Archive of SID

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، پیشنهاداتی 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 کشورها 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، پریودهای 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،

*تاریخ دریافت:۸۶/۹/۱۹ – تاریخ پذیرش: ۸۷/۳/۱۱

www.SID.ir

Archive of SID

ضـوابط آیـین‌نامـه‌ای خـالی از نقـص و ضـعف نیـستند. در نسخه۲۰۰۲ آیین‌نامـه آشـتو(AASHTO) [۲] چهـار نـوع روش تحلیل لرزه‌ای برای پل‌ها معرفی شده است که روش تک مـودی از جمله این روش‌ها بوده کـه در آن بـر مبنـای روش اسـتاتیکی معادل، به محاسبه نیروی زلزله اقدام می‌شود. در انتخاب هر یـک از روش‌های چهارگانه فوق، ارتفاع پایه‌ها به عنـوان یـک عامـل مؤثر مورد توجه نیست. از آنجا که آیین‌نامه پل ایران نیز اقتباسـی از روش تک مودی آشتوست، بررسی و مطالعه نقاط ضعف ایـن روش در تحلیل لرزه‌ای پل‌ها ضروری به نظر مـی‌رسـد. در ایـن مقاله، تأثیر ارتفاع پایه‌های پل بر دقـت روش تـک مـودی آشـتو مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با نشان دادن ناتوانی روش تک مودی در برآورد دقیق نیروهـای داخلـی، پیـشنهاداتی بـرای اصـلاح و توسعه این روش ارائه می‌شود.

۲. آیین‌نامه آشتو و روش تحلیل تک مودی

در امریکا، تا قبل از ۱۹۷۱ طراحـی لـرزه‌ای پـل‌هـا مبتنـی بـر بکارگیری روش استاتیکی معادل بوده است. بعد از زلزلـه ۱۹۷۱ سـان فرنانـدو، اداره حمـل و نقـل کالیفرنیـا (CALTRANS) راهنمای طرح لرزه‌ای جدیدی را منتشر کرد. در این راهنما، سـه متغییر اساسی در تعیین نیـروهـای لـرزه‌ای پـل‌هـا مـورد توجـه بوده است. فاصله پل تا گسل فعال، خواص زمین شناسـی خـاک محل پل و رفتار دینامیکی پل در مقابل بارهای مشخص. در سال ۱۹۷۵ آیـین‌نامـه آشـتو بـا اصـلاحاتی راهنمـای پیـشنهادی CALTRANS را پـذیرفت. در سـال ۱۹۸۱، نتـایج حاصـل از تحقیقات انجـام یافتـه بـه وسـیله شـورای تکنولـوژی کـاربردی (ATC) منتشرشد. یکی از اهداف مهم این تحقیـق معرفـی یـک روش احتمالاتی برای تعیین زلزلـه طـرح بـوده اسـت. در سـال ۱۹۸۳، گزارش معروف ATC-6 به وسـیله آشـتو تحـت عنـوان راهنمای مشخصات طراحـی پذیرفتـه شـد[۳] . ایـن راهنمـا، بـا اصلاحاتی محدود از سال ۱۹۹۲ به عنـوان بخـشی از اسـتاندارد آشـتو قـرار گرفـت، بـه طـوری کـه محتـوای آخـرین ویـرایش دستورالعمل آشتو در طرح لرزه‌ای به‌روشLRFD [٤] مبتنی بـر استاندارد ۱۹۹۲ آیین‌نامه آشتو است [٥].

بخش لـرزه‌ای آیـین‌نامـه ۲۰۰۲ آشـتو [۲]، ضـوابط طراحـی و ساخت پل‌ها را برای به حداقل رساندن آسـیب‌پـذیری آنهـا در برابر زلزله فراهم می‌کند. تعیـین نیروهـای طراحـی زلزلـه طبـق ضوابط آشتو بر ایـن اسـاس اسـتوار اسـت کـه احتمـال وقـوع نیروهایی بزرگ‌تر از نیروهای طراحی در مدت عمر مفید پل کم خواهد بود. پل‌ها و اجزای آن که بـرای مقاومـت در برابـر ایـن نیروها طراحی می‌شوند ممکن است به هنگام زلزله دچار آسیب شوند، اما احتمال فرو ریختن آنها کم است. مبنـای قواعـد کلـی این ضوابط عبارتند از:

۱- در برابر زمین لرزه‌های کم تا متوسط، اجزای سـازه در حـد ارتجاعی، مقاومت خود را بدون آسیب قابل ملاحظه‌ای حفظ کنند.

