

تأثیر نوع اتصال عرشه به پایه در انتقال بارهای ثقیلی و

بهره‌برداری در پل‌های پیوسته پیش‌تنیده بتنی

منصور شریف^{۱*}؛ علیرضا رهایی^۲؛ سامان حجازی^۳

چکیده

در پنجاه سال گذشته استفاده از بتن پیش‌تنیده در اجرای پل‌های پیوسته با مقطع ثابت و متغیر رواج یافته است. یکی از مسائل مهم در طراحی، نحوه اتصال عرشه به پایه است که با استفاده از دستگاه‌های تکیه‌گاهی انجام می‌شود. در حالت استفاده از صفحات نئوپرن، این اتصال به سه صورت ساده با یک ردیف صفحات نشیمن، نیمه‌گیردار با دو ردیف صفحات نشیمن و یکپارچه انجام می‌شود. عملکرد مطلوب در مقابل شرایط محیطی، امکان‌پذیری لغزش و تغییر شکل محدود برای عرشه از خصوصیات مهم صفحات نئوپرن است. در این تحقیق اثر تعداد خطوط تکیه‌گاهی و نحوه اجرای اتصال در انتقال بار، توزیع تنش در پایه‌های پل و نسبت انتقال لنگر خمشی به نیروی محوری مورد بررسی قرار گرفته است. طرح‌های مورد بررسی شامل پل‌های پیوسته چهار دهانه از بتن پیش‌تنیده با دهانه‌های مختلف، به روش عددی اجزاء محدود و توسط تحلیلگر آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. سپس، عملکرد مدل‌ها با شرایط اتصال سه‌گانه با هم مقایسه شده‌اند. تحلیل با فرض رفتار مصالح بتن با پخش ترک در المان‌ها (ایجاد ترک‌های ریز و ایجاد نشدن ترک‌های بزرگ)، عملکرد الاستیک نئوپرن و الاستیک-پلاستیک کامل برای فولاد آرماتورها و فولاد پیش‌تنیدگی انجام شده است و در هر مدل، شرایط انتقال نیرو به تکیه‌گاه بررسی شده است. تحلیل نتایج نقش بسیار موثر فاصله بین دو ردیف صفحات تکیه‌گاهی، در مقایسه با تغییر در ضخامت این صفحات را تصریح می‌نماید. همچنین اثرات طراحی ناکافی و غیراقتصادی زیرسازه در فرایند انتقال بار نیز مورد بررسی گرفته است.

کلمات کلیدی

صفحه نئوپرن، اتصال ساده، اتصال نیمه‌گیردار، اتصال یکپارچه

Effect of Connection's Type on The Transferring of Dead and Live Loads for Prestressed Concrete Bridges

Mansour Sharif; Alireza Rahai and Saman Hedjazi

ABSTRACT

On recent fifty years, using pre-stressed concrete for construction of continuous bridges with constant or variable cross section has a large spread. One of important objects in design is the way of connecting deck to piers that is done mostly by means of bearings. In the case of using neoprene bearings, There are three kinds of deck-pier connection; Simple, semi-rigid and rigid connections. Desired performance against environmental conditions, possibility of sliding, and finite movement of deck are of important properties for neoprene bearings. Bearing lines' number and the effect of connection construction in load transferring, stress distribution in bridge piers and the ratio of bending moment to axial force transferred, are surveying in this research. Models, contain four spans continuous pre-stressed concrete bridges with various span lengths, and are analyzed by Finite Element Method and using ABAQUS analyzer. After analysis performance, models

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۳/۲۴

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۹/۱۶

^۱ نویسنده مسئول و کارشناس ارشد عمران؛ دانشکده عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ mansoursharif@aut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ rahai@aut.ac.ir

^۳ دکترای عمران؛ دانشکده عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ sam_hedjazi@yahoo.com

with different kinds of connection are compared. With assuming smeared crack performance for concrete, elastic for neoprene and elastic-perfect plastic for steel, analysis is done and for each model, load transfer is surveyed. Results of analysis show the effective role of distance variation of two rows of bearings, in comparison with their thickness effect. In addition, analysis results insist on optimum design for bearings, to have a safe and controlled load transfer.

KEYWORDS

Neoprene, Simple connection, Semi rigid connection, continuous connection

طبیعی یا نئوپرن ساخته می‌شوند. به طور معمول این نوع صفحات تکیه‌گاهی با صفحات فولادی مسلح می‌شوند که باعث جلوگیری از تورم ناشی از بارهای فشاری می‌شود. آسیب در این نوع تکیه‌گاه بیشتر در اثر فرسایش اصطکاکی و شکم‌دادگی و تورم، یا در اثر عدم تسلیح مناسب و یا در اثر طراحی نامناسب و در نظر گرفتن ضخامت بزرگ در برابر سطح مقطع کوچک صورت می‌گیرد. همانگونه که مشخص است با قرار دادن صفحات محافظ برای تکیه‌گاه الاستومریک و طراحی مناسب ابعاد و مسلح نمودن تکیه‌گاه، می‌توان به سادگی از آسیب‌های محتمل برای این نوع دستگاه جلوگیری نمود. همچنین برای اصلاح رفتار تکیه‌گاه‌های الاستومریک از تعبیه یک هسته سربی در مرکز آن استفاده می‌شود [تونیاس، ۲۰۰۷]، [رهای و فیروزی، ۱۳۸۴]، [جانجید، ۲۰۰۷].

مجموعه امتیازها و خصوصیات تکیه‌گاه‌های الاستومریک، استفاده از آن را برای طراحان و سازندگان پل‌ها بسیار مطلوب نموده و لزوم بررسی عملکرد آن و اتصال شامل این نوع دستگاه تکیه‌گاهی را آشکار می‌سازد.

۲- مدل‌های مطالعاتی

برای بررسی شرایط اتصال عرشه به پایه، در مطالعه حاضر پنج نوع مدل انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مدل اول با شرایط تکیه‌گاهی ساده، مدل دوم با شرایط تکیه‌گاهی یکپارچه و سه مدل با شرایط تکیه‌گاهی نیمه‌گیردار در محل پایه-ها هستند. عرشه پل‌های مورد بحث از بتن مسلح و پیش‌تنیده بوده و با مقطع صفحه‌ای توپر در نظر گرفته شده است. مقطع عرشه متغیر بوده و در محل تکیه‌گاه‌ها دارای بیش‌ترین ضخامت و در میانه دهانه کم‌ترین مقدار ضخامت است. در مدل با شرایط تکیه‌گاهی یکپارچه، از اتصال پیوسته عرشه و پایه استفاده شده است. برای ایجاد تکیه‌گاه ساده بر روی پایه‌ها، یک ردیف صفحه تکیه‌گاهی نئوپرن روی سرستون موجود در روی پایه‌ها پیش-بینی شده که عرشه روی این صفحات قرار می‌گیرد. در مدل‌های با شرایط تکیه‌گاهی نیمه‌گیردار نیز از همین روش استفاده شده با این تفاوت که از دو خط صفحات تکیه‌گاهی نئوپرن به کار گرفته می‌شود. تفاوت میان سه مدل با شرایط اتصال نیمه صلب، در فاصله دو ردیف صفحات تکیه‌گاهی و سختی این صفحات

