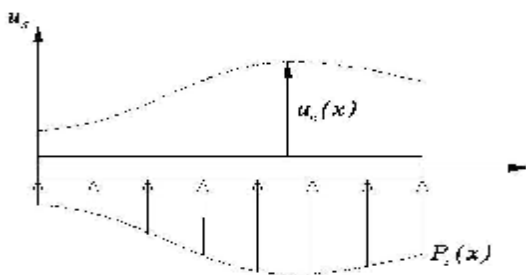
که در آن C_s ضریب بی‌بعد ارتجاعی زلزله است که از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$P_e(x)$ = شدت بار استاتیکی معادل زلزله که نظیر مود اول ارتعاش است، (نیرو بر واحد طول).

گام ۵- بار $P_e(x)$ مطابق شکل ۲ به سازه اعمال می‌شود تا نیروها و تغییر مکان‌های طراحی اعضای پل تعیین شوند.



الف) بارگذاری طولی (نمای روبرو)



ب) بارگذاری عرضی (پلان)

شکل ۲. عرشه پل تحت تأثیر نیروهای استاتیکی معادل زلزله در امتدادهای طولی و عرضی

۳. بررسی دقت روش تک مودی آیین‌نامه آشتو

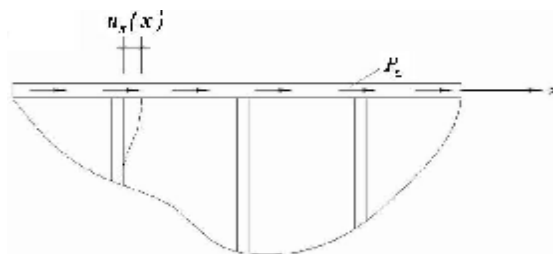
در برآورد نیروهای داخلی سازه پل

گام ۱- ابتدا تغییر مکان‌های استاتیک $u_s(x)$ ناشی از یک بار یکنواخت فرضی P_0 که در شکل ۱ نشان داده شده حساب می‌شود. بار یکنواخت P_0 در تمام طول دهانه اعمال می‌شود و واحد آن برابر با نیرو بر واحد طول بوده و به طور اختیاری مساوی واحد در نظر گرفته می‌شود. همچنین، تغییر مکان استاتیکی $u_s(x)$ دارای واحد طول است.

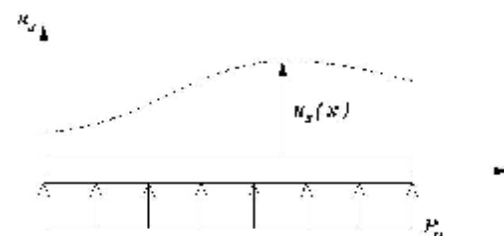
گام ۲- محاسبه ضرایب α ، β و γ از طریق روابط زیر:

$$\alpha = \int u_s(x) dx \quad (2)$$

$$\beta = \int w(x) u_s(x) dx \quad (3)$$



الف) بارگذاری طولی (نمای روبرو)



ب) بارگذاری عرضی (پلان)

شکل ۱. عرشه پل تحت تأثیر بار فرضی طولی و عرضی

$$\gamma = \int w(x) u_s(x)^2 dx \quad (4)$$

که در آن $w(x)$ وزن واحد طول روسازه پل و زیر سازه آن است. وزن پل شامل اجزای سازه و بارهای مربوطه دیگر از جمله سر ستون، کوله، ستون و پی بوده و ممکن است بارهای دیگری مانند بار زنده نیز به حساب آیند. به طور کلی، اثرات اینرسی بارهای زنده در تحلیل وارد نمی‌شوند، با این وجود در طراحی پل‌هایی که نسبت بار زنده به بار مرده در آنها زیاد بوده و نیز احتمال تراکم ترافیک وجود دارد بایستی احتمال وجود بارهای زنده بزرگ روی پل را هنگام زلزله در نظر گرفت.

بررسی تأثیر ارتفاع پایه پل‌ها بر دقت روش تک مودی آیین‌نامه آشتو در تحلیل لرزه‌ای پل‌ها و...

برشی ایجاد شده در کوله‌ها و همچنین جابجایی ارتجاعی در جهت طولی، با انجام تحلیل به روش تک مودی استخراج و با مقادیر نظیر به دست آمده از روش تحلیل طیفی مقایسه شده‌اند. سپس میزان خطای روش تک مودی در هر مورد محاسبه شده و نتایج مربوطه در دو راستای طولی و عرضی در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.

نمودارهای فوق نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع پل‌ها میزان خطای روش تک مودی برای تمامی نیروها به صورت تقریباً هماهنگی افزایش می‌یابد و بنابراین از کارآیی آن در تحلیل پل‌های مرتفع، به شدت کاسته می‌شود. در پل‌های با ارتفاع ۴۵ متر این خطا در راستای عرضی حتی به ۷۰ تا ۸۰ درصد نیز رسیده است.

