

مقایسه‌ی اثر زاویه‌ی تورب در پل‌های ممتد مرکب بتنی - فولادی تحت بارگذاری آیین‌نامه‌ی ایران و آشتو

غلامرضا نوری* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

زاهد احمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۶ (۱۳-۳)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۳-۳

با توجه به تفاوت رفتار سازه‌ی پل‌های با زاویه‌ی تورب نسبت به پل‌های عادی، محاسبه‌ی دقیق پاسخ نسبت به بارهای وارده ضروری است. در این نوشتار، اثر زاویه‌ی تورب (کجی - بیه) در پل‌های ممتد مرکب بتنی - فولادی تحت اثر بارگذاری آیین‌نامه‌ی ایران و آشتو بررسی کامل شده است. بدین منظور بیش از ۷۲ پل ممتد مرکب فولادی - بتنی ۲ دهانه با نسبت ابعادی ۱، ۱/۵۵ و ۱/۸۲ و زاویه‌ی بیه صفرالی ۶۰ درجه با استفاده از روش اجزاء محدود مدل‌سازی شده است. سپس نسبت‌های لنگر خمشی و نیروی برشی، ضرایب توزیع، تأثیر آرایش دیافراگم‌ها در ضرایب توزیع تحت اثر بارگذاری بارکامیون استاندارد آشتو و بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران برآورد و مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزایش زاویه‌ی تورب، لنگرهای پایه‌ی میانی در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی کاهش می‌یابد. در بارگذاری براساس آیین‌نامه‌ی ایران، این کاهش در زاویه‌ی تورب ۲۰ درجه، حدود ۸٪ بوده است؛ اما با افزایش زاویه‌ی تورب در زاویه‌ی ۴۵ درجه، به حدود ۳۰٪ رسیده است. مقایسه‌ی نتایج لنگر خمشی نشان داده است که بارگذاری آیین‌نامه‌ی ایران نسبت به بارگذاری آیین‌نامه‌ی آشتو در پل‌های بیه‌دار ممتد ۲ دهانه، محافظه‌کارانه‌تر است. همچنین نیروی برشی در تکیه‌گاه‌های پایه‌ی میانی در اثر افزایش زاویه‌ی بیه در شاه‌تیرهای خارجی افزایش و در شاه‌تیرهای داخلی کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: زاویه‌ی بیه، تورب عرشه، پل ممتد، ضریب توزیع.

r.nouri@khu.ac.ir
lahrudi.civil@gmail.com

۱. مقدمه

زاویه‌ی تورب پل می‌تواند به‌عنوان زاویه‌ی که مابین خط عمود بر محور مرکزی پل و محور راه در تکیه‌گاه‌ها یا پایه‌ها قرار می‌گیرد، تعریف شود. چنین سازه‌ی می‌تواند ناشی از موانع طبیعی، تقاطع‌ها، محدودیت‌های فضا، دره‌ی کوهستان‌ها یا موانعی که خود بشر به وجود می‌آورد، باشد. ضرایب توزیعی که در آیین‌نامه‌های طراحی پل ارائه شده است، تحلیل و طراحی پل‌ها را آسان کرده است. ضرایبی که در آیین‌نامه‌ی ایران و آشتو (۳۰°)، برای تحلیل پل‌های بدون بیه و دهانه ساده ارائه شده است، فقط تابعی از فاصله‌ی مرکز به مرکز شاه‌تیرهای طولی است و استفاده از ضرایب مذکور توزیع به‌خصوص زمانی که پل مورب و ممتد است، می‌تواند منجر به تعیین لنگرهایی شود که برای طراحی بسیار محافظه‌کارانه باشند.^[۱] در آیین‌نامه‌ی ذکرشده، کاهش در لنگرهای طولی به علت تورب عرشه در نظر گرفته نشده است. همچنین روش اثر ممتد بودن، وجود دیافراگم عرضی و نحوه‌ی آرایش آن، و نسبت دهانه نادیده

گرفته شده است. در آیین‌نامه‌ی کانادایی OHBDC (۱۹۹۲)، علاوه بر فاصله‌ی شاه‌تیرها، سختی‌های طولی و عرضی نیز لحاظ شده و نیز به پل‌های با دهانه‌ی ساده و زوایای تورب کوچک پرداخته شده است.^[۲]

آیین‌نامه‌ی آشتو LRFD (۱۰°)، ضریب توزیع بار زنده را تابعی از فاصله‌ی شاه‌تیرها، ضخامت دال، و سختی تیر تعیین کرده است.^[۳] ضرایب کاهش آیین‌نامه‌ی آشتو برحسب زاویه‌ی تورب است و ضرایب کاهش را در اثر زاویه‌ی بیه برای اعمال بر ضریب توزیع بار زنده ارائه می‌کند.

با توجه به کمبود ضوابط در مورد ضرایب توزیع لنگر و برش در پل‌های ممتد و بیه‌دار در آیین‌نامه‌ها، مطالعات زیادی در این خصوص انجام شده است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۰، ضرایب کاهش برای احتساب اثر زاویه‌ی بیه و پیوستگی در پل‌هایی که دال عرشه به صورت ساده روی تکیه‌گاه‌های کناری و به صورت ممتد روی پایه‌ی میانی واقع شده است، در حالی که شاه‌تیر I شکل فولادی در پایه‌های میانی غیرممتد است، ارائه و نتیجه گرفته شده است که ضوابط آشتو، لنگر خمشی را دست‌پایین برآورد می‌کند.^[۴] آزمایش‌هایی نیز در سال ۱۹۹۴ جهت تعیین بار شکست پل‌های دو

* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۹/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۵/۲۸، پذیرش ۱۳۹۴/۶/۲۴.

روش کلی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر برای بررسی و آنالیز، تحلیل به روش اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 است.^[۱۳] در این مطالعه، رفتار تمامی المان‌ها کشسان و تغییرمکان‌ها و تغییرشکل‌ها کوچک فرض شده‌اند. عرشه بتنی پل با استفاده از المان‌های چهارضلعی پوسته‌یی با ۶ درجه آزادی در هر گره مدل شده است. این المان‌های مربعی، به ابعاد بیشینه‌ی ۰٫۳ متر در شبکه‌بندی عرشه‌ی پل استفاده شده‌اند. بار کامیون آشتو (۴۴-۲۰ HS) و بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران از هر دو باند جهت تولید بیشینه‌ی نیروی برشی و لنگر خمشی عبور داده شده است. این سازه با کمک این فرضیات ایده‌آل‌سازی شده است:

۱. تمامی مصالح کشسان و همگن هستند.
۲. دال بتنی عرشه در تمام عرض پل، ضخامت یکسانی دارد.
۳. نشیمنگاه شاه‌تیرها، فواصل یکسانی نسبت به هم دارند.
۴. دال عرشه و شاه‌تیرهای طولی بر روی تکیه‌گاه‌های انتهایی به صورت ساده تکیه داشته و از روی پایه‌ی میانی به صورت ممتد عبور کرده است.
۵. دال بتنی و شاه‌تیرهای I شکل فولادی به صورت کاملاً کامپوزیت عمل می‌کنند.
۶. دیافراگم‌های عرضی در تکیه‌گاه‌ها، پایه‌ی میانی و در طول دهانه با فاصله‌های معین قرار گرفته‌اند.
۷. از اثر جدول‌های کناری صرف‌نظر شده است.

۳. خصوصیات هندسی و سازه‌یی مدل‌ها

مدل‌های انتخابی شامل پل‌های ممتد مرکب فولادی - بتنی ۲ دهانه با نسبت ابعادی (N) برابر با نسبت طول دهانه‌ی دوم به دهانه‌ی اول (۱، ۱٫۵۵ و ۱٫۸۲) هستند، که شاه‌تیرهای فولادی و دال بتنی بر روی تکیه‌گاه‌های انتهایی پل به صورت ساده و در پایه‌ی میانی به صورت ممتد قرار گرفته‌اند. در شکل ۱، مقطع عرضی پل با ۲ خط عبوری براساس آیین‌نامه‌ی کانادایی OHBDC (۱۹۹۲)، که ۶ شاه‌تیر I شکل فولادی به ارتفاع ۲٫۲ متر دارد، نشان داده شده است.^[۱۲] طول دهانه‌ی پل با توجه به نسبت ابعادی از ۲۴ متر تا حدود ۴۴ متر متغیر بوده است. استفاده از این