۱- مقدمه

در پل‌های پیش‌تنیده بتنی در صورت اجرای عرشه و پایه به صورت غیر یکپارچه، از دستگاه‌های تکیه‌گاهی استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها در دو نوع ثابت و متحرک ساخته می‌شوند. تکیه‌گاه‌های نوع اول فقط به عرشه اجازه دوران می‌دهند و دستگاه‌های تکیه‌گاهی نوع دوم علاوه بر دوران، تغییر مکان عرشه را نیز ممکن می‌سازند [تونیاس، ۲۰۰۷]. انواع مختلفی از دستگاه‌های تکیه‌گاهی در پل‌ها به کار گرفته می‌شوند. نوع گهواره‌ای عملکردی مفصلی داشته و در هر دو نوع ثابت و گهواره‌ای ساخته می‌شود. نوع غلتکی نیز عملکردی مانند دستگاه‌های تکیه‌گاهی گهواره‌ای داشته و به صورت مفصلی عمل نموده و جزء دستگاه‌های تکیه‌گاهی متحرک به شمار می‌رود. بیش‌ترین ضعف دستگاه‌های تکیه‌گاهی گهواره‌ای و غلتکی در برابر عوامل محیطی است. این دو نوع تکیه‌گاه که از فولاد ساخته می‌شوند، به شدت مستعد جذب گرد و غبار بوده که در فصل سرما با جذب رطوبت محیط و در نتیجه یخ‌زدگی و زنگ‌زدگی، دچار آسیب‌های جدی می‌شوند. این دو نوع دستگاه‌های تکیه‌گاهی در برابر بارهای لرزه‌ای خاصیت جداسازی دارند [تونیاس، ۲۰۰۷]، [تسای، ۲۰۰۴]. نوع دیگر دستگاه‌های تکیه‌گاهی، صفحات لغزان است که بیش‌تر برای پل‌های با دهانه‌های کوچک استفاده قرار می‌شود و از فولاد، تفلون یا برنز ساخته می‌شود. علاوه بر معایبی که در مورد دو نوع قبل گفته شد، این وسایل در اثر سربار قائم آسیب دیده و در صورت به‌کار رفتن در پل‌هایی با دهانه‌های بیش از ۱۵ متر دچار شکست زود هنگام می‌شود [صادق وزیری و یزدانی مطلق، ۲۰۰۸]. نوع دیگر تکیه‌گاه کاسه‌ای است. این دستگاه تکیه‌گاهی شامل یک استوانه یا کاسه کم عمق و یک دیسک نئوپرن است. این تکیه‌گاه برای تحمل بارهای بسیار بزرگ مناسب است اما کیفیت المان‌های زیرین این نوع تکیه‌گاه بسیار حساس است. در این نوع تکیه‌گاه در اثر بارهای ترافیکی، تغییر مکان‌های پلاستیک در تکیه‌گاه و پایه ایجاد شده و دستگاه تکیه‌گاهی نیز در شرایط خستگی قرار می‌گیرد. همچنین رفتار این نوع دستگاه تکیه‌گاهی در زمان تحریک لرزه‌ای پایه، در جهت طولی پل مطلوب نیست [هو و کبیس، ۲۰۰۶] [دیکلی، ۲۰۰۲]. دستگاه‌های تکیه‌گاهی الاستومریک از کائوچوی

بار بهره‌برداری اعمال شده به این سازه، بار بهره‌برداری نوع اول یا بار عادی تعریف شده در نشریه ۱۳۹ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی است. این بار، از یک محور ۸۰ کیلونیوتن در جلو و دو محور ۱۶۰ کیلونیوتن در محورهای عقب وسیله نقلیه کامیون و بار یکنواخت ۱۵ کیلونیوتن در عقب و جلو کامیون با فاصله ۳ متر تشکیل شده است. در این تحقیق به دلیل وجود چهار خط عبور و بارگذاری هم‌زمان این خطوط، مقادیر بارها در ضریب کاهش ۰/۷۵ ضرب می‌شوند [طاحونی، ۱۳۸۷].

۴- نتایج تحلیل

انتقال بارهای سرویس وارد بر عرشه سازه، اعم از بارهای ثقلی سازه پل و بارهای زنده ناشی از وسایل نقلیه، ایجاد نیروهای داخلی در پایه پل را در پی دارد. اثر وزن سازه، نیرویی دائمی است که همواره به سامانه سازه اعمال می‌شود. برای تعیین موقعیت بحرانی سربارهای وارد بر عرشه، از منحنی تأثیر نیروی داخلی استفاده شده است.

در مدل‌های با اتصال عرشه به پایه ساده و نیمه‌گیردار از سه نوع صفحه نشیمن نئوپرن با خصوصیات هندسی متفاوت و مصالح یکسان استفاده شده است. این صفحات همگی دارای ابعاد ۵۰۰ در ۶۰۰ میلی‌متر و از نوع گومبا هستند [طاحونی، ۱۳۸۷]. نوع اول صفحات نشیمن، دارای چهار لایه با ضخامت کلی ۶۹ میلی‌متر، نوع دوم آن شش لایه با ضخامت کلی ۹۹ میلی‌متر و نوع سوم دارای هشت لایه و ضخامت مجموع ۱۲۹ میلی‌متر هستند. بر اساس خصوصیات هندسی و مصالح و همچنین روابط ارائه شده، سختی محوری و خمشی این صفحات محاسبه شده است. [متیوا، ۱۹۷۹]

$$K_n = G S a^2 / c n \epsilon^3 \quad (1)$$

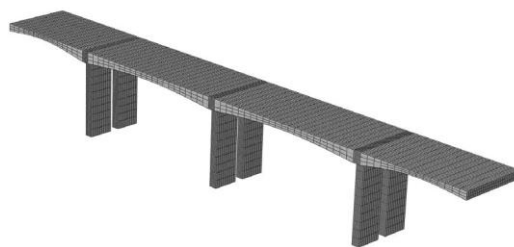
$$K_b = G S a^4 / c^3 n \epsilon^3 \quad (2)$$

با توجه به ایجاد هم‌زمان نیروی محوری و لنگر خمشی در پایه‌های پل و اندرکنش این دو با یکدیگر، تحلیل هر یک از این دو نیرو و لنگر به تنهایی دید صحیحی از عملکرد پایه‌های پل و انتقال بار به زیرسازه به دست نمی‌دهد. در نتیجه برای در نظر گرفتن اثر توأمان نیروی محوری و لنگر خمشی موجود در سطح مقطع پایه، بررسی توزیع تنش با در نظر داشتن شرایط تکیه‌گاهی اتصال با عرشه، باید انجام شود. برای این منظور یک مقطع در عمق ۶ متری پایه و همچنین توزیع تنش در کف پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مدلهای مورد بررسی در جداول و نمودارها با نام‌های اختصاری معرفی شده‌اند. مدل با اتصال عرشه به پایه ساده با

است. همچنین پایه‌های پل به صورت دیواری بوده و در هر محل تکیه‌گاه دو پایه مجاور در نظر گرفته شده است پایه‌ها و سرستون‌ها از مصالح بتن مسلح فرض شده‌اند و مصالح بتن و آرماتور مصرفی برای عرشه و پایه در همه مدل‌ها مشابه است. در مدل‌های ساخته شده برای این تحقیق کوله‌ها (پایه‌های کناری) به صورت تکیه‌گاه ساده طراحی شده‌اند.