مطالعه منشأ این خطاها در فرآیند تحلیل می‌تواند موجب اصلاح روش‌های تحلیل برای دستیابی به پاسخ‌های دقیق‌تر شود. در مورد خطاهای روش تک مودی آشتو که جزء روش‌های استاتیکی معادل محسوب می‌شود، علل بروز خطا را می‌بایست در دو مرحله بسیار مهم جستجو کرد. مرحله نخست، مرحله تخمین پیرو ارتعاشی سازه است که دقت آن با توجه به میزان ساده سازی‌های صورت گرفته و دقت فرضیات متفاوت است. مرحله دوم نیز چگونگی توزیع و اعمال نیروهای زلزله است که مستقیماً بر دقت نتایج مؤثر است.

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع پایه‌های پل در میزان دقت روش تک مودی آیین‌نامه آشتو در ارزیابی نیروهای داخلی پایه‌ها و همچنین جابجایی‌ها از ۶ پل نمونه ۴ دهانه با مشخصات سازه‌ای ارائه شده در جدول ۳ استفاده شده است. نمونه‌ها بر اساس روش تک مودی آیین‌نامه آشتو و با فرض‌های زیر مورد تحلیل لرزه‌ای قرار گرفتند:

الف) ضریب شتاب طرح برابر $0/4$ است ($A=0/4$)

ب) پل از لحاظ اجتماعی، امنیتی و دفاعی مهم است ($IC=I$)

ج) جنس خاک محل از نوع ۲ در نظر گرفته می‌شود ($S=1/2$)

برای تحلیل‌های دینامیکی به صورت طیفی از نرم افزار SAP2000 (Version 9.0.1) استفاده شده است. این نرم افزار که به گزینه‌های تخصصی در تحلیل و طراحی انواع پل‌ها اعم از بتن آرمه، بتن پیش‌تنیده و فولادی مجهز شده است، نرم افزاری قدرتمند در زمینه تحلیل استاتیکی و دینامیکی پل‌هاست [۶]. در این مطالعه، نتایج تحلیل طیفی که با در نظر گرفتن ۲۵ مود ارتعاشی انجام گرفته است، به عنوان جواب دقیق و معیاری برای ارزیابی دیگر روش‌های ارائه شده در آیین‌نامه آشتو، مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. بررسی‌های جداگانه نشان داده‌اند که نتایج تحلیل طیفی فوق با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی تحت زلزله مصنوعی منطبق بر طیف طراحی تطابق بسیار مناسبی دارند.

جدول ۳. مشخصات پل‌های نمونه

ممان اینرسی پایه در جهت عرضی (متر مکعب)	ممان اینرسی پایه در جهت طولی (متر مکعب)	سطح مقطع پایه‌ها (متر مربع)	ممان اینرسی عرشه حول محور قائم (متر مکعب)	ممان اینرسی عرشه حول محور عرضی (متر مکعب)	سطح مقطع عرشه (متر مربع)	ارتفاع پایه (متر)	طول دهانه (متر)	تعداد دهانه	
۱/۳۰۲۱	۰/۲۰۸۳	۲/۵	۴۶/۹۷۳	۱/۲۱۸۵	۵/۷۶۵	۵	۲۵	۴	نمونه ۱
۱/۳۰۲۱	۰/۲۰۸۳	۲/۵	۴۶/۹۷۳	۱/۲۱۸۵	۵/۷۶۵	۷/۵	۲۵	۴	نمونه ۲
۱/۳۰۲۱	۰/۲۰۸۳	۲/۵	۴۶/۹۷۳	۱/۲۱۸۵	۵/۷۶۵	۱۲/۵	۲۵	۴	نمونه ۳
۱/۳۰۲۱	۰/۲۰۸۳	۲/۵	۴۶/۹۷۳	۱/۲۱۸۵	۵/۷۶۵	۲۰	۲۵	۴	نمونه ۴
۱/۵۶۲۵	۰/۳۶	۳	۴۶/۹۷۳	۱/۲۱۸۵	۵/۷۶۵	۳۰	۲۵	۴	نمونه ۵
۱/۹۵۳	۰/۷۰۳	۳/۷۵	۴۶/۹۷۳	۱/۲۱۸۵	۵/۷۶۵	۴۵	۲۵	۴	نمونه ۶

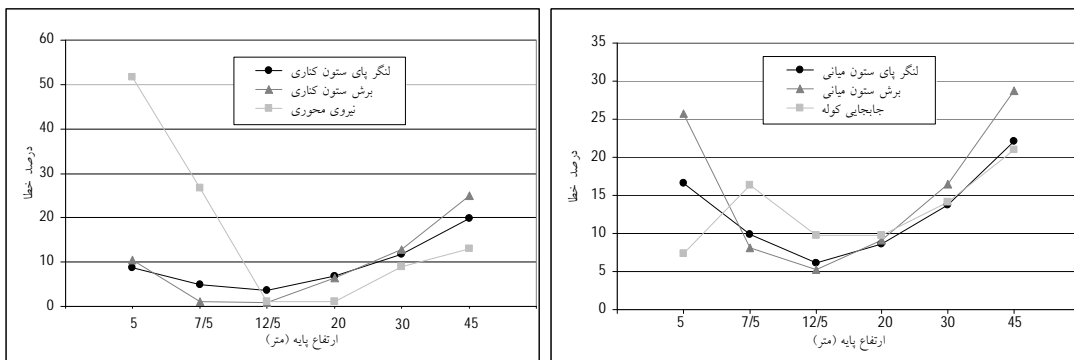
برای مشخص کردن سهم هر یک از عوامل فوق‌الذکر، ابتدا پیرو ارتعاشی پل‌های نمونه در جهات طولی و عرضی بر اساس