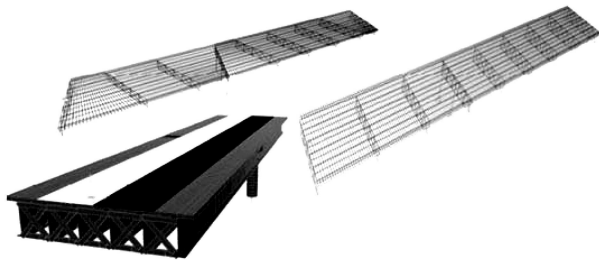
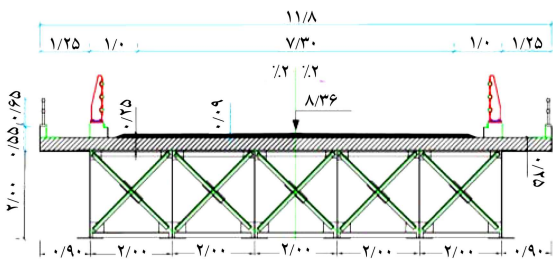
دهانه‌ی ساده و ممتد بیه‌دار انجام شده است.^[۱۵] همچنین در سال ۲۰۰۴، مطالعاتی به منظور مقایسه‌ی ضرایب توزیع تجربی ارائه‌شده برای زوایای بیهی بزرگ انجام شده است.^[۱۶] در طی بررسی‌هایی بر روی پل‌های بیه‌دار تحت بارگذاری بار کامیون استاندارد آشتو، ضرایبی برای توزیع لنگر ارائه شده است؛ اما تأثیر آرایش دیافراگم عرضی و همچنین نسبت دهانه بررسی نشده است.^[۱۷-۱۱] همچنین براساس نظر برخی پژوهشگران (۱۹۹۱)، بدون شک زاویه‌ی بیهی پل، پارامتر مهمی در رفتار سازه‌یی پل، مانند واکنش‌های تکیه‌گاهی است.^[۱۳] در سال ۲۰۰۷ نیز اثر بارگذاری دینامیکی روی یک پل پوسته‌ی جعبه‌یی مطالعه شده و این نتیجه به دست آمده است که اثر زاویه‌ی بیه در مقادیر بین صفرالی ۳۰ درجه، کم است.^[۱۳] همچنین در مدل‌سازی پل‌هایی با زاویه‌ی بیه بین صفرالی ۶۰ درجه (۲۰۱۲) استنتاج شده است که آیین‌نامه‌ی آشتو، مقادیر بالاتر از لنگر و برش محاسبه‌شده در مدل‌سازی را برای بار زنده ارائه می‌کند، که این اختلاف گاه به ۵۰٪ برای زوایای بیهی حدود ۴۵ درجه نیز می‌رسد.^[۱۴] در مدل‌سازی‌های دیگری (۲۰۱۲)، نیز رفتار پل‌ها با ساخت نمونه به مقیاس ۱:۸ و مدل‌سازی رایانه‌یی، در اثر زاویه‌ی بیه بررسی شده است.^[۱۵] پیش از همه در سال ۱۹۹۳، ۳۶ پل با دهانه‌های ۷۵ الی ۱۲۵ فوت و عرض ۳۹ الی ۶۶ فوت و زوایای بیهی ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه‌ی مدل‌سازی شده با فواصل مختلف شاه‌تیرها مدل شده و میزان لنگر خمشی ایجادشده در شاه‌تیر بررسی شده است.^[۱۶]

در فصل پانزدهم آیین‌نامه‌ی طرح و محاسبه‌ی پل‌های بتن‌آرمه‌ی ایران (۲۰۰۸)، ضوابطی تجربی برای تعیین سهم هر تیر از لنگرهای خمشی ناشی از بار چرخ‌ها ارائه شده است، که مشابه آیین‌نامه‌ی آشتو است و فقط تابعی از فاصله‌ی بین شاه‌تیرهاست.^[۱۷] آیین‌نامه‌ی مذکور، ضابطه‌یی برای زوایای بیهی بیش از ۲۰ درجه ندارد و مدل‌سازی را در این شرایط الزامی کرده است.

در نوشتار حاضر، بیش از ۷۲ مدل پل ممتد مرکب با نسبت‌های دهانه ۱، ۱٫۵۵ و ۱٫۸۲ بررسی شده‌اند و نتایجی ناشی از مطالعه‌ی پارامتری به روش اجزاء محدود بر روی پل‌های ممتد مرکب بتنی - فولادی ۲ دهانه با زوایای تورب متفاوت ارائه شده است. اطلاعات استخراج‌شده از مطالعه‌ی پارامتری برای به دست‌آوردن نسبت لنگر خمشی و نیروی برشی، ضرایب توزیع تحت اثر بارگذاری بار کامیون استاندارد آشتو (۴۴-۲۰ HS)، و بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران مورد استفاده قرار گرفته است.^[۱۸] همچنین در این مطالعه پارامترهای طول دهانه، زاویه‌ی تورب عرشه، و اثر آرایش دیافراگم‌های عرضی، و نیز دقت روابط ساده‌ی پیشین در خصوص تحلیل عرشه‌های بیه‌دار مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲. فرضیات تحلیل و مدل‌سازی

در سال ۱۹۸۶، مدلی برای شبیه‌سازی رفتار پل با استفاده از المان‌های قابی سه‌بعدی و المان‌های چهارگوش برای عرشه تهیه شده است.^[۱۹] در سال ۱۹۷۸ نیز مدل دیگری ارائه شده است که در آن المان‌های shell و المان‌های تیر به عنوان عرشه‌ی پل با قیود صلب به هم متصل شده‌اند.^[۲۰] همچنین در سال ۱۹۸۶، مدل‌سازی شاه‌تیرها با جزئیات بیشتر انجام شده است، به نحوی که شاه‌تیرها به ۳ بخش تقسیم و بال‌ها به صورت المان‌های تیر و جان به صورت shell مدل شده‌اند.^[۲۱] دال عرشه با استفاده از المان shell با لینک‌های صلب به مرکز هر المان مدل شده است. در مدل دیگری نیز در سال ۱۹۹۲، المان صلب برای عرشه و المان shell برای شاه‌تیرها استفاده شده است.^[۲۲]



شکل ۱. مقطع عرضی پل ممتد با دو خط رفت و برگشت.

با ۲۴ متر و دهانه‌ی دوم با نسبت‌های فوق تغییر خواهند کرد. در این مطالعه‌ی پارامتری، ۲ حالت آرایش دیافراگم‌های عرضی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول، دیافراگم عرضی در تکیه‌گاه و پایه‌ها در طول دهانه‌ی موازی با زاویه‌ی اریب عرشه است. در حالت دوم، دیافراگم‌ها به جز در پایه‌های میانی و انتهایی، عمود بر شاه‌تیرهای طولی فولادی هستند. فاصله‌ی دیافراگم‌ها از یکدیگر در دهانه‌ی اول برابر با $L/3$ و در دهانه‌ی دوم بین ۶ الی ۸ متر متغیر است. در حالت آرایش دیافراگم عمود بر شاه‌تیر طولی به علت محدودیت مدل‌سازی عرشه‌ی پل در نرم‌افزار مربوط، آرایش دیافراگم برای زوایای بیشتر از ۴۵ درجه مقدور نشده است، بنابراین فقط نتایج تا زاویه‌ی ۴۵ درجه بررسی شده است. در جدول ۱، مشخصات مدل‌های مورد استفاده در این نوشتار ارائه شده است. این مشخصات در ۲ حالت آرایش دیافراگم عمود بر شاه‌تیر طولی و موازی با زاویه‌ی اریب عرشه مدل‌سازی شده‌اند.

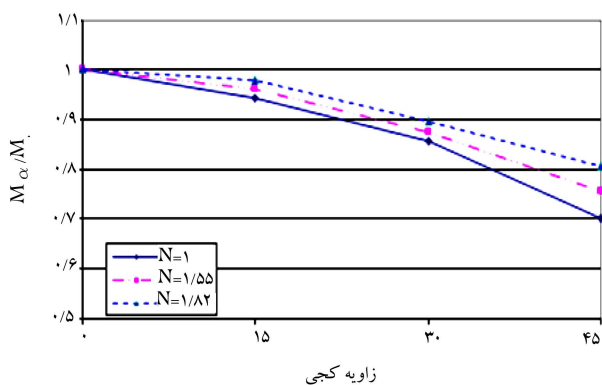
جهت صحت‌سنجی مدل، شرایط یکی از مدل‌ها در حالت $N = 1$ ، به شرایط مدل انجام شده در مطالعاتی در سال ۱۹۹۶^[۱]، نزدیک و ضریب لنگر خمشی برای تیر خارجی و داخلی در زاویه‌ی تورب ۳۰ درجه مقایسه شده‌اند، که اختلافی کمتر از ۵٪ را نشان می‌دهد. همچنین روند تغییرات ضرایب بیشینه‌ی لنگر خمشی و نیروی برشی در زوایای مختلف با روند تغییرات به دست آمده در مطالعاتی در سال ۱۹۹۰^[۱]، تطابق دارد.