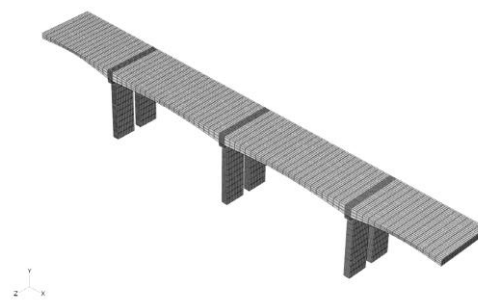
مدل‌های مطالعاتی دارای چهار دهانه هستند که در مدل اول و اصلی دهانه‌های کناری ۳۰ متر طول و دو دهانه میانی دارای طولی برابر ۴۵ متر، در مدل دوم با دهانه‌های کوچک‌تر، دهانه‌های کناری ۱۵ متر طول و دو دهانه میانی دارای طولی برابر ۲۰ متر و در مدل سوم با دهانه‌های بزرگتر دهانه‌های کناری ۵۰ متر طول و دو دهانه میانی دارای طولی برابر ۸۰ متر هستند.



شکل (۱): مدل با عرشه به پایه یکپارچه

برای پل‌های با مقطع متغیر، ضخامت عرشه در محل تکیه‌گاه برابر یک پانزدهم طول دهانه و در مقطع میانی معادل یک سی‌ام طول دهانه در نظر گرفته شده است [طاحونی، ۱۳۸۷]. عرض عرشه نیز برابر با ۱۸ متر است.

صفحات نئوپرن، از نوع الاستومریک هستند و دارای اندازه ۰/۶ متر در راستای عرضی عرشه و ۰/۵ متر در راستای طولی پل هستند [چن و دوان، ۲۰۰۳]. در هر ردیف تکیه‌گاه، تعداد ۱۰ صفحه تکیه‌گاهی در عرض پل قرار گرفته است. همچنین برای مقایسه و تعمیم نتایج از دو مدل دیگر، یکی با دهانه‌های کوچکتر و دیگری با دهانه‌های بزرگتر نسبت به مدل استفاده شده است.

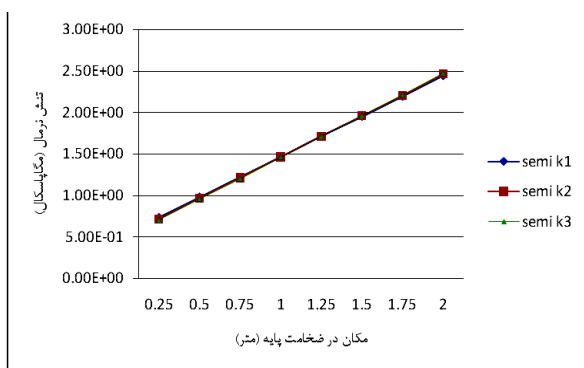


شکل (۲): مدل با اتصال عرشه به پایه غیر یکپارچه (اتصال ساده و نیمه‌گیردار)

۳- بارگذاری و مشخصات مصالح

بارهای وارد بر مدل پل، بارهای ثقلی و بهره‌برداری هستند.

می‌دهد.



نمودار (۱): توزیع تنش در راستای ضخامت پایه برای مدل نیمه گیردار با سختی‌های متفاوت در مقطع با فاصله ۶ متر از اتصال عرشه و پایه

با مقایسه سه مدل با شرایط تکیه‌گاهی ساده و یک خط صفحات تکیه‌گاهی نیز می‌توان به نتایج مشابهی رسید. البته در مورد شرایط تکیه‌گاهی ساده، میزان تنش‌ها از مدل نیمه‌گیردار به یکدیگر نزدیک‌تر است. در مدل‌های ساده دوران اتصال تحت لنگر خمشی فقط در اثر سختی خمشی صفحات صورت می‌گیرد و به علت وجود فقط یک ردیف صفحات نشیمن، سختی محوری این صفحات نقشی در دوران اتصال ندارند و به همین دلیل در مدل‌های با اتصال ساده عرشه به پایه، تفاوت کم‌تری در توزیع تنش در بعد ضخامت پایه، به نسبت مدل‌های نیمه‌گیردار، در اثر تغییر در ضخامت و سختی صفحات دیده می‌شود. در مورد توزیع تنش در عرض و ضخامت پایه، الگویی مشابه مدل‌های نیمه‌گیردار برای مدل با شرایط تکیه‌گاهی ساده صادق است. همچنین با مقایسه سه مدل ساده با سه مدل نیمه‌گیردار، مطلب فوق در مورد انتقال نیروی محوری تصدیق می‌شود. در این سه مدل نیز سطح زیر نمودار مقدار یکسانی را نتیجه می‌دهد که نشان دهنده روند انتقال بار در مورد نیروی محوری است.

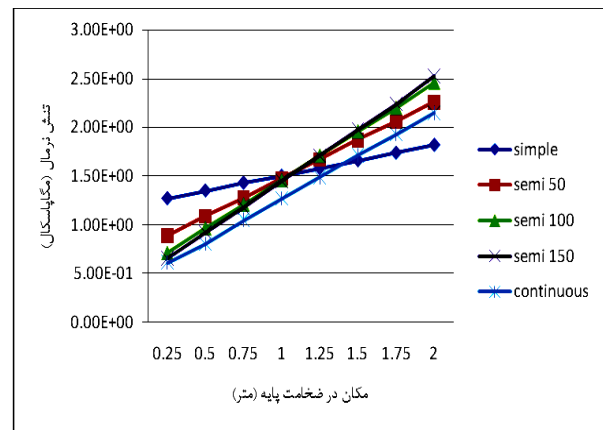
در مقایسه‌ای دیگر در این مقطع، بین مدل‌هایی با سختی ثابت صفحات تکیه‌گاهی، و تغییر در فاصله صفحات تکیه‌گاهی توزیع تنش و انتقال بار بررسی می‌شوند. سه مدل با شرایط تکیه‌گاهی نیمه‌صلب و متفاوت در فاصله ردیف‌های تکیه‌گاهی، یک مدل با یک ردیف صفحات نشیمن و شرایط تکیه‌گاهی ساده و در نهایت طرح گیردار که در آن عرشه و پایه به صورت یکپارچه هستند، مطالعه خواهند شد. دو مدل ساده و گیردار دو حد شرایط تکیه‌گاهی از نظر میزان گیرداری بوده و مدل‌های نیمه‌گیردار حد میانه بین این دو هستند.