پاسخ‌های مهم سازه‌ای که در طراحی مورد نیاز هستند، از قبیل نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی ستون‌ها، نیروی

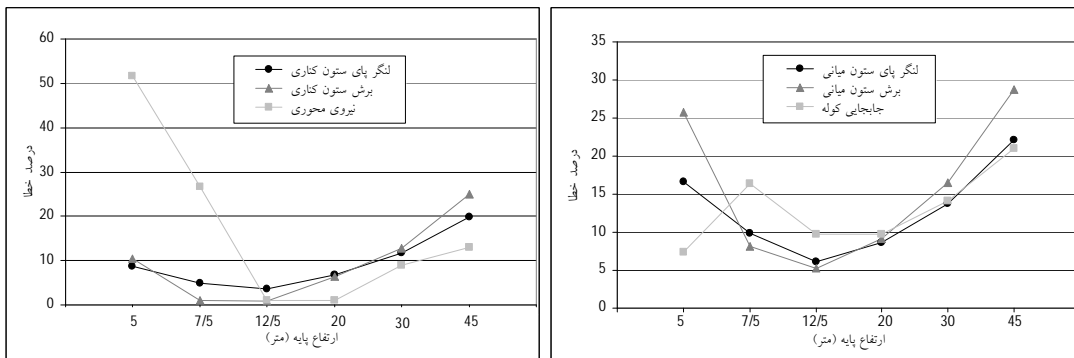
فلاح، پورزیلی و کریمی

طولی و عرضی مؤید نقش عمده چگونگی توزیع نیروهای اینرسی در سازه پل است. در پل‌های مرتفع تأثیر پایه‌ها در مقدار نیروهای اینرسی، به علت جرم زیاد آنها، تعیین کننده است. این در حالی است که در شیوه تحلیل تک مودی نیروهای ناشی از زلزله تنها به عرشه پل وارد می‌شود به طوری که پایه‌ها نقش چندانی ندارند.

روش آنالیز مودال محاسبه شده و مقادیر به دست آمده با مقادیر حاصل از رابطه ۵ مقایسه شده است. پریودهای ارتعاشی محاسبه شده در جدول ۴ ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده و نمودارهای ارائه شده، بعضی از علل ایجاد خطا در برآورد نیروهای داخلی قابل استنباط است که به صورت موردی به آنها اشاره می‌شود:



شکل 3. خطای روش تک مودی آیین نامه آشتو در تعیین نیروهای داخلی در مقایسه با روش طیفی - جهت طولی



شکل 4. خطای روش تک مودی آیین نامه آشتو در تعیین نیروهای داخلی در مقایسه با روش طیفی - جهت عرضی

جدول 4. مقدار پریود محاسبه شده در جهات طولی و عرضی و میزان خطای آن نسبت به نتایج آنالیز مودال

پریود (ثانیه)	دهانه ۲۵ متر پایه ۵ متر	دهانه ۲۵ متر پایه ۷/۵ متر	دهانه ۲۵ متر پایه ۱۲/۵ متر	دهانه ۲۵ متر پایه ۲۰ متر	دهانه ۲۵ متر پایه ۳۰ متر	دهانه ۲۵ متر پایه ۴۵ متر
جهت طولی						
مقدار دقیق (آنالیز مودال)	۰/۲۵۱	۰/۳۹۳۹	۰/۸۲۴۶	۱/۶۶۴۹	۲/۴۱۴۶	۳/۳۹۹۴
مقدار محاسبه شده	۰/۱۹۳۸	۰/۳۵۷	۰/۷۷۰۹	۱/۵۷۶	۲/۲۳۶۹	۳/۰۳۱۶
خطا (%)	۲۲/۸	۹/۴	۶/۵	۵/۳	۷/۴	۱۰/۸
جهت عرضی						
مقدار دقیق (آنالیز مودال)	۰/۱۶۳	۰/۲۶۰۷	۰/۴۷۰۷	۰/۶۷۷۳	۰/۷۷۶۱	۰/۸۴۹۸
مقدار محاسبه شده	۰/۱۵۱۲	۰/۲۴۴۹	۰/۴۳۵۸	۰/۶۱۶۸	۰/۷۰۴۸	۰/۷۶۲۷
خطا (%)	۷/۲	۶/۱	۷/۴	۸/۹	۹/۲	۱۰/۳

مرتفع و همچنین دقت تقریباً یکسان این روش در دو راستای (ارتفاع ۵ متر)، مشابه با مقدار خطا در برآورد نیروهای داخلی در

پژوهشنامه حمل‌ونقل، سال پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۳۸۷