۵. نسبت بیشینه‌ی لنگر طولی ناشی از تحلیل المان

محدود در محل تکیه‌گاه‌های میانی پل بیه‌دار به عرشه‌ی بدون بیه‌ی متناظر

تغییرات نسبت لنگر خمشی M_{α}/M_0 به ترتیب برای بیشینه‌ی لنگر خمشی طولی شاه‌تیرهای داخلی و خارجی برحسب زاویه‌ی تورب برای هر ۳ نسبت دهانه‌ی در نظر گرفته شده، تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران و در حالتی که دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیرهای طولی است، در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲، با افزایش زاویه‌ی بیه، بیشینه‌ی لنگرهای خمشی طولی تیرهای داخلی در پایه‌ی میانی کاهش یافته است. این کاهش در لنگرهای طولی، تا زاویه‌ی بیه حدود ۲۰ درجه ناچیز و در حدود ۸٪ است. با افزایش زاویه، کاهش لنگر



شکل ۲. نسبت بیشینه‌ی لنگر خمشی طولی M_{α}/M_0 در پایه‌ی میانی ناشی از تحلیل المان محدود، در شاه‌تیرهای داخلی تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران، دیافراگم عمود بر شاه‌تیر طولی.

نوع عرشه، برای دهانه با طول حدود ۲۴ متر مرسوم است. فاصله‌ی شاه‌تیرها، ۲ متر از مرکز تا مرکز شاه‌تیر بعدی بوده است. مقاطع فولادی برای شاه‌تیرهای طولی I شکل به ارتفاع ۲ الی ۲٫۲ متر متغیر بوده و از ورق‌هایی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر برای بال، ۱۵ میلی‌متر برای جان با شرایط جوش کارخانه‌یی از فولاد نوع ST۵۲ استفاده شده است.

همه‌ی مدل‌ها تیر زیرسری از نوع بتنی در پایه‌ی میانی داشته‌اند، که شامل ۳ ستون بتنی دایره‌یی شکل به قطر ۱٫۲ متر بوده‌اند، که به فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۵٫۶ متری از همدیگر واقع شده‌اند. در تمامی مدل‌ها ضخامت دال بتنی ثابت و برابر با ۲۵ سانتی‌متر بوده و از شبکه‌های سیمی جوش شده با مقاومت جاری شدن Mpa ۲۲۸ برای مسلح کردن تمامی عرشه‌ی پل‌ها استفاده شده است. از ناودانی به طول ۵۰ میلی‌متر به عنوان برش‌گیر برای تمامی پل‌های مدل شده استفاده شده است. دیافراگم‌های عرضی، نبشی‌های $L80 \times 8$ هستند، که به صورت ضربدری با وتر بالا و پایین به شاه‌تیر فولادی جوش شده‌اند.

با توجه به اینکه که زوایای بیشتر از ۶۰ درجه به ندرت عملاً ساخته می‌شود، زاویه‌ی بیه از صفر تا ۶۰ درجه، متغیر خواهد بود.

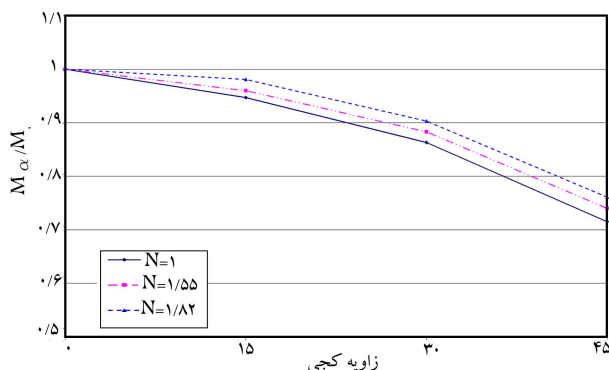
۴. بارگذاری، شرایط مرزی و پارامترهای مورد بررسی

برای نقاط تکیه‌گاهی انتقال موازی و قائم بر سطح عرشه‌ی محدود شده، اجازه‌ی حرکت فقط در جهت محور طولی پل داده شده است. از طرفی با توجه به فرض غلتکی بودن تکیه‌گاه، چرخش در تمامی جهات تعیین شده آزاد است. در پایه‌ی میانی، فقط بال پایینی شاه‌تیر طولی فولادی به تیر زیرسری متصل شده است. اتصال تیر زیرسری به پایه‌های بتنی نیز گیردار فرض شده است.

بار عادی آیین‌نامه‌ی بارگذاری ایران (نشریه‌ی ۱۳۹)، و بار کامیون استاندارد HS۲۰-۴۴ براساس مشخصات آشتو مورد استفاده قرار گرفته است.^[۱۸] با توجه به ماهیت بار عادی ایران، این بار به صورت بار متحرک^۱، یعنی باری که از روی پل عبور داده می‌شود، تعریف شده است. نتایج حاصل از عبور بار در مراحل مختلف بار به عنوان بیشینه‌ی لنگر خمشی و نیروی برشی جهت تحلیل مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته است. در بارگذاری آشتو از دو حالت بارگذاری استفاده می‌شود: در حالت اول، ۳ کامیون استاندارد (۲ کامیون در باند رفت و ۱ کامیون در باند برگشت) و در حالت دوم، بار ۲ کامیون در یک باند طراحی به صورت استاتیکی خطی در مراحل تعریف شده^۲، به مدل اعمال می‌شود. به طور کلی ۲۴ حالت بارگذاری برای هر یک از بارگذاری‌های فوق در روی عرشه تعریف شده است. اثر افزایش زاویه‌ی بیه در بیشینه‌ی لنگر خمشی طولی تیرهای داخلی و خارجی و همچنین بیشینه‌ی برش در پایه‌ی میانی در اثر بارگذاری آیین‌نامه‌ی ایران و آشتو برای نسبت‌های دهانه مختلف در پل بررسی و ارزیابی شده است. نتایج تحلیل المان محدود برای زوایای بیه‌ی صفر الی ۶۰ درجه با گام ۵ درجه، متناظر با تحلیل المان محدود پل غیرمورب (با بیه‌ی صفر درجه) مقایسه شده است. نتایج این تحلیل به صورت نسبت لنگر خمشی M_{α}/M_0 ارائه شده است، که در آن M_{α} بیشینه‌ی لنگر خمشی طولی ناشی از تحلیل المان محدود برای زوایای مختلف تورب و M_0 لنگر ناشی از تحلیل در پل متناظر با زاویه‌ی بیه‌ی صفر است. به طور مشابه نسبت V_{α}/V_0 نیز برای برش بررسی شده است. دسته‌بندی مدل‌ها از روی نسبت ابعادی $N = L_2/L_1$ (طول دهانه‌ی بلند بر دهانه‌ی کوتاه) به ترتیب برابر با ۱، ۱٫۵۵ و ۱٫۸۲ صورت پذیرفته است. در تمامی مدل‌ها، دهانه‌ی اول برابر

جدول ۱. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در تحلیل.

ردیف	طول کل پل (متر)	دهانه‌ی اول L_1 (متر)	دهانه‌ی دوم L_2 (متر)	$N = L_2/L_1$	زاویه‌ی تورب	گام تغییرات زاویه (درجه)
۱	۴۸	۲۴	۲۴	۱	۰ - ۶۰	۵
۲	۶۱٫۲	۲۴	۳۷٫۲	۱٫۵۵	۰ - ۶۰	۵
۳	۶۷٫۷	۲۴	۴۳٫۷	۱٫۸۲	۰ - ۶۰	۵



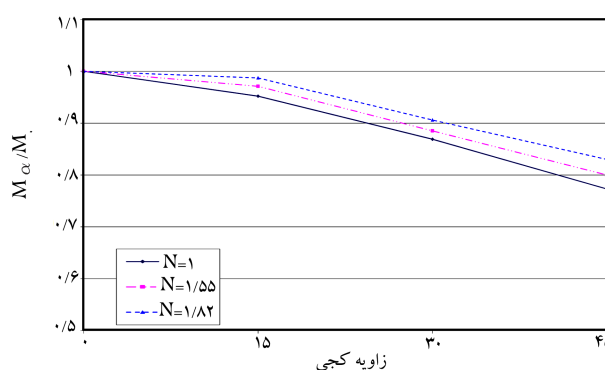
شکل ۵. نسبت بیشینه‌ی لنگر خمشی طولی M_α/M در پایه‌ی میانی ناشی از تحلیل المان محدود، در شاه‌تیرهای خارجی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو، دیافراگم عمود بر شاه‌تیر طولی.

۱۷٪ و در زاویه‌ی ۴۵ درجه در حدود ۳۶٪ کاهش داشته است. کاهش لنگر در شاه‌تیرهای خارجی با الگویی مشابه شاه‌تیرهای داخلی است. این کاهش تا زاویه‌ی ۳۰ درجه، کمتر از ۱۵٪ و با افزایش زاویه تا ۴۵ درجه به حدود ۳۰٪ خواهد رسید. یافته‌های ذکر شده با نتایج برخی پژوهش‌ها^[۱۱،۱۲،۱۳] مبنی بر کاهش لنگرهای خمشی پایه‌ی میانی در اثر افزایش زاویه‌ی بیه در پل‌های ممتد مطابقت دارد. با مقایسه‌ی نمودارها می‌توان دریافت که کاهش لنگر در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی در اثر بار کامیون استاندارد آشتو، بیشتر از بارگذاری حاصل از بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران در پل متناظر است. لذا بارگذاری آیین‌نامه‌ی ایران نسبت به بارگذاری آیین‌نامه‌ی آشتو در پل‌های بیه‌دار ممتد ۲ دهانه محافظه‌کارانه عمل خواهد کرد.