نام "ساده"، مدل نیمه‌گیردار با فاصله دو ردیف صفحات تکیه‌گاهی ۰/۵۰ متر با نام "نیمه‌گیردار ۵۰"، مدل نیمه‌گیردار با فاصله دو ردیف صفحات تکیه‌گاهی ۱ متر با نام "نیمه-گیردار ۱۰۰" و مدل نیمه‌گیردار با فاصله دو ردیف صفحات تکیه‌گاهی ۱/۵ متر با نام "نیمه‌گیردار ۱۵۰" نشان داده شده‌اند. مدل با اتصال عرشه به پایه یکپارچه و گیردار نیز با نام "یکپارچه" تعریف شده است. همچنین مدل با دهانه‌های ۱۵ و ۳۰ متر، ۳۰ و ۴۵ متر و ۵۰ و ۸۰ متر با اعداد متناظر معرفی شده‌اند. در مرحله بررسی نحوه توزیع تنش، مدل اصلی که دارای طول دهانه‌های ۳۰ و ۴۵ متر است مورد مطالعه قرار گرفته و سپس در مرحله مقایسه نسبت‌های گیرداری نتایج دو مدل دیگر با این مدل مورد مقایسه قرار شده است.

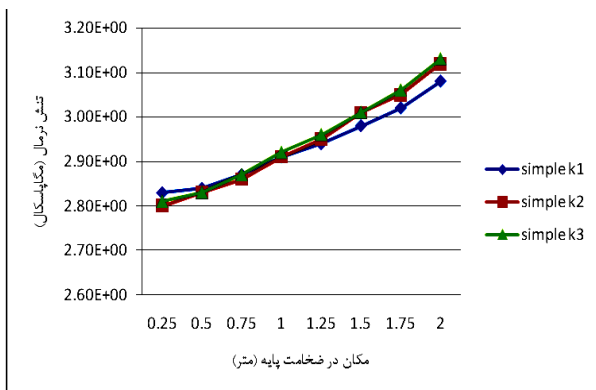
ابتدا به بررسی توزیع تنش در مقطع در عمق ۶ متری پایه پرداخته شده است. با در نظر گرفتن یک اتصال نیمه‌صلب و با فرض ثابت بودن فاصله بین دو ردیف صفحات تکیه‌گاهی، سه نوع صفحه تکیه‌گاهی با سختی‌های متفاوت برای اتصال عرشه به پایه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این سه مدل، توزیع تنش در بعد عرضی پایه نیز از کناره به سمت میانه عرشه، روندی صعودی دارد. می‌توان توزیع تنش در مقطع پایه را به صورت یک صفحه که از ابتدا در راستای طولی و عرضی پل صعود می‌نماید تصور نمود. همانطور که از روابط (۱) و (۲) نیز مشخص است، سختی محوری و خمشی صفحات نشیمن با افزایش ضخامت آن کاهش می‌یابد. لنگر خمشی انتقال یافته به پایه، باعث دوران اتصال می‌شود. این لنگر باعث ایجاد لنگری در صفحات نشیمن و همچنین ایجاد نیروی محوری در این صفحات می‌شود که مجموع این دو عامل، لنگر مقاوم وارد بر اتصال را تأمین می‌نماید. در صورت مطالعه تارهای داخلی مقطع پایه در جهت ضخامت، دیده می‌شود که شیب افزایش تنش در راستای این بعد با افزایش سختی محوری و خمشی صفحات، کاهش می‌یابد. البته همانطور که در نمودار (۱) نیز مشخص است، این اختلاف چندان ملموس نیست. این تفاوت در شیب توزیع تنش ناشی از دوران بیشتر اتصال در صفحات با سختی کمتر و افزایش نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری است. این شیب بیشتر توزیع تنش در بعد ضخامت پایه، نشان‌دهنده ایجاد دوران بیشتر در صفحات با سختی کمتر و ایجاد لنگری بزرگ‌تر در اثر این دوران بیشتر، حول محور عمود بر محور طولی پل است. در عین حال سطح زیر نمودارها با توجه دوران خطوط توزیع تنش حول نقطه‌ای در میانه بعد ضخامت پایه، ثابت مانده که نشان دهنده انتقال نیروی محوری یکسان در این سه مدل بوده و مستقل بودن نیروی محوری منتقل شده به پایه‌ها را نشان

است که در اثر ثابت بودن سطح بارگیر پایه پل، نیروی محوری منتقل شده به پایه تغییری ننموده است.

در ادامه به بررسی توزیع تنش در کف پایه و محل اتصال آن به زمین پرداخته می‌شود. تنش بیشینه در این مقطع پایه، در راستای ضخامت پایه افزایش می‌یابد. در مدل با اتصال عرشه به پایه به صورت ساده و یک محور تکیه‌گاهی، با کاهش سختی مانند مقطع بالایی، نمودار توزیع تنش دچار دوران شده و اثر دوران اتصال به صورت افزایش اثر لنگر به نیروی محوری بروز می‌یابد.

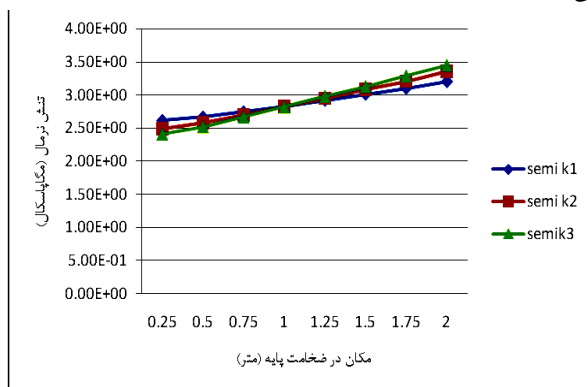


نمودار (۲): مقایسه توزیع تنش بین مدل‌های با اتصال عرشه به پایه ساده، نیمه گیردار و گیردار در جهت ضخامت پایه در مقطع ۶ متر از اتصال عرشه و پایه



نمودار (۳): توزیع تنش در راستای ضخامت پایه برای مدل نیمه ساده با سختی‌های متفاوت در مقطع کف پایه

در مدل‌های با شرایط اتصال عرشه به پایه نیمه گیردار نیز همین روند با افزایش سختی صفحات تکیه‌گاهی صادق است. در این حالت نیز با در نظر گرفتن فاصله یکسان بین دو ردیف صفحات تکیه‌گاهی، افزایش سختی صفحات نشیمن موجب دوران نمودار توزیع تنش بیشینه حول نقطه میانی بعد ضخامت پایه می‌شود.