۲. سازه به طور جزئی و کلی از خطـر فـرو ریخـتن بـه هنگـام زلزله‌های قوی در امان باشد. آسـیب‌هـا بایـد بـه راحتـی قابـل شناسایی بوده و برای بازرسی در دسترس بوده و امکـان تـرمیم پل به سهولت عملی باشد.

در این آیین‌نامه، چهار طبقه‌بنـدی لـرزه‌ای بـر حـسب موقعیـت مکانی پل و درجه اهمیت پل تعریف شده است.

۲-۱ 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 ذیـل معرفـی می‌شوند.

۲-۱-۱ ضریب شتاب پایه

ضریب شتاب پایه A از نقشه خطوط هم شتاب که توسـط ایـن آیین‌نامه ارائه شده است، بـه دسـت مـی‌آیـد. ضـرایب در ایـن شکل‌ها به طور درصد درج شده است.

۲-۱-۲ درجه اهمیت پل

به منظور تعیین طبقه‌بندی لرزه‌ای، برای تمامی پـل‌هـایی کـه در محلـی بـا ضـریب شـتاب بـزرگ‌تـر از ۲۹/. احـداث می‌شوند، درجه اهمیت پل مورد نیاز است. پـل‌هـا بـر اسـاس کارکرد اجتماعی، امدادی، امنیتی و دفاعی آنها از نظر اهمیت بـه دو درجه تقسیم می‌شوند:

۱- پل‌های مهم، IC=I

۲- پل‌های دیگر، IC=II

۲-۱-۳ طبقه‌بندی لرزه‌ای

هر پل به یکی از چهار طبقه لرزه‌ای A تا D تعلـق دارد کـه بـا توجه به ضریب شـتاب پایـه A و درجـه اهمیـت آن مـشخص

www.SID.ir

Archive of SID

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

۲-۱-٤ 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 تیپ 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:

$$C_s = \frac{1/2\ AS}{T^{\frac{2}{3}}} \qquad (۱)$$

که درآن :

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

جدول 1. حداقل ضوابط تحلیل

پلهای نامنظم با ۲ دهانه و یا بیشتر	پلهای منظم با ۲ الی ٦ 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 2. ویژگی‌های پل منظم

تعداد دهانه	2	3	4	5	6
بیشترین زاویه متمایل به قوس (پل قوس) بر حسب درجه	90	90	90	90	90
بیشترین نسبت طول دهانه ها به یکدیگر	3	2	2	1/5	1/5
بیشترین نسبت سختی پایه ها (یا ستونها) از یک دهانه تا دهانه دیگر (بدون احتساب کوله‌ها)	–	4	4	3	2

۲-۱ انتخاب روش تحلیل

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

۱- روش بار یکنواخت

۲- روش تک مودی

۳- روش چند مودی

٤- 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 نا منظم بودن پل و همچنین طبقه‌بندی لرزه‌ای آن انجام می‌شود. پل‌های منظم کمتر از ۷ دهانه دارند و نیز دارای تغییرات ناگهانی ویا 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 ارایه 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 لرزه‌ایB, 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.

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

www.SID.ir

Archive of SID

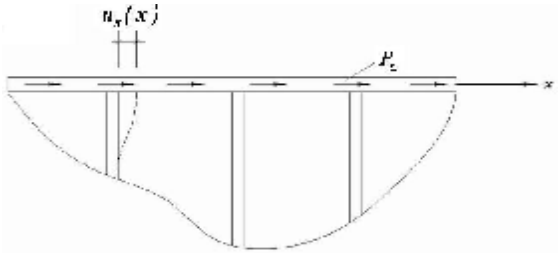
استفاده قرار می‌گیرد.

گام۱- ابتدا تغییر مکان‌های استاتیک $u_s(x)$ ناشی از یک بار یکنواخت فرضی P_o که در شکل۱ 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.

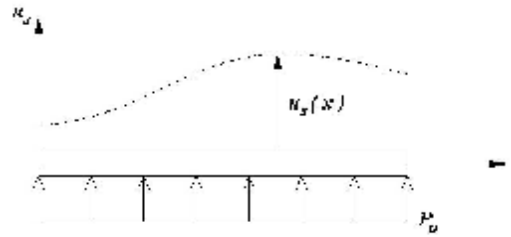
گام ۲- محاسبه ضرایب α، β و γ از طریق روابط زیر :

$$\alpha = \int u_s(x)dx \qquad (۲)$$

$$\beta = \int w(x).u_s(x)dx \qquad (۳)$$



الف) بارگذاری طولی (نمای روبرو)



ب) بارگذاری عرضی (پلان)

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

$$\gamma = \int w(x).u_s(x)^2 dx \qquad (٤)$$

که در آن $w(x)$ وزن واحد طول روسازه پل و زیر سازهٔ 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.