۴. ارائه پیشنهاد برای توسعه و اصلاح روش

تک مودی آیین‌نامه آشتو

در این قسمت، با توجه به شناختی که از عوامل مؤثر در ضعف روش تک مودی آیین‌نامه آشتو در برآورد نیروهای داخلی حاصل شده است، پیشنهاداتی برای توسعه و اصلاح روش تک مودی ارائه می‌شود. اساس بسط و اصلاح روش تک مودی، سهیم کردن پایه‌ها در شکل دهی رفتار کلی سیستم و وارد کردن جرم پایه‌ها به صورت مستقل در محاسبات است. بر خلاف روش تک مودی آشتو که برای محاسبه پریود ارتعاشی نیروی جانبی تنها به عرشه پل اعمال می‌شود، در روش اصلاح شده نیروهای جانبی هم به عرشه و هم به تمامی پایه‌ها (معادل با بار مرده هر یک از اعضا) وارد می‌شوند. در هنگام محاسبه نیروی معادل زلزله نیز نیروهای اینرسی ناشی از جرم پایه‌ها، به صورت مجزا و برای هر پایه با توجه به درصدی از جرم آن محاسبه و در راستای مورد نظر به پایه‌ها اعمال می‌شود. مراحل مختلف روش توسعه یافته تک مودی به صورت زیر است:

- (1) ساخت مدل سازه پل
- (2) اعمال شرایط تکیه گاهی
- (3) اعمال نیروهای جانبی به عرشه و پایه‌ها در راستای مورد نظر (شکل ۵)
- (4) محاسبه پریود ارتعاشی در جهات طولی و عرضی به کمک روابط زیر:

$$\alpha_d = \int_0^{l_d} u_d(x) dx, \quad (7)$$

$$\alpha_p = \int_0^{l_p} u_p(z) dz, \quad (8)$$

$$\beta_d = \int_0^{l_d} w_d(x) \cdot u_d(x) dx, \quad (9)$$

$$\beta_p = \int_0^{l_p} w_p(z) \cdot u_p(z) dz, \quad (10)$$

$$\gamma_d = \int_0^{l_d} w_d(x) \cdot u_d^2(x) dx, \quad (11)$$

$$\gamma_p = \int_0^{l_p} w_p(z) \cdot u_p^2(z) dz, \quad (12)$$

راستای طولی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با نمونه‌های دیگر دارد به طوری که مقادیر خطا به میزان قابل توجهی زیاد است. یکی از علل این مسئله مفروضات بکار گرفته شده در محاسبه سختی پل در راستای طولی است که در محاسبه پریود پل نیز بکار می‌رود. محاسبه سختی طولی پل، طبق مثال ارائه شده در قسمت ضمیمه آیین‌نامه آشتو، بر اساس فرض حرکت صلب روسازه و فرض تغییر شکل پایه‌ها به صورت دو سر گیردار انجام می‌شود. در پل‌های با ارتفاع کم که نسبت طول دهانه به ارتفاع پایه زیاد است، این فرض اعتبار خود را از دست می‌دهد. با توجه به نتایج آنالیز مودال، این پل‌ها به علت انعطاف‌پذیری زیاد عرشه، در اولین مود ارتعاشی خود به صورت قائم مرتعش می‌شوند و مودهای ارتعاشی قائم به عنوان مودهای غالب ظاهر می‌گردند. به این ترتیب اساسی‌ترین فرض روش استاتیکی معادل که حرکت صلب سازه در راستای مورد نظر (طولی یا عرضی) است مورد تردید جدی واقع می‌شود. تحریک شدن مودهای ارتعاشی قائم سبب بروز خطا در تخمین پریود ارتعاشی خصوصاً در راستای طولی می‌شود. از طرفی، پل‌های کوتاه به علت دارا بودن پریودهای ارتعاشی کوچک در محدوده سرعت ثابت (قسمت یکنواخت) طیف‌های پاسخ طراحی قرار می‌گیرند و در نتیجه اختلاف در پریودهای ارتعاشی تأثیری در مقدار ضریب زلزله نخواهد داشت. علت اصلی برآورد نادرست نیروهای داخلی به ویژه نیروهای محوری ستون‌ها، عدم شرکت تمامی بار مرده عرشه پل در تولید نیروهای اینرسی خصوصاً در راستای طولی، به علت تحریک شدن مودهای ارتعاشی قائم و افزایش بار قائم وارده به ستون‌هاست.

ج) نتایج مربوط به پل با ارتفاع پایه ۱۲/۵ متر در مقایسه با نتایج مربوط به دیگر نمونه‌ها، کمترین میزان خطا را نشان می‌دهند. این مسئله در راستای طولی بسیار واضح‌تر از راستای عرضی است به طوری که پل‌ها با پایه کوتاه‌تر و بلندتر از این مقدار، در جهت طولی خطای بزرگ تری را نشان می‌دهند. نسبت ارتفاع پایه به طول دهانه در این نمونه برابر ۰/۵ است. این نسبت با توجه به افزایش خطاها در دو سمت آن می‌تواند به عنوان شاخص و معیاری برای تقسیم بندی پل‌ها در نظر گرفته شود. در پل‌های با نسبت بزرگ‌تر از ۰/۵ افزایش ارتفاع پایه‌ها و عدم در نظر گرفتن نقش آنها، و در نسبت‌های کوچک‌تر از ۰/۵ تحریک مودهای ارتعاشی قائم و انعطاف‌پذیری عرشه سبب بروز خطا می‌شود.