نمودار (۴): توزیع تنش در راستای ضخامت پایه، برای مدل نیمه-گیردار با سختی‌های متفاوت در مقطع کف پایه

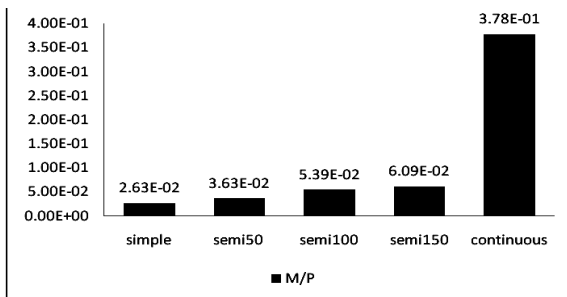
تفاوت عمده و قابل تأمل در توزیع تنش در دو مقطع بررسی

با توجه به نمودار (۲) ملایم‌ترین شیب در توزیع تنش بیشینه در مدل با تکیه‌گاه ساده و یک ردیف صفحات نشیمن اتفاق می‌افتد. در این سازه اختلاف کمتری در میزان تنش در راستای ضخامت پایه ایجاد شده و بیشترین میزان تنش در ابتدای تکیه‌گاه و کمترین میزان تنش در انتهای تکیه‌گاه در مقایسه با سایر مدل‌ها را دارد. همان‌طور که گفته شد در پایه‌های این مدل، نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری مقدار کوچکتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. شیب ملایم و نزدیک به افقی نمودار توزیع تنش در این مدل و تمایز آن با سایر مدل‌ها در نمودار (۲) به وضوح قابل مشاهده است. در مدل‌های نیمه‌گیردار، با افزایش فاصله بین دو ردیف صفحات نشیمن شیب توزیع تنش در بعد ضخامت پایه نیز افزایش می‌یابد و نمودار توزیع تنش بیشینه در بعد ضخامت پایه نسبت به حالت تکیه‌گاه تک ردیف دچار دوران می‌شود. این دوران همان‌طور که در نمودار (۲) نیز مشهود است باعث تندتر شدن شیب نمودارها با افزایش فاصله دو ردیف صفحات تکیه‌گاهی می‌شود که نشان‌دهنده افزایش نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری با افزایش فاصله بین دو ردیف صفحات نشیمن است. در مدل یکپارچه، سطح تنش به‌طور کلی پایین‌تر از سایر مدل‌ها است. این کاهش به سبب عدم وجود سرستون و اتصال مستقیم و یکپارچه عرشه به پایه است. با توجه به نمودار (۲) دیده می‌شود که سطح زیر نمودار مدل یکپارچه که مبین نیروی محوری منتقل شده به این مدل است، مقدار کوچکتری دارد. شیب تغییرات در این مدل سازه‌ای مشابهت کاملی با مدل نیمه‌گیردار با بیشترین فاصله بین صفحات تکیه‌گاهی مدل دارد. صرف‌نظر از مدل با اتصال عرشه به پایه یکپارچه نمودار (۲) نشان می‌دهد که مانند نمودار (۱) نقطه تلاقی توزیع تنش مدل‌ها در میانه بعد ضخامت است که موید آن

صفحات نشیمن با ثابت بودن شرایط تکیه‌گاهی است. این مسئله در مورد مدل‌های ساده که انتقال لنگر خمشی فقط به سختی خمشی بستگی دارد، بیشتر است.

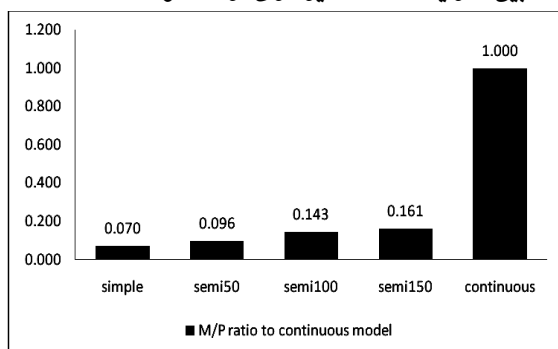
۵- نسبت انتقال لنگر در اتصال عرشه به پایه

در این مرحله از تحلیل، مقایسه‌ای بین نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری منتقل شده از عرشه به پایه، در مدل‌های با شرایط تکیه‌گاهی متفاوت انجام می‌شود. برای مقایسه روشن‌تر از نتایج به دست آمده، نتایج سه مدل اصلی (۳۰-۴۵) و دو مدل ۱۵-۳۰ و ۵۰-۸۰ با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. برای روشن شدن اثر طول دهانه و اثر بارهای وارد در سه نوع مدل، از همان صفحات نئوپرن مدل اصلی استفاده می‌شود. نمودار میله‌ای (۶) نسبت انتقال لنگر خمشی به نیروی محوری در مدل اصلی با شرایط تکیه‌گاهی ساده، نیمه‌گیردار و اتصال صلب را نشان می‌دهد:



نمودار (۶): نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری انتقال یافته در پایه مدل ۳۰-۴۵

در صورت در نظر گرفتن مدل یکپارچه به عنوان گیرداری کامل می‌توان نمودار فوق را به صورت نسبی نمودار (۷) برای مقایسه بین شرایط مختلف گیرداری ارائه نمود:

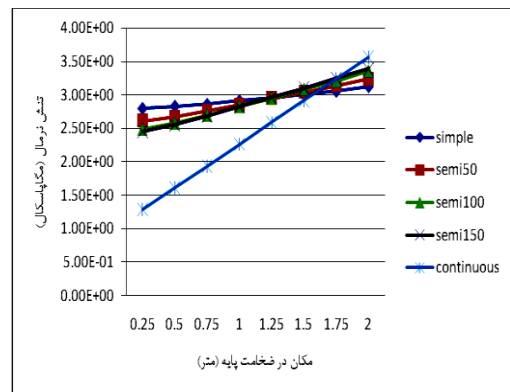


نمودار (۷): نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری انتقال یافته در پایه مدل ۳۰-۴۵ نسبت به گیرداری کامل

دیده می‌شود که نسبت انتقال لنگر برای مدل ساده به نسبت مدل گیردار ۷٪ و برای مدل‌های نیمه‌گیردار نسبت به مدل گیردار به ترتیب ۱/۹٪، ۳/۱۴٪ و ۱/۱۶٪ است.