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

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\gamma}{P_o g \alpha}} \qquad (۵)$$

که در آن g شتاب ثقل است.

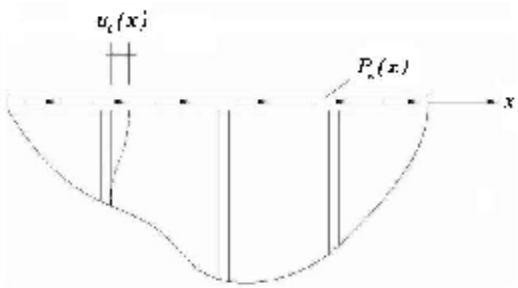
گام ٤- از طریق رابطه زیر بار $P_e(x)$ که معادل استاتیکی بار زلزله می‌باشد، تعیین می‌شود به طوری که :

$$P_e(x) = \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x).u_s(x) \qquad (٦)$$

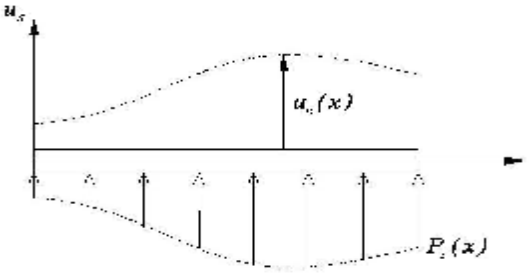
که در آن C_s ضریب بی‌بعد ارتجاعی زلزله است که از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$P_e(x)$ = 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

www.SID.ir

Archive of SID

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع پایه‌های پـل در میـزان دقـت روش تک مودی آیین‌نامه آشتو در ارزیابی نیروهـای داخلـی پایـه‌هـا و همچنین جابجایی‌ها از ٦ پل نمونه ٤ دهانه با مشخصات سازه‌ای ارائه شده در جدول ۳ استفاده شده اسـت. نمونـه‌هـا بـر اسـاس روش تک مودی آیین‌نامه آشتو و با فرض‌های زیر مـورد تحلیـل لرزه‌ای قرار گرفتند:

الف) ضریب شتاب طرح برابر ۰/٤ است (A=۰/٤)

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

ج) جنس خاک محل از نوع ۲ در نظر گرفته می‌شود (S=۱/۲)

بـرای تحلیـل‌هـای دینـامیکی بـه صـورت طیفـی از نـرم افـزار SAP2000 (Version 9.0.1) استفاده شده است. این نرم افـزار که به گزینه‌های تخصصی در تحلیل و طراحی انواع پل‌ها اعم از بتن آرمه، بتن پیش‌تنیده و فولادی مجهز شده است، نرم افـزاری قدرتمند در زمینه تحلیل استاتیکی و دینامیکی پل‌هاسـت [٦]. در این مطالعه، نتایج تحلیل طیفـی کـه بـا در نظـر گـرفتن ۲۵ مـود ارتعاشی انجام گرفته است، به عنوان جواب دقیق و معیاری برای ارزیابی دیگر روش‌های ارائـه شـده در آیـین‌نامـه آشـتو، مـورد استفاده قرار گرفته است [۷]. بررسی‌های جداگانه نـشان داده‌انـد که نتایج تحلیل طیفی فوق با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی تحـت زلزله مصنوعی منطبق بر طیف طراحی تطابق بسیار مناسبی دارند.

برشی ایجاد شده در کوله‌هـا و همچنـین جابجـایی ارتجـاعی در جهت طولی، با انجام تحلیل به روش تک مودی اسـتخراج و بـا مقادیر نظیر به دست آمده از روش تحلیل طیفی مقایسه شده‌انـد. سپس میزان خطای روش تک مودی در هر مورد محاسبه شده و نتایج مربوطه در دو راستای طولی و عرضی در شکل‌هـای ۳ و ٤ نشان داده شده‌اند.

نمودارهای فوق نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع پـل‌هـا میـزان خطای روش تک مودی برای تمـامی‌نیروهـا بـه صـورت تقریبـاً هماهنگی افـزایش مـی‌یابـد و بنـابراین از کـارآیی آن در تحلیـل پل‌های مرتفع، به شدت کاسته می‌شود. در پل‌های بـا ارتفـاع ٤۵ متر این خطا در راستای عرضی حتـی بـه ۷۰ تـا ۸۰ درصـد نیـز رسیده است.