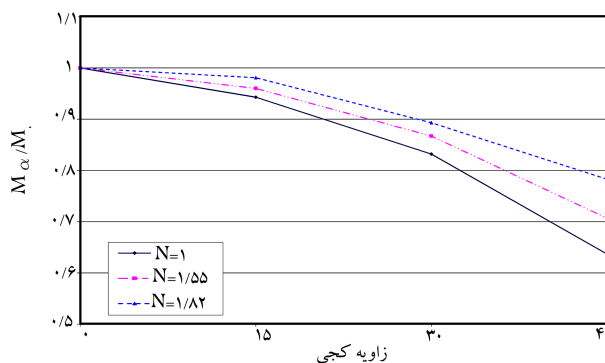
۶. اثر آرایش دیافراگم و زاویه‌ی تورب در نسبت لنگر

خمشی

در یک بررسی آزمایشگاهی (۱۹۹۶)^[۸] اهمیت وجود دیافراگم‌های عرضی در ضرایب توزیع پل مرکب بیه‌دار نشان داده شده است. آزمایش بر روی پل مدل‌سازی شده نشان داده است که چنین اتصالاتی منجر به بهبود بخشیدن سختی پل، توزیع بهتر و افزایش ظرفیت باربری نهایی پل می‌شود.^[۹] با توجه به اینکه کاهش تلاش‌های خمشی در هر سازه از لحاظ اقتصادی مطلوب و بهینه است، لذا آرایشی از دیافراگم که بتواند لنگرهای خمشی را بیشتر کاهش دهد، مطلوب طرح خواهد بود. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب اثر آرایش مختلف دیافراگم عرضی در کاهش بیشینه‌ی لنگرهای خمشی طولی تحت بارگذاری ایران و آشتو در شاه‌تیرهای داخلی را نشان می‌دهند. در حالت آرایش دیافراگم عرضی موازی تورب عرشه و خطوط تکیه‌گاهی، کاهش بیشینه‌ی لنگرهای خمشی در شاه‌تیرهای داخلی در اثر افزایش زاویه‌ی بیه چندان محسوس نیست. این کاهش برای بارگذاری ایران تا زاویه‌ی بیه ۳۰ درجه



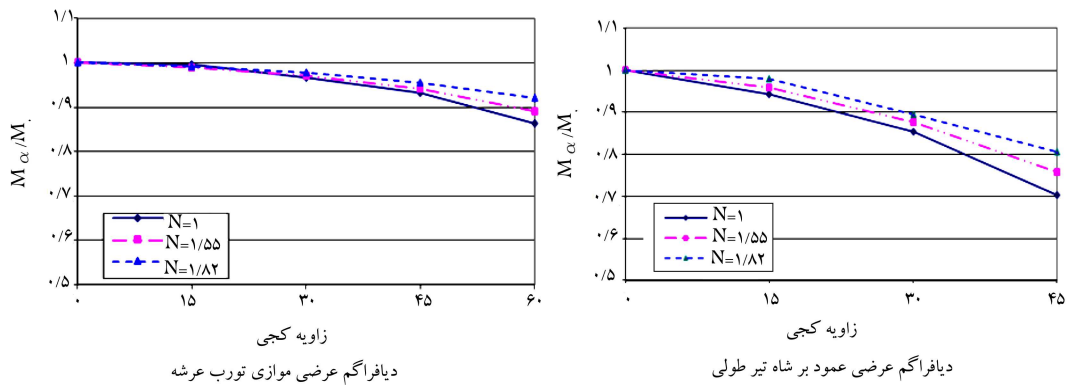
شکل ۳. نسبت بیشینه‌ی لنگر خمشی طولی M_α/M در پایه‌ی میانی ناشی از تحلیل المان محدود، در شاه‌تیرهای خارجی، تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران، دیافراگم عمود بر شاه‌تیر طولی.



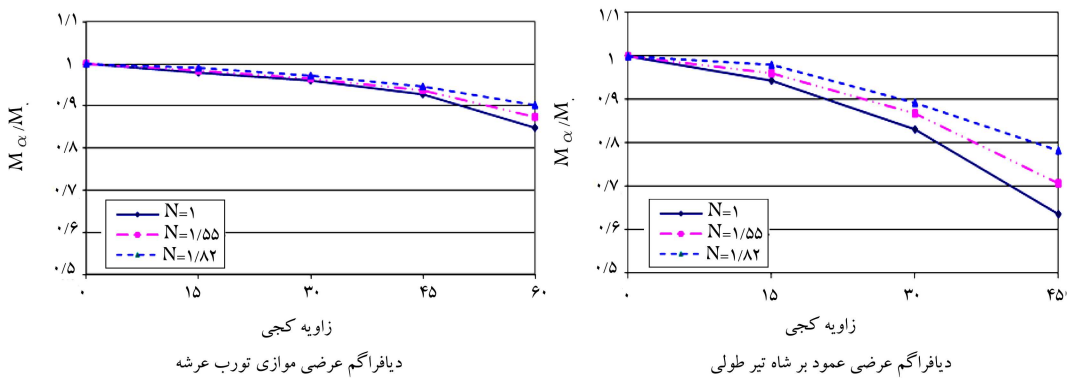
شکل ۴. نسبت بیشینه‌ی لنگر خمشی طولی M_α/M در پایه‌ی میانی ناشی از تحلیل المان محدود، در شاه‌تیرهای داخلی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو، دیافراگم عمود بر شاه‌تیر طولی.

محسوس‌تر می‌شود، به طوری که این کاهش برای نسبت دهانه‌ی ۱، تا زاویه‌ی ۳۰ درجه در شاه‌تیرهای داخلی تا حدود ۱۴٫۵٪ و تا زاویه‌ی ۴۵ درجه به حدود ۳۰٪ می‌رسد. هر چند در زوایای ذکر شده، استفاده از ضرایب آیین‌نامه‌ی طراحی پل‌های بتن‌آرمه‌ی ایران نافذ نیست.

مطابق شکل ۳، کاهش لنگر در شاه‌تیرهای خارجی نیز اتفاق می‌افتد، اما با افزایش زاویه‌ی بیه در شاه‌تیرهای خارجی، میزان این افت کمتر از شاه‌تیرهای داخلی است. این اثر برای زوایای بزرگ‌تر از ۳۰ درجه قابل توجه است. بنابراین در طرح پل‌های بیه‌دار ممتد، طراحی شاه‌تیرهای خارجی کنترل‌کننده‌ی طراحی خواهد بود. برای بارگذاری آیین‌نامه‌ی آشتو، از ۳ بار کامیون استاندارد آیین‌نامه‌ی مذکور (۴۴-۲۰ HS) در ۲ باند طراحی برای نسبت‌های دهانه‌ی موردنظر استفاده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، کاهش نسبت لنگر در اثر افزایش زاویه‌ی بیه محسوس است، به طوری که تا زاویه‌ی ۳۰ درجه در حدود



شکل ۶. اثر آرایش مختلف دیافراگم عرضی در کاهش لنگر خمشی در شاه تیرهای داخلی تحت اثر بارگذاری بار عادی آیین نامه‌ی ایران.



شکل ۷. اثر آرایش مختلف دیافراگم عرضی در کاهش لنگر خمشی در شاه تیرهای داخلی تحت اثر بار کامیون استاندارد آشتو.

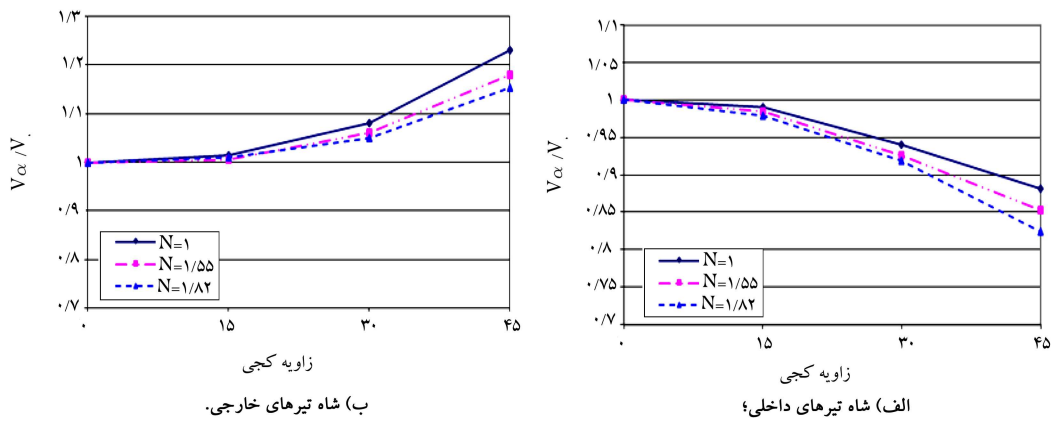
ناچیز بوده و با افزایش زاویه‌ی بیه تا زاویه‌ی ۶۰ درجه، کاهش لنگر در شاه تیرهای داخلی به حدود ۱۴٪ رسیده است. در بارگذاری آشتو، بیشینه‌ی لنگرهای خمشی طولی در این حالت در اثر افزایش زاویه‌ی بیه تغییر چندانی نمی‌کند. به طوری که تا زاویه‌ی بیه ۳۰ درجه، کاهش لنگر در شاه تیرهای داخلی کمتر از ۴٪ است، اما با افزایش زاویه‌ی بیه تا ۶۰ درجه به حدود ۱۵٪ رسیده است. از مطالعه‌ی این

دو حالت می‌توان دریافت که حالت دیافراگم عرضی عمود بر شاه تیرهای طولی، بهترین آرایش در پل‌های مورب هستند. این نتیجه با یافته‌های پژوهشی در سال ۲۰۰۳^[۹] در بررسی اثر دیافراگم عرضی در پل‌های با دهانه‌ی ساده‌ی بیه‌دار با شاه تیرهای بتنی پیش‌تنیده مطابقت دارد.