شده، یعنی مقطع به فاصله ۶ متر از اتصال عرشه و پایه و مقطع کف پایه در توزیع تنش در عرض پایه است. در مقطع بالایی همان‌طور که گفته شد، با حرکت در عرض پایه از خارج به سمت درونی سازه، تنش‌ها افزایش می‌یافتند، حال آنکه در کف پایه این توزیع در حرکت به سمت درونی سازه کاهش یافته و سیری نزولی دارد. این مطلب نشان‌دهنده ایجاد خمش با تفرع به سمت داخل عرشه در جهت عرضی پایه است که البته با توجه به سختی خمشی بزرگ پایه در این جهت، چندان ملموس نیست.

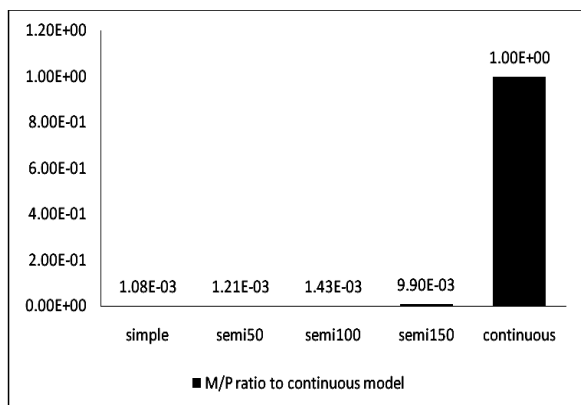
در مقایسه مدل ساده با مدل‌های نیمه‌گیردار و همچنین مدل یکپارچه، مدل یکپارچه تفاوت زیادی در توزیع تنش با مقطع بالایی از خود نشان می‌دهد و در قسمت‌هایی از کف پایه کشش ایجاد می‌شود. با توجه به نسبت بزرگتر لنگر خمشی به نیروی محوری در مدل یکپارچه، ایجاد تنش کششی در کف پایه منطقی به نظر می‌رسد. در بخش بعدی با مقایسه نسبت لنگر خمشی انتقال یافته در مدل‌های گوناگون، این مسئله بیشتر مشخص خواهد شد. این نکته همچنین در طراحی پی برای پلهایی با اتصال عرشه به پایه یکپارچه، بسیار قابل توجه به نظر می‌رسد.



نمودار (۵): مقایسه توزیع تنش بین مدل‌های با اتصال عرشه به پایه ساده، نیمه‌گیردار و گیردار در راستای ضخامت پایه در مقطع کف پایه

در تارهای انتهایی ضخامت پایه در جهت حرکت وسایل نقلیه و به سمت خارج پایه ایجاد کشش شده که با حرکت به سمت درونی پایه به تدریج کشش به تنش فشاری تبدیل می‌شود. در مدل یکپارچه همچنین گوی توزیع تنش در عرض پایه تا کف، بدون تغییر مانده و به سمت داخلی پایه روند افزایش تنش در پایین پایه نیز برقرار است.

از مقایسه دو نمودار (۱) و (۲) و سه نمودار (۳)، (۴) و (۵) می‌توان دریافت که تفاوت در توزیع تنش در مقطع پایه، با تغییر در شرایط تکیه‌گاهی از ساده به نیمه‌گیردار و تغییر در فاصله دو ردیف تکیه‌گاهی در مدل‌های نیمه‌گیردار، و از نیمه‌گیردار به یکپارچه بسیار ملموس‌تر از تغییر در سختی محوری و خمشی



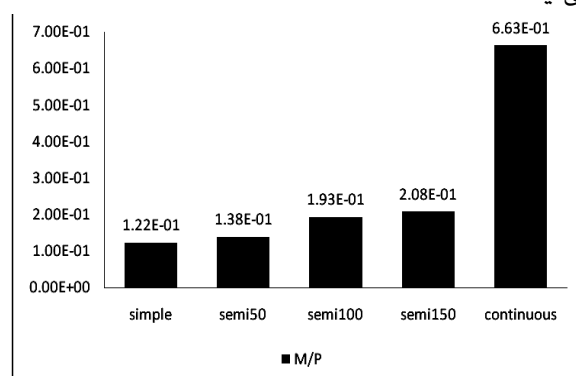
نمودار (۱۱): نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری انتقال یافته در پایه مدل ۵۰-۸۰ نسبت به گیرداری کامل

از مقایسه سه مدل فوق می‌توان نتیجه گرفت که انتقال بار و میزان لنگر انتقالی به پایه‌ها در مدل‌های یکپارچه با تغییر طول دهانه چندان تحت اثر قرار نگرفته و فقط تابع نسبت سختی خمشی پایه به سختی خمشی عرشه و تغییرات ناشی از آن در پخش لنگر، تغییراتی در انتقال لنگر این نوع اتصال عرشه به پایه صورت می‌گیرد.

اما در مورد مدل‌های ساده و نیمه‌گیردار، با افزایش طول دهانه، عملکرد خمشی این نوع از اتصالات به سرعت تحت تأثیر قرار گرفته و به سمت عملکرد تکیه‌گاه ساده میل می‌نماید. این مسئله همچنین بیانگر ضعف این صفحات نشیمن در فرایند انتقال بار است. همان‌طور که از سه نمودار (۶)، (۸) و (۱۰) دیده می‌شود در مدل ۵۰-۸۰، در شرایط اتصال عرشه به پایه یکپارچه نسبت لنگری در بازه منطقی و قابل مقایسه با دو مدل دیگر به دست آمده است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب این اتصال است. اما در سایر شرایط تکیه‌گاهی این مدل، اتصال به خوبی عمل ننموده و در عمل همه این انواع شرایط اتصال عرشه به پایه عملکردی در حد تکیه‌گاه مفصلی از خود نشان می‌دهند. در مدل ۵۰-۸۰، مدل نیمه‌گیردار با فاصله دو ردیف تکیه‌گاه ۱/۵ متر در مقایسه با مدل ساده برخلاف انتقال بیشتر نسبت لنگر به نیروی محوری، میزان انتقال لنگر این مدل در مقایسه با مدل یکپارچه بسیار ناچیز به نظر می‌رسد. به طور کلی حساسیت ناشی از تغییر شرایط اتصال عرشه به پایه در مدل ۱۵-۳۰ از همه مدل‌ها کمتر بوده و با افزایش دهانه‌ها این حساسیت، ناشی از تغییر فاصله ردیف‌های تکیه‌گاهی مدل‌های نیمه‌گیردار نیز افزایش می‌یابد. به طوری که بین نسبت انتقال لنگر به نیروی محوری مدل ۱۵-۳۰، تفاوت زیادی با تغییر شرایط تکیه‌گاهی به چشم نمی‌خورد و نشان می‌دهد که طراحی صفحات نشیمن برای این مدل نیز چندان مطلوب نبوده و با در نظر گرفتن صفحات نشیمن با