(۱۷) وزن مؤثر پایه در راستای طولی

$$w'_p(z) = 0/85 * w(z)$$

(۱۸) وزن مؤثر ستونهای کناری در راستای عرضی

$$w'_p(z) = 0/70 * w(z)$$

(۱۹) وزن مؤثر ستونهای میانی در راستای عرضی

$$w'_p(z) = 0/90 * w(z)$$

$w(z)$: وزن کل پایه در واحد طول در امتداد قائم

$w_d(x)$: وزن روسازه

(۷) اعمال نیروهای اینرسی محاسبه شده در بند (۶) مطابق شکل

۶ و محاسبه نیروهای داخلی سازه

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma_d + \sum_i \gamma_{pi}}{g(P_{od} \alpha_d + \sum_i P_{op} \alpha_{pi})}}, \quad (13)$$

که در آن i برابر تعداد پایه‌های پل است.

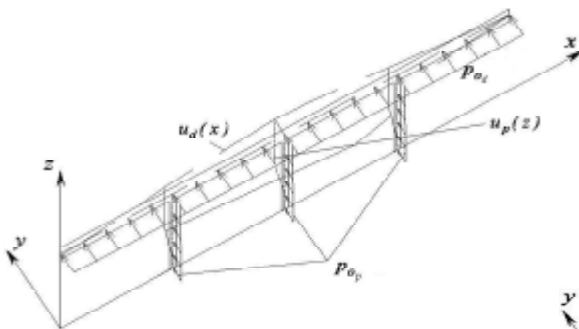
(۵) محاسبه ضریب زلزله

$$C_s = \frac{1/2 AS}{T^{2/3}} \quad (14)$$

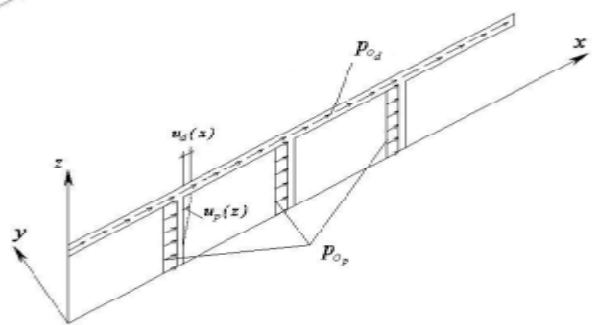
(۶) محاسبه نیروهای اینرسی در عرشه و پایه‌ها

$$P_{e_d}(x) = \frac{\beta_d \cdot C_s \cdot w_d(x) \cdot u_d(x)}{\gamma_d} \quad (15)$$

$$P_{e_p}(x) = \frac{0/27 \beta_p \cdot C_s \cdot w'_p(z) \cdot u_p(z)}{0/23 \gamma_p} \quad (16)$$

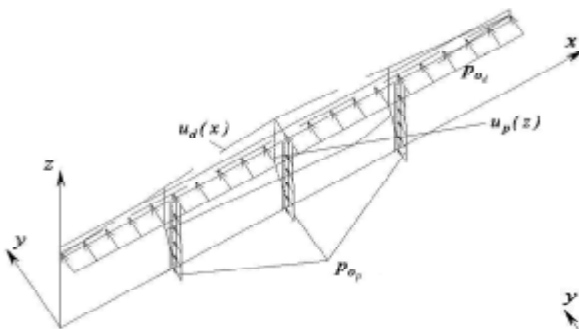


(ب) جهت عرضی

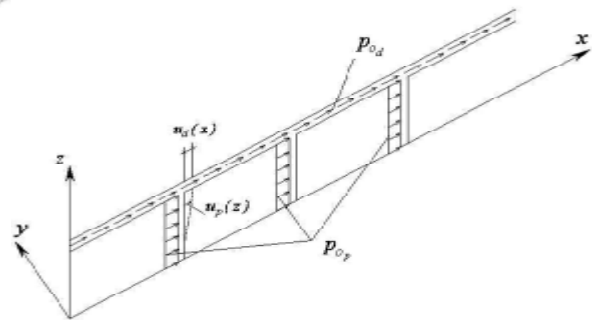


(ف) جهت طولی

شکل ۵. اعمال بارهای جانبی به عرشه و پایه‌ها جهت برآورد پیرودهای ارتعاشی



(ب) جهت عرضی



(ف) جهت طولی

شکل ۶. اعمال نیروهای زلزله به عرشه و پایه‌ها

بررسی تأثیر ارتفاع پایه پل‌ها بر دقت روش تک مودی آیین‌نامه آشتو در تحلیل لرزه‌ای پل‌ها و...