مطالعه منشأ این خطاها در فرآیند تحلیل می‌تواند موجب اصـلاح روش‌های تحلیل برای دستیابی به پاسخ‌هـای دقیـق‌تـر شـود. در مـورد خطاهـای روش تـک مـودی آشـتو کـه جـزء روش‌هـای استاتیکی معادل محسوب می‌شود، علل بروز خطا را مـی‌بایـست در دو مرحله بسیار مهم جـستجو کـرد. مرحلـه نخـست، مرحلـه تخمین پریود ارتعاشی سازه است که دقت آن با توجه بـه میـزان ساده سازی‌های صورت گرفته و دقت فرضـیات متفـاوت اسـت. مرحله دوم نیز چگونگی توزیع و اعمال نیروهای زلزله است کـه مستقیماً بر دقت نتایج مؤثر است.

جدول۳. مشخصات پل‌های نمونه

	تعداد دهانه	طول دهانه (متر)	ارتفاع پایه (متر)	سطح مقطع عرشه (متر مربع)	ممان اینرسی عرشه حول محور عرضی (متر مکعب)	ممان اینرسی عرشه حول محور قائم (متر مکعب)	سطح مقطع پایه‌ها (متر مربع)	ممان اینرسی پایه در جهت طولی (متر مکعب)	ممان اینرسی پایه در جهت عرضی (متر مکعب)
نمونه ۱	٤	۲۵	۵	۵/۷٦۵	۱/۲۱۸۵	٤٦/۹۷۳	۲/۵	۰/۲۰۸۳	۱/۳۰۲۱
نمونه ۲	٤	۲۵	۷/۵	۵/۷٦۵	۱/۲۱۸۵	٤٦/۹۷۳	۲/۵	۰/۲۰۸۳	۱/۳۰۲۱
نمونه ۳	٤	۲۵	۱۲/۵	۵/۷٦۵	۱/۲۱۸۵	٤٦/۹۷۳	۲/۵	۰/۲۰۸۳	۱/۳۰۲۱
نمونه ٤	٤	۲۵	۲۰	۵/۷٦۵	۱/۲۱۸۵	٤٦/۹۷۳	۲/۵	۰/۲۰۸۳	۱/۳۰۲۱
نمونه ۵	٤	۲۵	۳۰	۵/۷٦۵	۱/۲۱۸۵	٤٦/۹۷۳	۳	۰/۳٦	۱/۵٦۲۵
نمونه ٦	٤	۲۵	٤۵	۵/۷٦۵	۱/۲۱۸۵	٤٦/۹۷۳	۳/۷۵	۰/۷۰۳	۱/۹۵۳

پاسخ‌های مهم سازه‌ای که در طراحی مورد نیاز هـستند، از قبیـل نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمـشی سـتون‌هـا، نیـروی برای مشخص کردن سهم هر یـک از عوامـل فـوق الـذکر، ابتـدا پریود ارتعاشی پل‌های نمونه در جهات طولی و عرضی بر اساس