این نسبت‌ها برای مدل ۱۵-۳۰ به صورت نمودار (۸) به دست

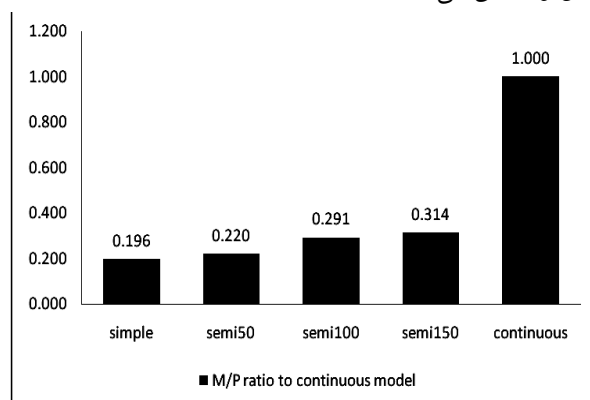
می‌آیند:



نمودار (۸): نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری انتقال یافته در پایه مدل ۱۵-۳۰

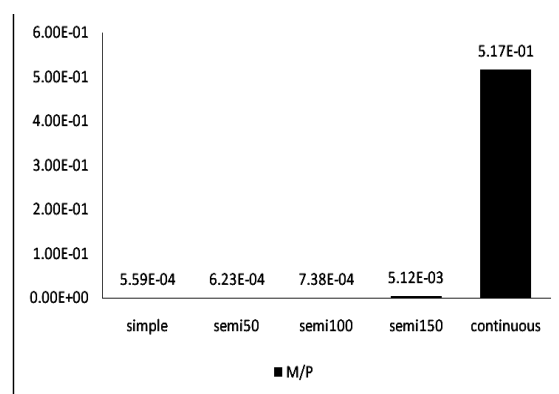
نمودار (۹) نسبت این انتقال لنگر به نسبت حالت گیرداری

کامل را نشان می‌دهد:



نمودار (۹): نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری انتقال یافته در پایه مدل ۱۵-۳۰ نسبت به گیرداری کامل

و در نهایت این دو نمودار برای مدل ۵۰-۸۰ به صورت (۱۰) هستند:



نمودار (۱۰): نسبت لنگر خمشی به نیروی محوری انتقال یافته در پایه مدل ۵۰-۸۰

و برای مدل ۵۰-۸۰ نیز دوباره نمودار میله‌ای را بر حسب مدل یکپارچه نرمالیزه کرده تا درصد انتقال لنگر قابل مشاهده گردد.

از طرف دیگر نتایج حاصل از تحلیل عددی مقادیر زیر را برای دوران به دست می دهد:

$$\theta_{\theta, \text{Numeric}} = 5/14 * 10^{-4}$$

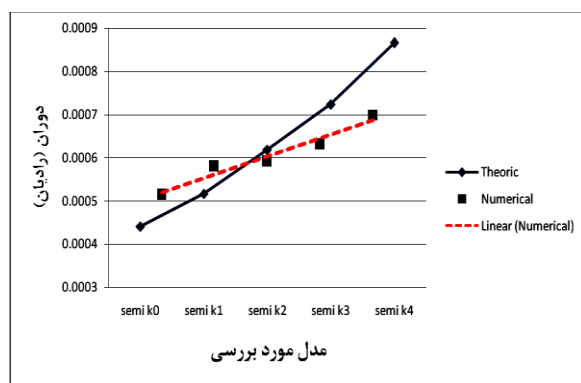
$$\theta_{\nu, \text{Numeric}} = 5/80 * 10^{-4}$$

$$\theta_{\tau, \text{Numeric}} = 5/92 * 10^{-4}$$

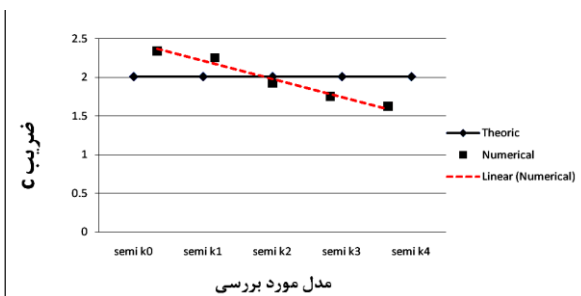
$$\theta_{\rho, \text{Numeric}} = 6/31 * 10^{-4}$$

$$\theta_{\varepsilon, \text{Numeric}} = 6/99 * 10^{-4}$$

با توجه به عوامل رابطه (۳) می توان دریافت که عامل تفاوت بین نتایج تئوری و عددی در ضریب c است که مقدار آن توسط متیوا پیشنهاد شده است. با توجه به رابطه خطی بین ضریب c و دوران، می توان نتایج تئوری و عددی را در قالب نمودار (۱۳) با یکدیگر مقایسه نمود.



نمودار (۱۲): نمودار دوران پنج مدل برای نتایج تئوری و عددی



نمودار (۱۳): ضریب ثابت رابطه لنگر-دوران پنج مدل برای نتایج تئوری و عددی

در رابطه (۳) ضریب ثابتی مانند c برای تکمیل رابطه لنگر خمشی - دوران توصیه شده است. اما همان طور که در نمودار (۱۳) دیده می شود این عامل خود تابعی از ضخامت صفحات نشیمن است و با تغییر این دو عامل، دچار تغییر می شود و علاوه بر نسبت طول به عرض صفحه نشیمن، به ضخامت صفحه نیز وابسته است. رابطه (۴) می تواند به عنوان اصلاح ضریب c به کار برده شود:

$$C = 0.2382(S.a/n\varepsilon) + 1.0206 \quad (4)$$

ابعاد بزرگتر یا تعداد بیش از نیاز، عملکرد اتصال از حالت مورد-نظر که اتصالی ساده یا با درصد گیرداری مشخص است، خارج نموده و لنگر خمشی پیش بینی نشده را به پایه ها منتقل می نماید. در مدل اول همانطور که از دو نمودار (۶) و (۷) نیز مشخص است، نسبت انتقال لنگر به نیروی محوری و نسبت انتقال لنگر به حالت یکپارچه، روندی منطقی و مطلوب دارد. می توان از مجموعه این مسائل به اهمیت طرح صحیح و دقیق صفحات نشیمن پی برد و اثرات نامطلوب طراحی ضعیف این صفحات را در مدل سوم و آثار طراحی فراتر از نیاز را در پدیده های غیرقابل پیش بینی که در مدل دوم رخ می دهد، به وضوح ملاحظه نمود.