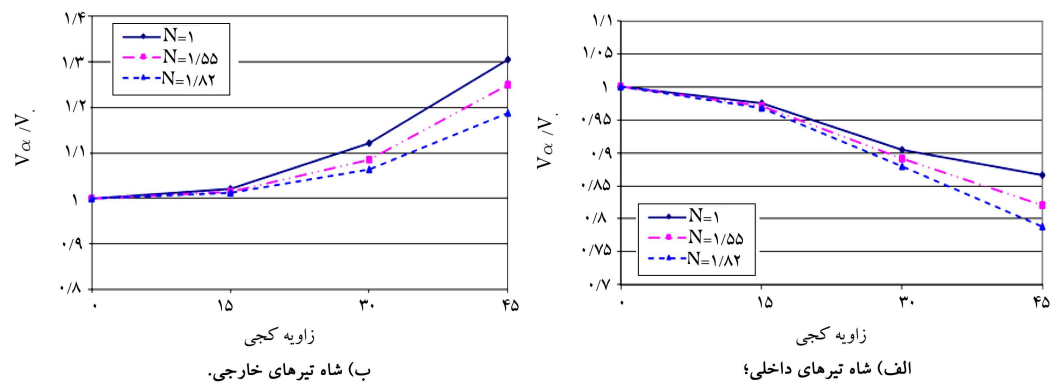
شکل ۹، تغییرات نسبت برش ناشی از تحلیل المان محدود را به ترتیب: الف) برای شاه تیرهای داخلی و ب) برای شاه تیرهای خارجی تحت بارگذاری آیین نامه‌ی آشتو در نسبت‌های مختلف دهانه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ الف مشخص است، نیروهای برشی برای هر ۳ نسبت ابعادی در محل تکیه‌گاه‌های میانی پل ممتد مرکب در اثر افزایش زاویه‌ی بیه در شاه تیرهای داخلی کاهش پیدا می‌کند. به طوری که این نسبت در زاویه‌ی ۳۰ درجه ۸٪ کاهش داشته و با افزایش زاویه تا ۴۵ درجه این کاهش به حدود ۲۲٪ رسیده است. شکل ۹ ب، تغییرات نسبت نیروی برشی در شاه تیرهای خارجی در برابر زاویه‌ی بیه را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که با افزایش زاویه‌ی بیه، نیروهای برشی در محل تکیه‌گاه‌های میانی پل افزایش پیدا می‌کنند. این افزایش تا زاویه‌ی بیه ۳۰ درجه در حدود ۱۲٪ و با افزایش زاویه‌ی بیه به ۴۵ درجه به حدود ۳۰٪ رسیده است. با استفاده از نمودار می‌توان دریافت که نیروی برشی در محل تکیه‌گاه‌های میانی پل ممتد در شاه تیرهای داخلی و خارجی با افزایش نسبت دهانه (N) کاهش می‌یابد. از مطالعه‌ی نمودارها می‌توان به این نتایج اشاره کرد:

۷. نسبت بیشینه‌ی برش در محل تکیه‌گاه‌های میانی پل ناشی از تحلیل المان محدود به عرشه‌ی بدون بیه‌ی متناظر
در بررسی تغییرات نیروی برشی در پایه‌ی میانی در اثر تورب عرشه، تغییرات نسبت V_α/V_0 در برابر زاویه‌ی بیه برای نسبت‌های دهانه‌ی موردنظر تحت بار عادی آیین نامه‌ی ایران در حالتی که دیافراگم عرضی عمود بر محور طولی شاه تیرهای پل است، مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۸، تغییرات نسبت V_α/V_0 در برابر زاویه‌ی بیه را برای شاه تیرهای داخلی و خارجی نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، در اثر افزایش زاویه‌ی بیه، برش در شاه تیرهای داخلی (در محل تکیه‌گاه‌های میانی پل) کاهش پیدا می‌کند. این کاهش تا

۱. در پل‌های ممتد مرکب بیه‌دار با بارگذاری کامیون آشتو در اثر افزایش زاویه‌ی



شکل ۸. نسبت بیشینه‌ی برش در محل تکیه‌گاه‌های پایه‌ی میانی ناشی از تحلیل المان محدود V_{α}/V_0 (تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران، دیاگرام عمود بر شاه‌تیر طولی).



شکل ۹. نسبت بیشینه‌ی برش در محل تکیه‌گاه‌های پایه‌ی میانی ناشی از تحلیل المان محدود، V_{α}/V_0 (تحت بار کامیون استاندارد آشتو، دیاگرام عمود بر شاه‌تیر طولی).

ضرایب توزیع لنگر D_m و ضرایب توزیع برش D_s ، در پایه‌ی میانی پل ممتد مرکب دو دهانه با استفاده از روابط ۱ و ۲ تعیین می‌شوند: [۸۷]

$$D_m = \frac{M}{M_{\max}} \quad (1)$$

$$D_s = \frac{V}{V_{\max}} \quad (2)$$

که در آن‌ها، V و M به ترتیب بیشینه‌ی نیروی برشی و لنگرهای خمشی در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی در پایه‌ی میانی پل ممتد مرکب ۲ دهانه تحت اثر یک خط، نصف بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران که در روی یک تیر مجزا به دست می‌آید. V_{\max} و M_{\max} بیشینه‌ی نیروی برشی و لنگر ناشی از تحلیل المان محدود در مدل‌سازی سه‌بعدی پل در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی است. در محاسبه‌ی ضرایب ذکر شده در بارگذاری آشتو از بار یک خط چرخ کامیون استاندارد آشتو برای مقادیر V و M استفاده شده است.

۱.۸. اثر زاویه‌ی تورب در ضرایب توزیع لنگر

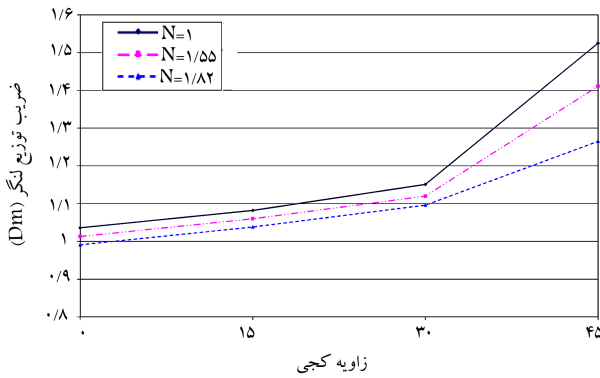
نتایج حاصل از تحلیل سه‌بعدی به روش المان محدود نشان داده است که ضرایب توزیع لنگر خمشی D_m در پایه‌ی میانی به‌طور چشم‌گیری در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی برای پل ممتد با نسبت‌های دهانه‌ی مختلف تحت بار عادی ایران افزایش یافته‌اند. شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب اثر زاویه‌ی بیه بر روی ضرایب توزیع لنگر در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، ضریب توزیع برای

بیه، نیروهای برشی پایه‌ی میانی در شاه‌تیرهای خارجی افزایش و در شاه‌تیرهای داخلی کاهش می‌یابد.

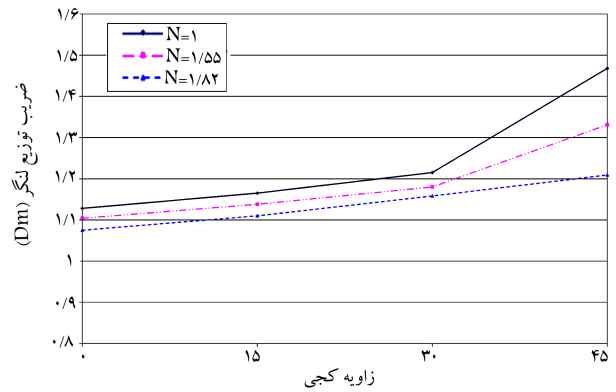
۲. با افزایش نسبت ابعادی (طول دهانه‌ی بزرگ‌تر به طول دهانه‌ی کوچک‌تر)، برش در پایه‌ی میانی کاهش می‌یابد.