پل‌های نمونه قبلی، با استفاده از روش پیشنهادی مجدداً تحلیل شده و نتایج به دست آمده در جداول ۵-الف و ۵-ب و همچنین در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب با نتایج روش تک مودی آشتو مقایسه شده‌اند. نمودارها به روشنی بیانگر کارایی بسیار خوب روش پیشنهادی هستند: نتایج حاصل از بکارگیری روش پیشنهادی در تعیین نیروهای داخلی و همچنین پریرود ارتعاشی پل‌ها، از دقت بسیار خوبی برخوردارند. علاوه بر این، روش بسط یافته، متأثر از ارتفاع پایه‌ها نبوده و در پل‌های مرتفع نیز از دقت بسیار قابل قبولی برخوردار است و میزان خطاها به نحو قابل توجهی کمتر

از روش آیین‌نامه است. در مورد پل‌هایی با نسبت طول دهانه به ارتفاع پایه زیاد، با توجه به تحلیل‌های مختلف صورت گرفته بر روی پل نمونه با ارتفاع پایه ۵ متر که در اینجا ارائه نشده است، توصیه می‌شود ۸۰ درصد از جرم کل عرشه در محاسبه نیروی اینرسی عرشه وارد شود. در صورت رعایت این نکته، روش مذکور در این گونه از پل‌ها نیز جواب‌های نسبتاً قابل قبولی ارائه می‌دهد. مشخص کردن حد خاصی برای این منظور نیازمند بررسی و تحقیقات بیشتر است. با این حال در صورت عدم بکارگیری توصیه فوق، بجز در مورد نیروهای محوری، نتایج مربوط به سایر نیروهای داخلی در جهت اطمینان است.

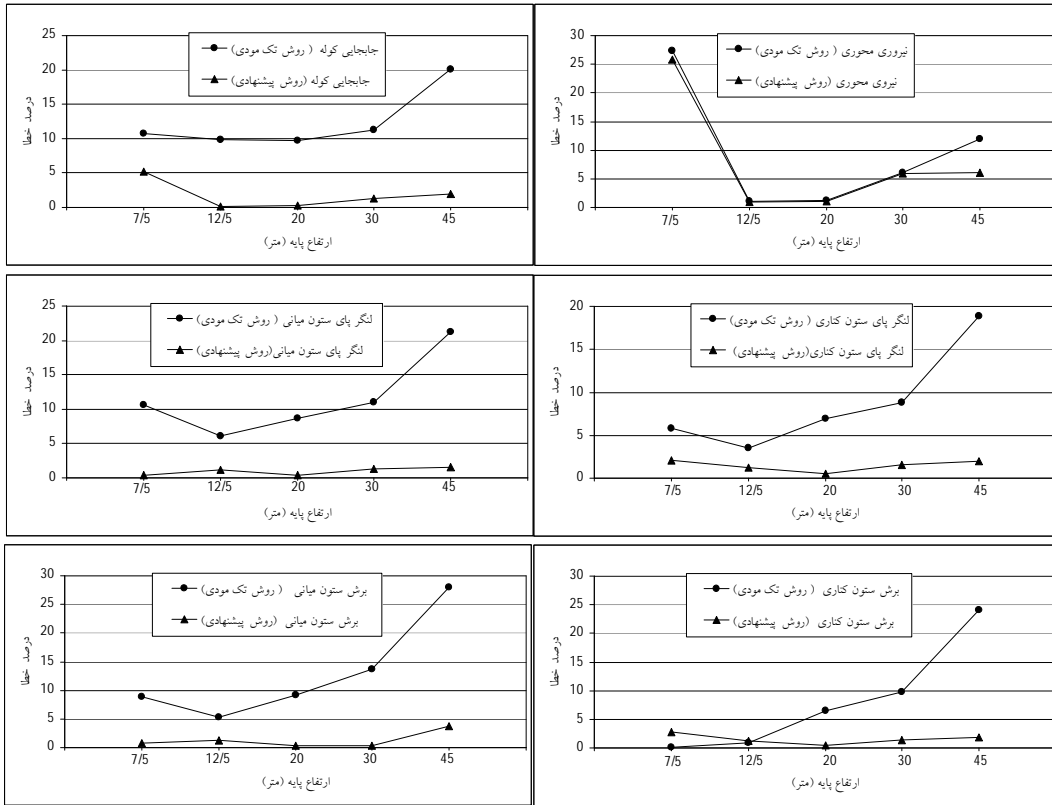
جدول ۵-الف. مقدار پریرود محاسبه شده در جهت طولی و میزان خطای آن نسبت به نتایج آنالیز مودال

جهت طولی							
پریرود (ثانیه)	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر
	پایه ۵ متر	پایه ۷/۵ متر	پایه ۱۲/۵ متر	پایه ۲۰ متر	پایه ۳۰ متر	پایه ۴۵ متر	پایه ۴۵ متر
مقدار دقیق (آنالیز مودال)	۰/۲۵۱	۰/۳۹۳۹	۰/۸۲۴۶	۱/۶۶۴۹	۲/۴۱۴۶	۳/۳۹۹۴	۳/۳۹۹۴
روش تک مودی	۰/۱۹۳۸	۰/۳۵۷	۰/۷۷۰۹	۱/۵۷۶	۲/۲۳۶۹	۳/۰۳۱۶	۳/۰۳۱۶
روش تک مودی اصلاح شده	۰/۲۲۹۳	۰/۳۹۸۷	۰/۸۳۱۴	۱/۶۸۸	۲/۴۵۶	۳/۴۸۴۱	۳/۴۸۴۱
خطای محاسبه پریرود به (%)	روش تک مودی	۲۲/۸	۹/۴	۶/۵	۵/۳	۷/۴	۱۰/۸
	روش تک مودی اصلاح شده	۸/۶	۱/۲	۰/۸	۱/۴	۱/۷	۲/۵