۶- مقایسه نتایج عددی و تئوری

علاوه بر ارائه روابط (۱) و (۲) برای سختی صفحات نشیمن، رابطه ای بین لنگر منتقل شده به دو ردیف صفحات نشیمن و دوران بوجود آمده در اتصال عرشه به پایه، برای پلهایی با اتصال عرشه به پایه نیمه گیردار ارائه شده است. در این رابطه دوران اتصال عرشه به پایه تابعی از مشخصات هندسی و مکانیکی صفحات، فاصله دو ردیف صفحات نشیمن و لنگر ایجاد شده در دو ردیف صفحات نشیمن است. این رابطه به صورت زیر است:

$$\theta = (2nc\varepsilon^3)M/(pGSa^2d^2) \quad (3)$$

که در آن n تعداد لایه های صفحه نشیمن، c ضریب ثابت سختی محوری که به نسبت ابعاد صفحه بستگی دارد، ε ضخامت یک لایه نشیمن، p تعداد صفحات نشیمن در یک ردیف، G مدول برشی مصالح نشیمن، S مساحت صفحه نشیمن، a بعد عمود بر محور خمش صفحه نشیمن و d فاصله بین دو ردیف صفحات نشیمن در اتصال عرشه به پایه هستند [متیوا، ۱۹۷۹].

در این مرحله پنج مدل نیمه گیردار با خصوصیات تکیه-گاهی متفاوت، مورد بررسی قرار می گیرند. با توجه به لنگر ایجاد شده بین دو ردیف صفحات نشیمن و رابطه (۳) می توان نوشت:

$$\theta_{\theta, \text{theoric}} = (2 * 2 * 2 / 0.1 * 0.195^3) / (1.0 * 0.8 * 10^6 * 0.3 * 0.5^2 * 5^2 * 1) * (9/98 * 10^6) = 4/41 * 10^{-4} \text{ rad}$$

$$\theta_{\nu, \text{theoric}} = (2 * 4 * 2 / 0.1 * 0.1725^3) / (1.0 * 0.8 * 10^6 * 0.3 * 0.5^2 * 1/5^2) * (8/45 * 10^6) = 5/17 * 10^{-4} \text{ rad}$$

$$\theta_{\tau, \text{theoric}} = (2 * 6 * 2 / 0.1 * 0.165^3) / (1.0 * 0.8 * 10^6 * 0.3 * 0.5^2 * 1) * (7/71 * 10^6) = 6/19 * 10^{-4} \text{ rad}$$

$$\theta_{\rho, \text{theoric}} = (2 * 8 * 2 / 0.1 * 0.1612^3) / (1.0 * 0.8 * 10^6 * 0.3 * 0.5^2 * 1/5^2) * (7/25 * 10^6) = 7/24 * 10^{-4} \text{ rad}$$

$$\theta_{\varepsilon, \text{theoric}} = (2 * 11 * 2 / 0.1 * 0.1582^3) / (1.0 * 0.8 * 10^6 * 0.3 * 0.5^2 * 1/5^2) * (7/25 * 10^6) = 8/66 * 10^{-4} \text{ rad}$$

این رابطه با $I^2=0/8222$ رابطه بین c و پارامترهای هندسی صفحه نئوپرن با نسبت طول به عرض ۱/۲ را برقرار می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

در فرایند انتقال بار از عرشه به پایه، شرایط اتصال این دو بخش پل در توزیع تنش و تغییر مکان در پایه‌ها بسیار مؤثر است. بر همین اساس لنگر خمشی منتقل شده به پایه‌ها نیز از شرایط اتصال عرشه به پایه ساده تا اتصال نیمه‌گیردار و از این شرایط تکیه‌گاهی تا اتصال یکپارچه دچار تغییر می‌شود. در صورت ثابت ماندن فواصل صفحات نشیمن در یک اتصال و تغییر در ضخامت و سختی صفحات نشیمن، تغییر چندان در فرایند انتقال بار صورت نمی‌گیرد. این مطلب در مورد شرایط تکیه‌گاهی ساده نمود بیشتری دارد. در اینگونه اتصال‌ها به دلیل مؤثر بودن سختی خمشی در انتقال لنگر خمشی و نقش کم‌رنگ این عامل در انتقال بار، تفاوت چندان در فرایند توزیع تنش نیست.

برای رسیدن به عملکرد مورد انتظار از اتصال عرشه به پایه و تحلیل و طراحی صحیح زیر سازه پل، طراحی بهینه صفحات نشیمن و انتخاب ابعاد هندسی مناسب بر اساس استانداردهای طراحی این صفحات بسیار اهمیت دارد. در صورت استفاده از صفحات ضعیف و بدون کفایت در طراحی، صرف‌نظر از مسائل ناشی از تمرکز تنش و تغییر شکل‌های نامطلوب، به هیچ وجه شرایط تکیه‌گاهی مورد انتظار ایجاد نشده و انتقال لنگر خمشی از عرشه به پایه به کلی دچار اخلاص می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن این صفحات به صورت فراتر از نیاز، انتقال لنگر بیش از آنچه که در تحلیل مورد انتظار است به پایه‌ها منتقل می‌شود و درستی طرح سازه‌ای زیرسازه با تردید مواجه می‌شود. در نظر گرفتن ضریب c رابطه (۳) به صورت ثابت، چندان منطقی به نظر نمی‌رسد و می‌توان رابطه‌ای خطی بین سختی و این ضریب برقرار نمود. رابطه (۳) با اصلاح ضریب c، رابطه بین لنگر خمشی و دوران در اتصال را برقرار می‌کند و برای به دست آوردن میزان دوران اتصال در طرح صفحات نئوپرن می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۸- منابع

- [۱] رهایی، علیرضا؛ فیروزی، افشین؛ بررسی عملکرد آسیب پذیری و بهسازی پل‌ها، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۴.
- [۲] طاحونی، شاپور؛ طراحی پل، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۷.
- [۳] Saadeghvaziri, M. and Yazdani-Motlagh A.R.; "Seismic behavior and capacity/demand analyses of three multi-span simply supported bridges", Engineering structures , Vol.30, pp.54-66, 2008.
- [۴] Huth, O. and Khbeis H. ; "Pot bearings behavior after 32 years of service: In situ and laboratory tests", Engineering structures, Vol.29, pp.3352-3363, 2006.
- [۵] Dicleli M.; "Simplified seismic analysis of a class of regular steel bridges", Engineering structures, Vol.24, pp.1409-1422, 2002.
- [۶] Tonia, Dimitrios.E.; Bridge engineering : design , rehabilitation and maintenance of modern highway bridges, Second edition, McGraw-Hill, 2007.
- [۷] Jangid R.S. ; "Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions", Engineering structures , Vol.29, pp.2503-2513, 2007.
- [۸] Tsai, M. and Wu, S. and Chang, K. and Lee, G. ; "Shaking table tests of a scaled bridge model with rolling-type seismic isolation bearings", Engineering structures , Vol.29 , pp.694-702, 2004.
- [۹] Chen, Wai-Fah, Duan, Lian; Bridge engineering: Substructure design, First edition, CRC, 2003.
- [۱۰] Mathivat, Jacques; Construction Par Encorbellement Des Ponts En Beton Precontaint, Editions Eyrolle, 1979.