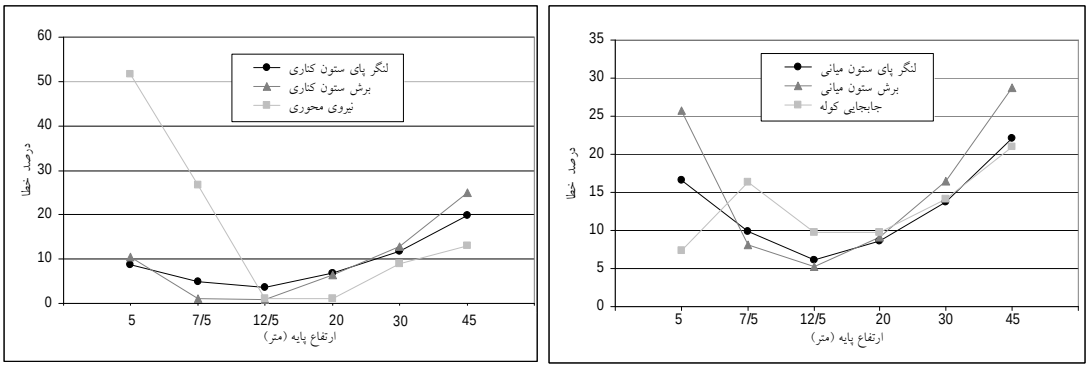
www.SID.ir

Archive of SID

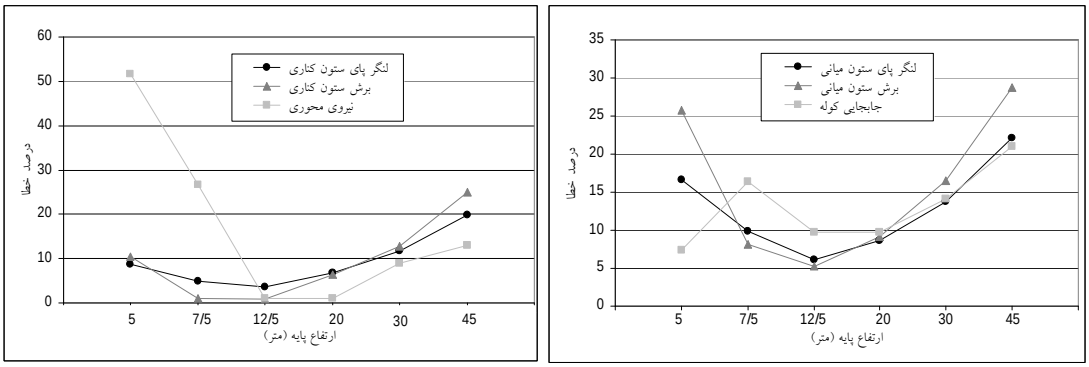
روش آنالیز مودال محاسبه شده و مقادیر به دست آمده با مقـادیر حاصل از رابطه ۵ مقایسه شده است. پریودهای ارتعاشی محاسبه شده در جدول ٤ ارایه شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده و نمودارهای ارائه شـده، بعـضی از علل ایجاد خطا در برآورد نیروهای داخلی قابل استنباط است که به صورت موردی به آنها اشاره می‌شود:

طولی و عرضی مؤیـد نقـش عمـده چگـونگی توزیـع نیروهـای اینرسی در سازه پل است. در پل‌های مرتفع تأثیر پایه‌ها در مقـدار نیروهای اینرسی، به علت جرم زیاد آنها، تعیین کننده اسـت. ایـن در حالی است که در شیوه تحلیل تک مـودی نیروهـای ناشـی از زلزله تنها به عرشه پل وارد می‌شود به طوری کـه پایـه‌هـا نقـش چندانی ندارند.



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 ۲۵متر پایه ۵ متر	دهانه ۲۵متر پایه ۷/۵ متر	دهانه ۲۵متر پایه ۱۲/۵ متر	دهانه ۲۵متر پایه ۲۰ متر	دهانه ۲۵متر پایه ۳۰ متر	دهانه ۲۵متر پایه ٤۵ متر
جهت طولی						
مقدار دقیق (آنالیز مودال)	۰/۲۵۱	۰/۳۹۳۹	۰/۸۲٤٦	۱/٦٦٤۹	۲/٤۱٤٦	۳/۳۹۹٤
مقدار محاسبه شده	۰/۱۹۳۸	۰/۳۵۷	۰/۷۷۰۹	۱/۵۷٦	۲/۲۳٦۹	۳/۰۳۱٦
خطا (٪)	۲۲/۸	۹/٤	٦/۵	۵/۳	۷/٤	۱۰/۸
جهت عرضی						
مقدار دقیق (آنالیز مودال)	۰/۱٦۳	۰/۲٦۰۷	۰/٤۷۰۷	۰/٦۷۷۳	۰/۷۷٦۱	۰/۸٤۹۸
مقدار محاسبه شده	۰/۱۵۱۲	۰/۲٤٤۹	۰/٤۳۵۸	۰/٦۱٦۸	۰/۷۰٤۸	۰/۷٦۲۷
خطا (٪)	۷/۲	٦/۱	۷/٤	۸/۹	۹/۲	۱۰/۳

مرتفع و همچنین دقت تقریبـا یکـسان ایـن روش در دو راسـتای ارتفاع ۵ متر)، مشابه با مقدار خطا در برآورد نیروهای داخلـی در

www.SID.ir

Archive of SID

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 از۰/۵ تحریک مودهای ارتعاشی قائم و انعطاف‌پذیری عرشه سبب بروز خطا می‌شود.

٤. 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 آئین نامه آشتو در برآورد نیروهای داخلی حاصل شده است، پیشنهاداتی برای توسعه و اصلاح روش تک مودی ارائه می‌شود. اساس بسط واصلاح 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:

$$\alpha_d = \int_0^{l_d} u_d(x)dx, \qquad (۷)$$

$$\alpha_p = \int_0^{l_p} u_p(z)dz, \qquad (۸)$$

$$\beta_d = \int_0^{l_d} w_d(x).u_d(x)dx, \qquad (۹)$$

$$\beta_p = \int_0^{l_p} w_p(z).u_p(z)dz, \qquad (۱۰)$$

$$\gamma_d = \int_0^{l_d} w_d(x).u_d^2(x)dx, \qquad (۱۱)$$

$$\gamma_p = \int_0^{l_p} w_p(z).u_p^2(z)dz, \qquad (۱۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma_d + \sum_i \gamma_{pi}}{g(P_{od}\alpha_d + \sum_i P_{op}\alpha_{pi})}}\ , \qquad (۱۳)$$

که در آن i برابر تعداد پایه‌های پل است.