۸. ضرایب توزیع لنگر و برش در پایه‌ی میانی

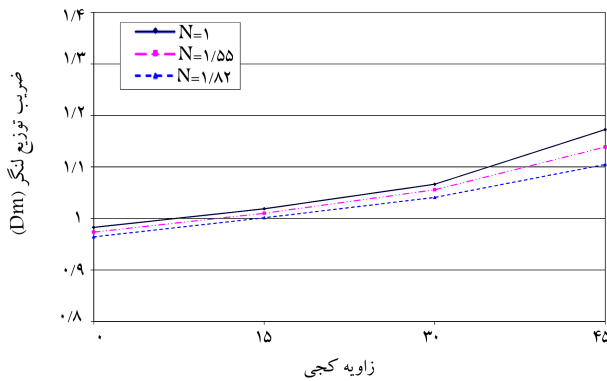
مطالعات وسیعی روی ضرایب توزیع لنگر و برش صورت پذیرفته است، برای مثال در سال ۱۹۹۶، ضرایب توزیع لنگر و برش در پایه‌ی میانی و وسط دهانه در پل ممتد دو دهانه‌ی بیه‌دار به دست آورده و روابطی برای ضرایب توزیع ارائه شده است. [۸۷] همچنین در سال ۲۰۰۶، اثر زاویه‌ی بیه، فاصله‌ی شاه‌تیرها، و طول دهانه بر روی ضرایب توزیع برش در بیش از ۲۰۰ مدل پل دال و تیر بررسی شده است. [۲۴] از مقایسه‌ی نتایج حاصل با ضرایب ارائه‌شده در مشخصات استاندارد آشتو و مشخصات ارائه‌شده در ضوابط LRFD، این نتیجه به‌دست آمده است که ضرایب توزیع برش در ضوابط LRFD در شاه‌تیرهای داخلی در پل با زوایای بیه‌ی بزرگ‌تر بسیار محافظه‌کارانه است. در مطالعات دیگری نیز بررسی‌هایی در ارزیابی ضرایب توزیع بار خطی آشتو در عرشه‌ها با شاه‌تیرهای I شکل، ضرایب توزیع در پل‌های باکس بتنی و ارزیابی روابط ساده‌شده در ضرایب توزیع انجام شده است. [۲۷-۲۵]



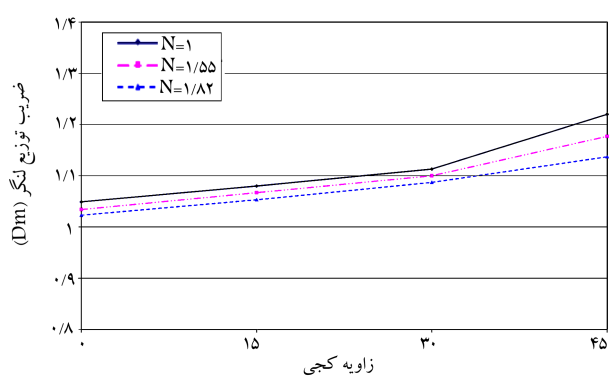
شکل ۱۲. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع لنگر در شاه‌تیرهای داخلی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو، دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی.



شکل ۱۰. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع لنگر در شاه‌تیرهای داخلی، تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران، دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی.



شکل ۱۳. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع لنگر در شاه‌تیرهای خارجی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو، دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی.



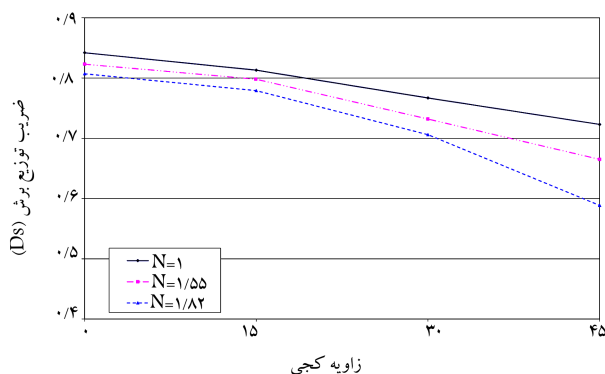
شکل ۱۱. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع لنگر در شاه‌تیرهای خارجی تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران، دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی.

۴۷٪ رسیده است. در حالی که افزایش این ضریب برای شاه‌تیرهای خارجی در نسبت ابعادی فوق تا زاویه‌ی بیه ۴۵ درجه در حدود ۲۰٪ بوده است. در هر حال کاهش لنگر در شاه‌تیرهای داخلی در اثر افزایش زاویه‌ی بیه بیشتر از شاه‌تیرهای خارجی است. بنابراین در طرح پل‌های بیه‌دار ممتد ۲ دهانه، شاه‌تیرهای خارجی کنترل‌کننده‌ی طرح خواهند بود. با مقایسه‌ی بارگذاری‌های آشتو و ایران در شاه‌تیرهای داخلی در زاویه‌ی بیه‌ی صفر می‌توان دریافت که ضریب توزیع برای بارگذاری ایران، ۸٪ بیشتر از بارگذاری آشتو بوده است.

۲.۸. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع نیروی برشی در پایه‌ی میانی
اثر تورب عرشه در ضرایب توزیع نیروی برشی (D_s)، در پایه‌ی میانی برای شاه‌تیرهای داخلی در پل تحت بارگذاری بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران در شکل ۱۴ نشان داده شده است، که مطابق آن افزایش ضریب D_s در شاه‌تیرهای داخلی تا زاویه‌ی بیه ۳۰ درجه کمتر از ۱۰٪ بوده و زمانی که زاویه‌ی بیه به ۴۵ درجه رسیده است، این ضریب به حدود ۲۰٪ افزایش پیدا کرده است. افزایش ضریب توزیع برش در شاه‌تیرهای داخلی معلوم می‌سازد که نیروهای برشی در پایه‌ی میانی با افزایش زاویه‌ی بیه در پل ممتد مرکب ۲ دهانه با نسبت‌های ابعادی مختلف کاهش پیدا می‌کند. برخلاف شاه‌تیرهای داخلی ضرایب توزیع برش در شاه‌تیرهای خارجی در پل ممتد ۲ دهانه تحت بارگذاری بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران در اثر افزایش زاویه‌ی بیه کاهش می‌یابد. شکل ۱۵، تغییرات ضریب D_s را نسبت به زاویه‌ی بیه نشان می‌دهد. این عامل برای هر ۳ نسبت ابعادی در نظر گرفته شده به‌طور محسوس در برابر افزایش زاویه‌ی

نسبت دهانه‌ی $N = 1$ در شاه‌تیرهای داخلی تا زاویه‌ی بیه ۳۰ درجه در حدود ۹٪ افزایش پیدا کرده و با افزایش زاویه‌ی بیه تا ۴۵ درجه به حدود ۳۴٪ رسیده است. شکل ۱۱، اثر زاویه‌ی بیه بر روی ضرایب توزیع لنگر پایه در نسبت‌های ابعادی مختلف را برای شاه‌تیرهای خارجی نشان می‌دهد. الگوی مشابهی بین ضرایب توزیع لنگر در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی وجود دارد. در هر حال افزایش ضریب D_m در شاه‌تیرهای خارجی تا زاویه‌ی بیه ۴۵ درجه در نسبت ابعادی $N = 1$ تقریباً ۱۷٪ بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که کاهش لنگر در شاه‌تیرهای داخلی بیشتر از شاه‌تیرهای خارجی در پل ممتد ۲ دهانه در اثر افزایش زاویه‌ی بیه است. ضریب توزیع لنگر در محل تکیه‌گاه‌های میانی پل ممتد با نسبت‌های دهانه، رابطه‌ی معکوس دارد. به عبارت دیگر، با افزایش نسبت ابعادی ضرایب توزیع کاهش می‌یابد. این اثر برای زوایای بزرگ‌تر از ۳۰ درجه محسوس‌تر است.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب اثر زاویه‌ی بیه بر روی ضرایب توزیع لنگر در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی در محل تکیه‌گاه‌های میانی پل ممتد ۲ دهانه با نسبت‌های ابعادی مختلف تحت بارگذاری بار کامیون استاندارد آشتو را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در این بارگذاری نیز با افزایش زاویه‌ی بیه، ضرایب توزیع در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی افزایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد تورب عرشه برای زوایای کمتر از ۳۰ درجه اثر قابل‌توجهی بر روی ضریب D_m نداشته و شیب نمودار توزیع لنگر تا زاویه‌ی مذکور برای هر ۳ نسبت ابعادی، یکمواخت بوده است. افزایش ضریب توزیع در شاه‌تیرهای داخلی تا زاویه‌ی ۳۰ درجه در حدود ۱۲٪ برای نسبت ابعادی $N = 1$ بوده و با افزایش زاویه تا ۴۵ درجه، به حدود



شکل ۱۷. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع برش در شاه‌تیرهای خارجی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو، دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی.