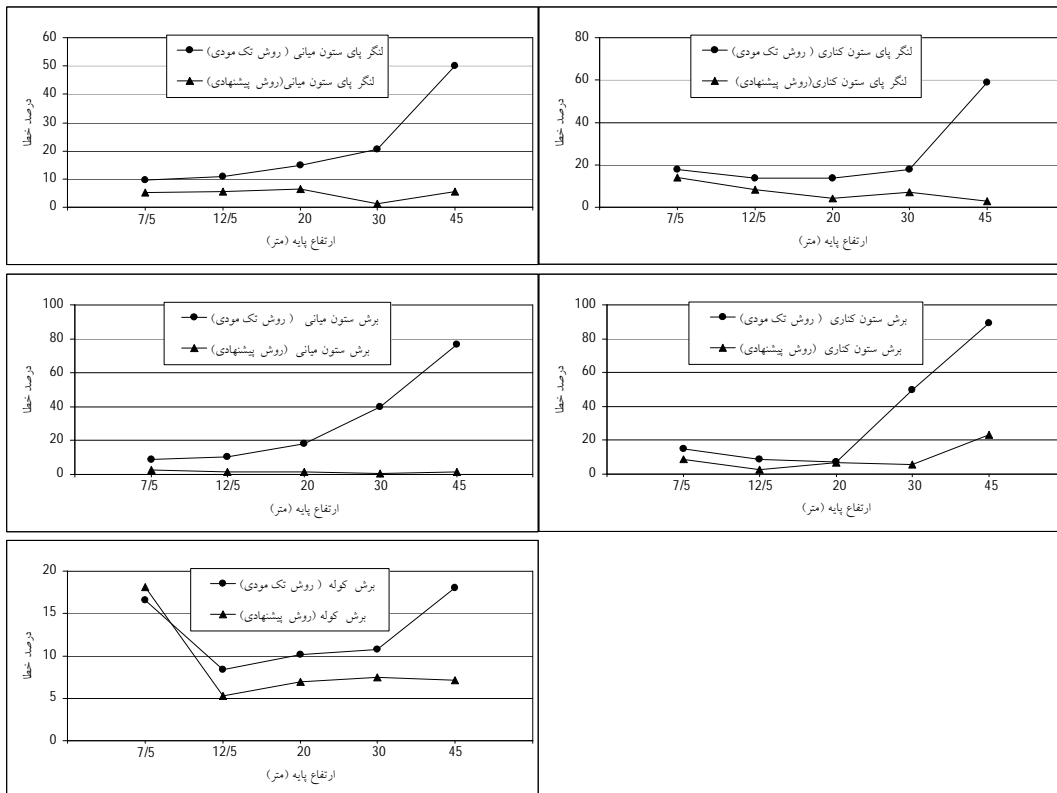
جدول ۵-ب. مقدار پریرود محاسبه شده در جهت عرضی و میزان خطای آن نسبت به نتایج آنالیز مودال

جهت عرضی							
پریرود (ثانیه)	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر	دهانه ۲۵ متر
	پایه ۵ متر	پایه ۷/۵ متر	پایه ۱۲/۵ متر	پایه ۲۰ متر	پایه ۳۰ متر	پایه ۴۵ متر	پایه ۴۵ متر
مقدار دقیق (آنالیز مودال)	۰/۱۶۳	۰/۲۶۰۷	۰/۴۷۰۷	۰/۶۷۷۳	۰/۷۷۶۱	۰/۸۴۹۸	۰/۸۴۹۸
روش تک مودی	۰/۱۵۱۲	۰/۲۴۴۹	۰/۴۳۵۸	۰/۶۱۶۸	۰/۷۰۴۸	۰/۷۶۲۷	۰/۷۶۲۷
روش تک مودی اصلاح شده	۰/۱۵۲۳	۰/۲۴۸	۰/۴۴۴۸	۰/۶۳۶۷	۰/۷۴۲۳	۰/۸۲۹۶	۰/۸۲۹۶
خطای محاسبه پریرود به (%)	روش تک مودی	۷/۲	۶/۱	۷/۴	۸/۹	۹/۲	۱۰/۳
	روش تک مودی اصلاح شده	۶/۵	۴/۹	۵/۵	۵/۹	۴/۴	۲/۴

فلاح، پورزیلی و کریمی



شکل 7- الف. خطای روش تک مودی اصلاح شده و روش تک مودی آیین نامه آشتودر تعیین نیروهای داخلی در مقایسه با روش طیفی - جهت طولی



شکل 7- ب. خطای روش تک مودی اصلاح شده و روش تک مودی آیین نامه آشتودر تعیین نیروهای داخلی در مقایسه با روش طیفی - جهت عرضی

۵. نتیجه‌گیری

از راستای عرضی است، به طوری که در جهت طولی پل‌های کوتاه‌تر و بلندتر از آن میزان خطای بیشتری را نشان می‌دهند. نسبت ارتفاع پایه به طول دهانه در این نمونه برابر ۰/۵ است. این نسبت با توجه به افزایش خطاها در دو سمت آن، می‌تواند به‌عنوان مبنا و معیاری جهت تقسیم‌بندی پل‌ها در نظر گرفته شود.