5) محاسبه ضریب زلزله

$$C_s = \frac{1/2\ AS}{T^{2/3}} \qquad (۱٤)$$

6) محاسبه نیروهای اینرسی در عرشه و پایه‌ها

$$P_{e_d}(x) = \frac{\beta_d\ .c_s\ .w_d(x).u_d(x)}{\gamma_d} \qquad (۱۵)$$

$$P_{e_p}(x) = \frac{0/27\ \beta_p\ .C_s\ .w'_p(z).u_p(z)}{0/23\ \gamma_p} \qquad (۱٦)$$

(۱۷) وزن مؤثر پایه در راستای طولی

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

(۱۸) وزن مؤثر ستونهای کناری در راستای عرضی

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

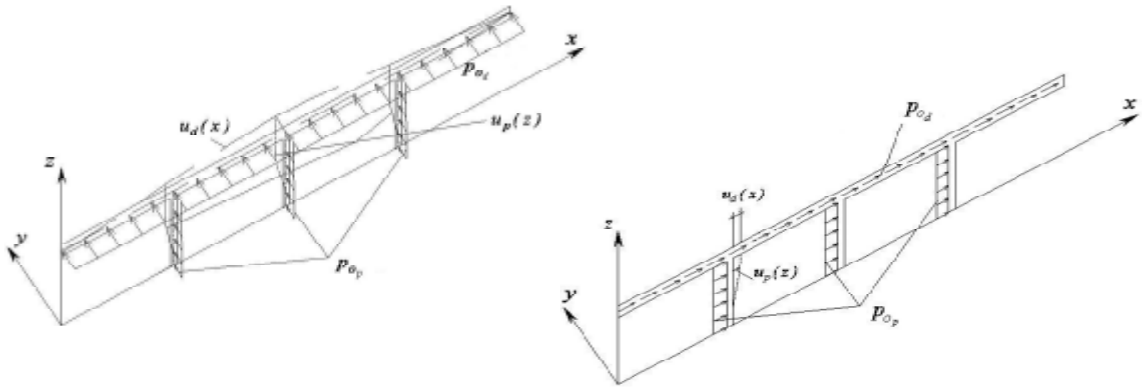
(۱۹) وزن مؤثر ستونهای میانی در راستای عرضی

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

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

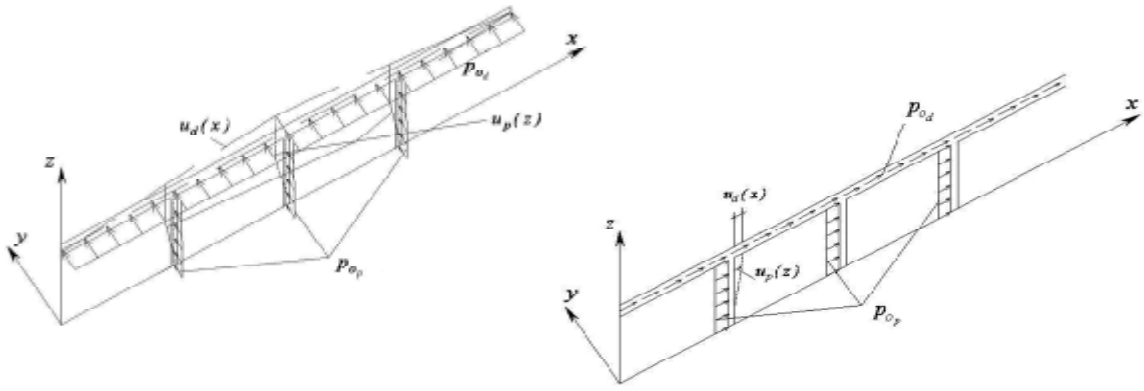
$w_d(x)$: وزن روسازه

7) اعمال نیروهای اینرسی محاسبه شده در بند (٦) مطابق شکل ٦ و محاسبه نیروهای داخلی سازه



الف) جهت طولی ب) جهت عرضی

شکل۵. اعمال بارهای جانبی به عرشه و پایه‌ها جهت برآورد پریودهای ارتعاشی



الف) جهت طولی ب) جهت عرضی

شکل٦. اعمال نیروهای زلزله به عرشه و پایه‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

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 شکل‌های۷- الف و ۷- ب با نتایج روش تک مودی آشتو مقایسه شده‌اند.