آشتو در شاه‌تیرهای داخلی در حدود ۰.۴٪ بیشتر از بارگذاری بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران است. ضریب D_s در شاه‌تیرهای خارجی با افزایش زاویه‌ی بیه کاهش می‌یابد، این کاهش برای زوایای بزرگ‌تر از ۳۰ درجه محسوس است، به طوری که در زاویه‌ی بیه ۴۵ درجه به حدود ۰.۲۳٪ رسیده است. در زاویه‌ی بیه صفر درجه تحت اثر بار کلی، نیروی برشی در شاه‌تیرهای داخلی بیشتر از شاه‌تیرهای خارجی است. در هر حال با افزایش زاویه‌ی بیه، نیروی برشی در شاه‌تیرهای خارجی افزایش پیدا می‌کند.

۹. دقت روش ساده‌شده در تحلیل پل‌های بیه‌دار ممتد

در سال ۱۹۹۰، روش ساده‌شده‌ی برای تحلیل عرشه‌های بیه‌دار ممتد با حالت آرایش دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی پیشنهاد شده است،^[۴] که می‌تواند برای پل‌هایی با بیش از ۵ عدد شاه‌تیر طولی به صورت محافظه‌کارانه مورد استفاده قرار گیرد. پیشینه‌ی لنگر طراحی طبق رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$M_d = M_0 \left(\frac{b}{D} \right) K I \quad (3)$$

که در آن، تمامی معادلات در سیستم SI و نیز M_d لنگر نهایی طراحی، M_0 پیشینه‌ی لنگر استاتیک ناشی از یک ردیف بار چرخ یا نصف بار معادل، (b/D) ضریب توزیع بار جانبی، K ضریب کاهش تورب عرشه، b فاصله‌ی شاه‌تیرها و I ضریب ضربه هستند.

ضریب ضربه بر مبنای آیین‌نامه‌ی آشتو و ایران به ترتیب مطابق روابط ۴ و ۵ است:

$$I = \frac{L + 53.24}{L + 38} \quad (4)$$

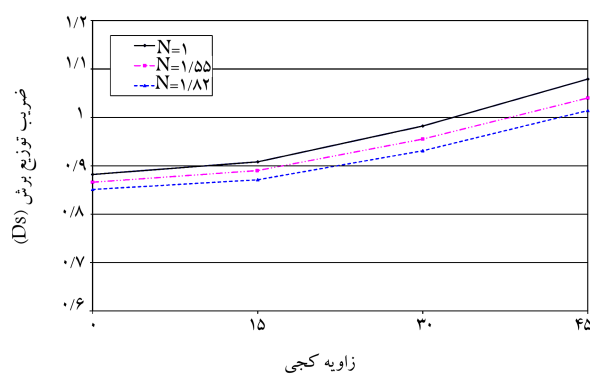
$$\delta = 1.3 - 0.05L - 1.5h \geq 1 \quad (5)$$

که در آن، L طول دهانه و h ارتفاع خاکریز روی پل برحسب متر است. ضریب کاهش تورب عرشه (K)، برای شاه‌تیرهای خارجی و داخلی به ترتیب طبق روابط ۶ و ۷ به دست می‌آید:

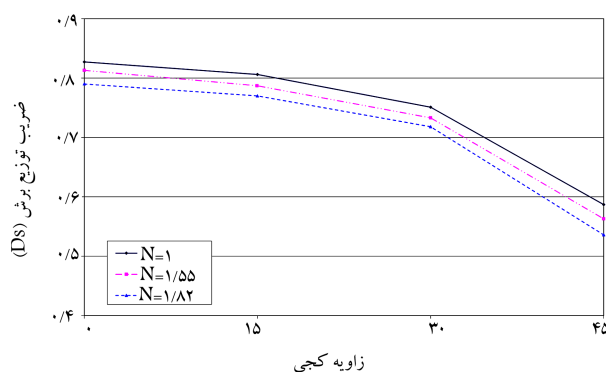
$$K = 0.886 + 0.131 \cos \alpha + \left(\frac{b}{aH} \right) (-12.4 + 11.3 \cos \alpha) \quad (6)$$

$$K = 0.858 + 0.164 \cos \alpha + \left(\frac{b}{aH} \right) (-16.8 + 17.7 \cos \alpha) \quad (7)$$

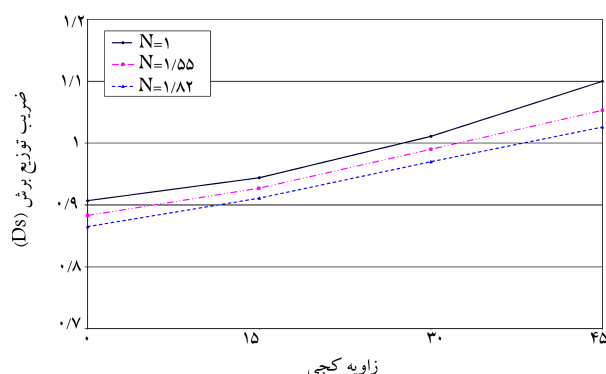
که در آن‌ها، b فاصله‌ی شاه‌تیرها، α زاویه‌ی تورب، a طول دهانه، و کمیت H عبارت است از سختی خمشی تیر مرکب به سختی خمشی عرضی دال در واحد عرض دهانه، که در مطالعاتی در سال ۱۹۹۰ ارائه شده است.^[۴]



شکل ۱۴. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع برش در شاه‌تیرهای داخلی، تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران، دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی.



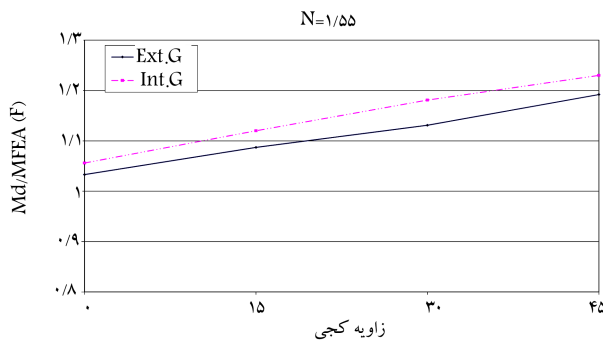
شکل ۱۵. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع برش در شاه‌تیرهای خارجی، تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران، دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی.



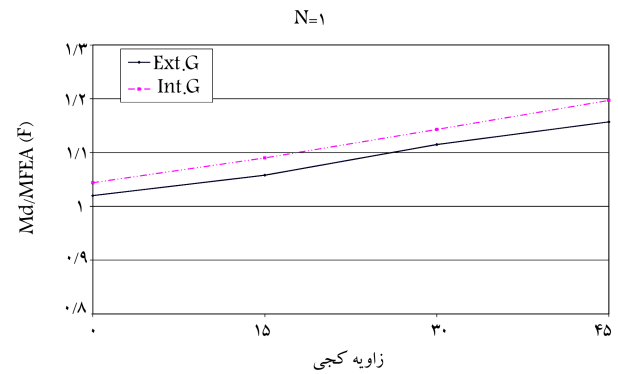
شکل ۱۶. اثر زاویه‌ی بیه در ضرایب توزیع برش در شاه‌تیرهای داخلی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو، دیافراگم عرضی عمود بر شاه‌تیر طولی.

بیه کاهش می‌یابد. به طوری که برای نسبت ابعادی $N = 1$ ، تا زاویه‌ی بیه ۳۰ درجه در حدود ۰.۸٪ کاهش نشان داده و این میزان با افزایش زاویه‌ی بیه محسوس‌تر شده و در زاویه‌ی ۴۵ درجه به حدود ۰.۲۵٪ رسیده است. کاهش ضریب توزیع در پایه‌ی میانی در شاه‌تیرهای خارجی نشان‌دهنده‌ی افزایش نیروی برشی در اثر افزایش تورب عرشه است.