۵- خطای کم در نتایج تحلیل انجام یافته با روش تک مودی اصلاح شده، نشان دهنده اهمیت نقش چگونگی توزیع نیروهای اینرسی و همچنین اهمیت در نظر گرفتن جرم پایه‌ها در رفتار لرزه‌ای پل‌های مورد بررسی است.

اگرچه روش تک مودی اصلاح شده در تحلیل پل‌های نمونه عملکرد بسیار مناسبی در ارائه نتایج دقیق داشت اما با این حال پیش از بکارگیری عملی آن مناسب است با استفاده از پل‌های نمونه دیگر، توانایی روش همچنان مورد ارزیابی قرار گیرد.

۶. مراجع

۱- مقدم، حسن (۱۳۸۲) "مهندسی زلزله- مبانی و کاربرد"، تهران: انتشارات فراهنگ.

2. AASHTO (2002) "Standard specification for highway bridges", Adopted and published by the American Association of State Highway & Transportation Officials, Inc. 17th. Edition, Washington.

3. Applied Technology Council (1983) "Seismic retrofitting guidelines for highway bridges (ATC-6-2)", Report FHWA/RD-83/007. Springfield (VA): Applied Technology Council (ATC).

4. AASHTO (1998) "Load and resistance factor design (LRFD) specifications for highway bridges". Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

5. AASHTO (1992) "Standard specifications for highway bridges". Washington, D. C., American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO).

6. SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, 2004, User Manual, Ver 9.0.1, Berkley, California.

۷. کریمی، حسین (۱۳۸۲) "بررسی مقایسه‌ای آیین‌نامه‌های معتبر در طراحی لرزه‌ای پل‌های بتنی پیش‌تینده اجرا شده به روش طره آزاد"، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر نصرت ا. فلاح و دکتر سعید پورزینلی، دانشگاه گیلان.

با توجه به اهمیت مطالعه رفتار پل‌ها در برابر انواع بارهای وارده به ویژه زلزله، در این پژوهش تأثیر ارتفاع پایه پل بر دقت روش تک مودی آیین‌نامه آشتو در تحلیل لرزه‌ای پل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل استاتیکی معادل (به روش تک مودی) و تحلیل دینامیکی (به روش چند مودی) برای پل‌های نمونه انجام و نتایج حاصل مقایسه شدند. با توجه به خطای قابل توجه روش تک مودی در پیش‌بینی نیروهای داخلی در پل‌ها با پایه‌های مرتفع، به منظور افزایش دقت آن پیشنهاداتی برای اصلاح روش ارائه شده است. در روش اصلاح شده با سهم کردن پایه‌ها در شکل‌دهی رفتار کلی سازه پل، جرم پایه‌ها نیز در محاسبات در نظر گرفته شده است. در این ارتباط، در هنگام محاسبه نیروی معادل زلزله، نیروهای اینرسی ناشی از جرم پایه‌ها به صورت مجزا و برای هر پایه با توجه به درصدی از جرم آن محاسبه و در راستای مورد نظر به پایه‌ها اعمال شده‌اند. همچنین در محاسبه پیروید ارتعاشی پل، نیروهای جانبی هم به عرشه پل و هم به تمامی پایه‌ها اعمال شده‌اند. در زیر مهم‌ترین مشاهدات و نتایج به دست آمده ارائه می‌شوند:

۱- دقت روش تک مودی آیین‌نامه آشتو با افزایش ارتفاع پایه‌ها، کاهش یافته و میزان خطای آن قابل توجه است.

۲- روش تک مودی در برآورد نیروهای داخلی به ویژه نیروی محوری ستون‌ها و بخصوص در پل‌های کوتاه، از دقت مناسبی برخوردار نیست. در این گونه پل‌ها، به جهت این که نسبت طول دهانه به ارتفاع پایه زیاد است، مودهای ارتعاشی قائم تأثیرگذار شده و سبب می‌شوند تمامی وزن روسازه در راستای مورد نظر بخصوص جهت طولی ارتعاش نکند. در نتیجه، منظور کردن وزن کامل روسازه و زیرسازه در محاسبه نیروهای اینرسی موجب بروز خطا می‌شود.

۳- عدم تغییر قابل ملاحظه خطا در تخمین پیروید پل‌های مرتفع و همچنین عدم تفاوت محسوس خطاها در دو راستای طولی و عرضی، نشانگر نقش مهم و مؤثر چگونگی توزیع نیروهای اینرسی و همین‌طور نقش جرم پایه‌ها در مدلسازی رفتار لرزه‌ای پل‌ها و ایجاد نیروهای اینرسی است.

۴- نتایج تحلیل مربوط به پل نمونه با ارتفاع پایه ۱۲/۵ متر در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، تقریباً در اکثر پاسخ‌ها کمترین میزان خطا را نشان می‌دهد. این مسئله در راستای طولی بسیار واضح‌تر