نمودارها به روشنی بیانگر کارآیی بسیار خوب روش پیشنهادی هستند: نتایج حاصل از بکارگیری روش پیشنهادی در تعیین نیروهای داخلی و همچنین پریود 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 5- الف. مقدار پریود محاسبه شده در جهت طولی و میزان خطای آن نسبت به نتایج آنالیز مودال

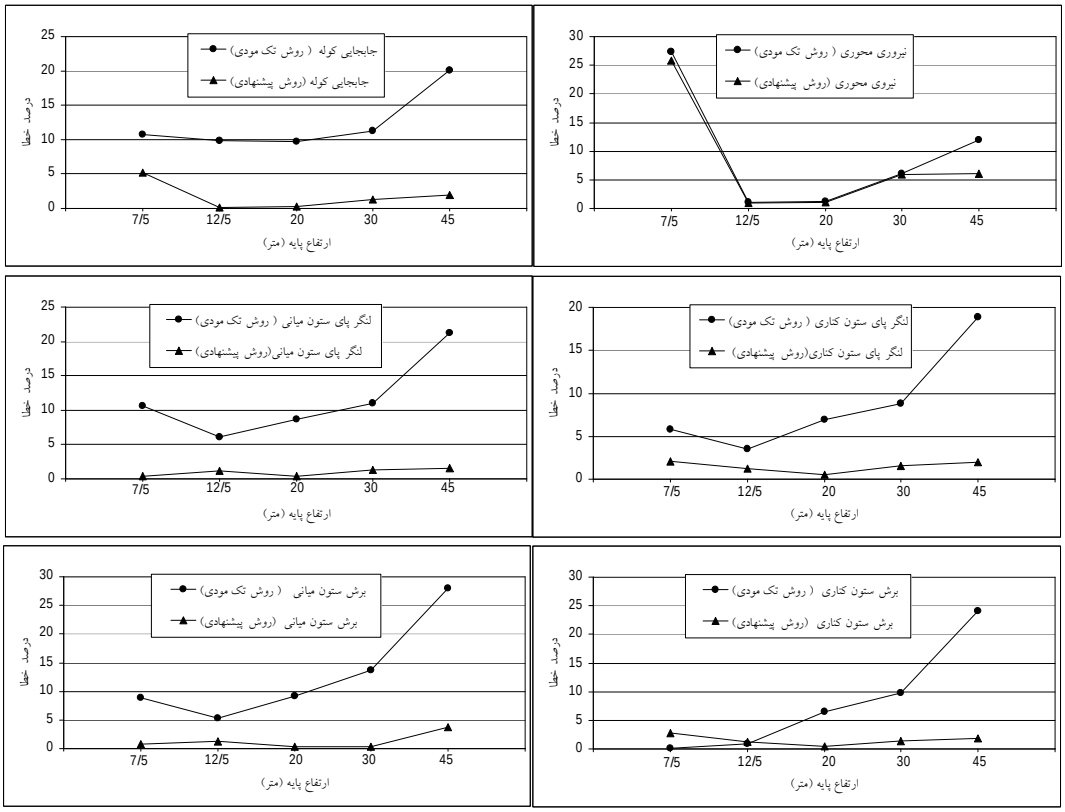
جهت طولی							
پریود (ثانیه)		دهانه ۲۵متر پایه ۵ متر	دهانه ۲۵متر پایه ۷/۵ متر	دهانه ۲۵متر پایه ۱۲/۵ متر	دهانه ۲۵متر پایه ۲۰ متر	دهانه ۲۵متر پایه ۳۰ متر	دهانه ۲۵متر پایه ٤٥ متر
مقدار دقیق (آنالیز مودال)		۰/۲۵۱	۰/۳۹۳۹	۰/۸۲٤٦	۱/٦٦٤۹	۲/٤۱٤٦	۳/۳۹۹٤
روش تک مودی		۰/۱۹۳۸	۰/۳۵۷	۰/۷۷۰۹	۱/۵۷٦	۲/۲۳٦۹	۳/۰۳۱٦
روش تک مودی اصلاح شده		۰/۲۲۹۳	۰/۳۹۸۷	۰/۸۳۱٤	۱/٦۸۸	۲/٤۵٦	۳/٤۸٤۱
خطای محاسبه پریود به (٪)	روش تک مودی	۲۲/۸	۹/٤	٦/۵	۵/۳	۷/٤	۱۰/۸
	روش تک مودی اصلاح شده	8/6	1/2	0/8	1/4	1/7	2/5

جدول 5- ب. مقدار پریود محاسبه شده در جهت عرضی و میزان خطای آن نسبت به نتایج آنالیز مودال

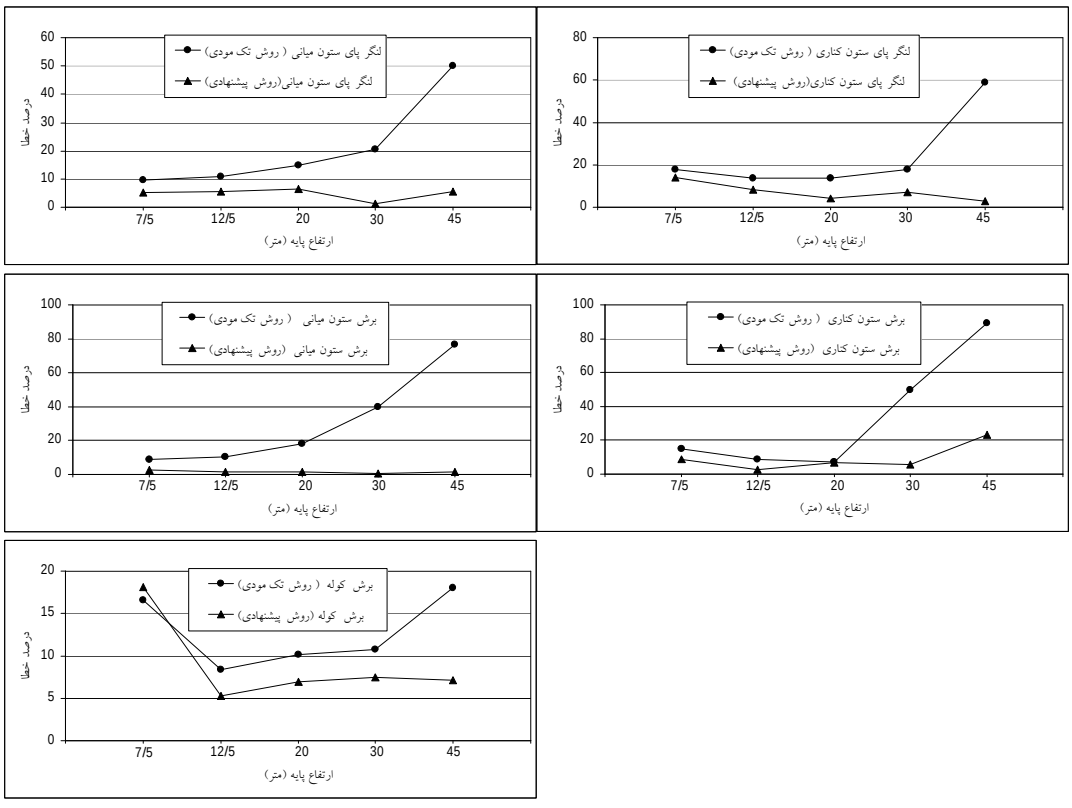
جهت عرضی							
پریود (ثانیه)		دهانه 25متر پایه 5 متر	دهانه 25متر پایه 7/5 متر	دهانه 25متر پایه 12/5 متر	دهانه 25متر پایه 20 متر	دهانه 25متر پایه 30 متر	دهانه 25متر پایه 45 متر
مقدار دقیق (آنالیز مودال)		0/163	0/2607	0/4707	0/6773	0/7761	0/8498
روش تک مودی		0/1512	0/2449	0/4358	0/6168	0/7048	0/7627
روش تک مودی اصلاح شده		0/1523	0/248	0/4448	0/6367	0/7423	0/8296
خطای محاسبه پریود به (٪)	روش تک مودی	7/2	6/1	7/4	8/9	9/2	10/3
	روش تک مودی اصلاح شده	6/5	4/9	5/5	5/9	4/4	2/4

www.SID.ir

Archive of SID



شکل 7- الف. خطای روش تک‌مودی اصلاح شده و روش تک‌مودی آیین‌نامه آشتودر تعیین نیروهای داخلی در مقایسه با روش طیفی- جهت طولی



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

www.SID.ir

Archive of SID

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت مطالعهٔ رفتار پل‌ها در برابر انواع بارهای وارده به ویژه زلزله، در این پژوهش تاثیر 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 سهیم 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 پریود 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:

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

2- 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.

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

4- 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 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 گرفته‌شود.

5- 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.

٦. 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 Sate Highway and Transportation Officials (AASHTO).

5. AASHTO (1992) "Standard specifications for highway bridges". Washington , D. C., American Association of Sate 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 پیش‌تنیدهٔ اجرا شده به روش طرهٔ آزاد"، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر نصرت ا.. فلاح و دکتر سعید پورزینلی، دانشگاه گیلان.

www.SID.ir