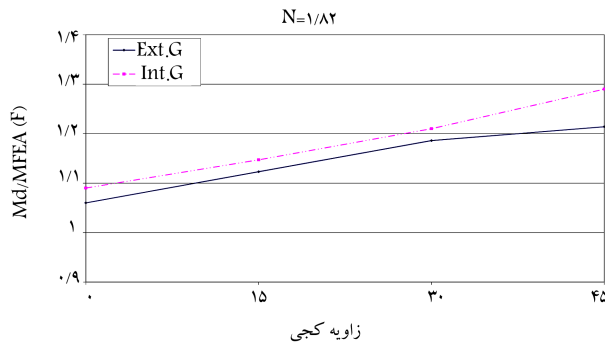
شکل‌های ۱۶ و ۱۷، به ترتیب تغییرات ضریب توزیع برش را برای شاه‌تیرهای داخلی و خارجی در برابر افزایش زاویه‌ی بیه تحت بارگذاری بار کامیون استاندارد آشتو نشان می‌دهد. روند تغییرات ضریب D_s در بارگذاری آشتو با الگویی مشابه بارگذاری ایران است. با این حال به نظر می‌رسد، افزایش ضریب توزیع در بارگذاری



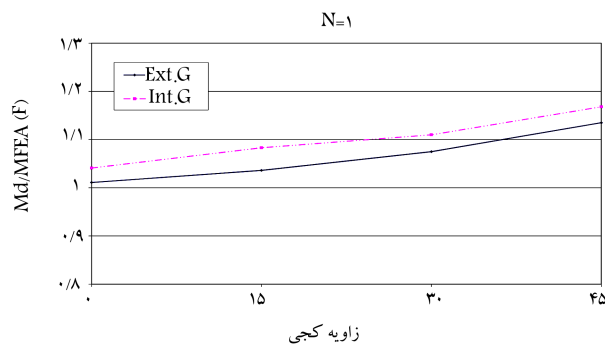
شکل ۱۹. نسبت لنگر ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی به لنگر تحلیل المان محدود (F)، در پل با ۲ باند ورودی، تحت بار عادی ایران برای نسبت ابعادی $N = 1/55$ در شاه‌تیرهای خارجی (Ext.G) و داخلی (Int.G).



شکل ۱۸. نسبت لنگر ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی به لنگر تحلیل المان محدود (F)، در پل با ۲ باند ورودی، تحت بار عادی ایران برای نسبت ابعادی $N = 1$ در شاه‌تیرهای خارجی (Ext.G) و داخلی (Int.G).



شکل ۲۰. نسبت لنگر ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی به لنگر تحلیل المان محدود (F)، در پل با ۲ باند ورودی، تحت بار عادی ایران برای نسبت ابعادی $N = 1/82$ در شاه‌تیرهای خارجی (Ext.G) و داخلی (Int.G).



شکل ۲۱. نسبت لنگر ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی به لنگر تحلیل المان محدود (F)، در پل با ۲ باند ورودی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو برای نسبت ابعادی $N = 1$.

و $1/82$ در پل ۲ دهانه تحت بارگذاری ۳ کامیون استاندارد آشتو را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در بارگذاری آشتو نیز مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی پیشنهادی در نسبت‌های دهانه‌ی موردنظر بیشتر از نتایج حاصل از تحلیل المان محدود است. در هر حال خطای رابطه‌ی ۳ برای نسبت ابعادی $N = 1$ در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی با افزایش زاویه‌ی بیه بیشتر شده است، به‌طوری‌که در زاویه‌ی بیهی صفر، اختلاف ۲ روش در حدود ۴٪ و با افزایش زاویه‌ی بیه به ۴۵ درجه به حدود ۱۳٪ برای شاه‌تیرهای داخلی رسیده است. به نظر می‌رسد خطای حاصل برای نسبت ابعادی $N = 1/55$ در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی

برای بررسی دقت روش ذکرشده، تلاش‌های خمشی در تکیه‌گاه‌های میانی پل تحت اثر بارگذاری بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران و بار کامیون استاندارد آشتو ناشی از تحلیل سه‌بعدی به روش اجزاء محدود با نتایج حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی مقایسه شده است. بنابراین نتایج به‌صورت نسبت لنگرهای خمشی رابطه‌ی پیشنهادی به لنگرهای خمشی روش المان محدود در مقابل زاویه‌ی بیه در شاه‌تیرهای خارجی (Ext. G) و شاه‌تیرهای داخلی (Int. G) بررسی شده است. ضریب تغییرات لنگر F نیز به‌صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود:

$$F = \frac{M_d}{M_{FEA}} \quad (8)$$

که در آن، M_d بیشینه‌ی لنگر طراحی در روش پیشنهادی و M_{FEA} بیشینه‌ی لنگر ناشی از تحلیل المان محدود است.

شکل ۱۸، تغییرات نسبت لنگر F را در مقابل زاویه‌ی بیه برای نسبت دهانه‌ی $N = 1$ نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد رابطه‌ی پیشنهادی، مقادیر بیشینه‌ی لنگرهای خمشی را بیشتر از نتایج تحلیل المان محدود تخمین می‌زند. در پل بدون بیهی متناظر، تحت بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران در شاه‌تیرهای داخلی، لنگر حاصل از معادله‌ی پیشنهادی ۵٪ بیشتر از نتایج تحلیل المان محدود است. این تفاوت با افزایش زاویه‌ی بیه بیشتر شده است، به‌طوری‌که در زاویه‌ی ۴۵ درجه به حدود ۱۶٪ رسیده است. استنباط می‌شود که خطا در شاه‌تیرهای خارجی کمتر از شاه‌تیرهای داخلی است.

شکل‌های ۱۹ و ۲۰، به ترتیب تغییرات نسبت لنگر F را برای نسبت‌های دهانه $N = 1/55$ ، $1/82$ در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، رابطه‌ی ۳ مقادیر لنگر خمشی را نسبت به تحلیل المان محدود بیشتر برآورد می‌کند. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت که نتایج رابطه‌ی پیشنهادی با نسبت‌های ابعادی ارتباط مستقیمی دارد. بیشینه‌ی خطا در نسبت ابعادی $N = 1/82$ در زاویه‌ی بیهی صفر به ترتیب در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی برابر با ۹٪ و ۶٪ بوده است، که با افزایش زاویه تا ۴۵ درجه، خطای رابطه‌ی ۳ به ترتیب به حدود ۲۱٪ و ۱۶٪ افزایش پیدا کرده است. بنابراین استفاده از رابطه‌ی مذکور در تحلیل پل‌های ممتد بیه‌دار ۲ دهانه منجر به مقادیری خواهد شد که محافظه‌کارانه و غیراقتصادی خواهد بود.

شکل‌های ۲۱ الی ۲۳، به ترتیب میزان خطا در بیشینه‌ی لنگر ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی را به نتایج تحلیل المان محدود در نسبت‌های ابعادی ۱، $1/55$

بیه در تلاش‌های خمشی و برشی و ضرایب توزیع برش و خمش در پل‌های ممتد مرکب بتنی - فولادی، با استفاده از روش تحلیل المان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مدل‌هایی از پل‌های ۲ دهانه با نسبت ابعادی مختلف جهت بررسی استفاده شده‌اند. نتایج حاصل تحت بارگذاری‌های بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران و بار کامیون استاندارد آشتو برای نسبت‌های لنگرهای خمشی، برشی، و ضرایب توزیع بیانگر این موارد هستند:

۱. تحت بارگذاری بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران و بار کامیون استاندارد آشتو، بیشینه‌ی لنگرهای خمشی در تکیه‌گاه‌های میانی پل ممتد مرکب ۲ دهانه در اثر افزایش زاویه‌ی بیه کاهش می‌یابد. تورب عرشه، تأثیر بیشتری در شاه‌تیرهای داخلی نسبت به شاه‌تیرهای خارجی دارند، این اثر برای زوایای بزرگ‌تر از ۳۰ درجه چشم‌گیر است.

۲. در طراحی پل‌های ممتد مرکب بیه‌دار، شاه‌تیرهای خارجی کنترل‌کننده‌ی طراحی از نقطه‌نظر لنگرهای خمشی تکیه‌گاه‌های میانی پل خواهند بود.

۳. آرایش دیاگرام‌های عرضی تأثیر به‌سزایی در توزیع تلاش‌های خمشی دارند. این تأثیر در زوایای مختلف بیه متفاوت خواهد بود. آرایش دیاگرام‌های عرضی عمود بر محور طولی شاه‌تیر، بهترین آرایش برای ضرایب توزیع لنگر در پل‌های مورب به لحاظ کاهش بیشتر در لنگر خمشی است.

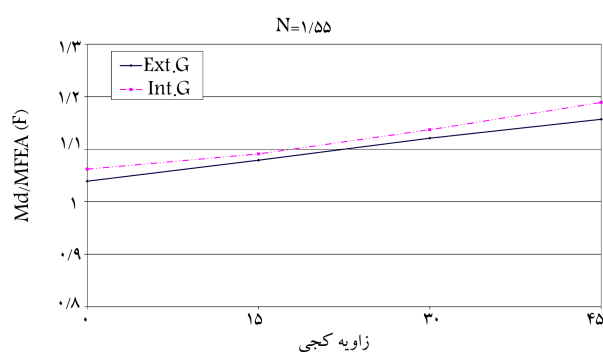
۴. کاهش لنگر در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی در اثر بار کامیون استاندارد آشتو، بیشتر از بارگذاری حاصل از بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران در پل متناظر است؛ در نتیجه، نتایج بارگذاری آیین‌نامه‌ی ایران نسبت به بارگذاری آیین‌نامه‌ی آشتو در پل‌های بیه‌دار ممتد ۲ دهانه محافظه‌کارانه‌تر خواهد بود.

۵. در پل‌های ممتد مرکب بیه‌دار ۲ دهانه تحت بارگذاری بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران و بار کامیون استاندارد آشتو، بیشینه‌ی نیروی برشی در محل تکیه‌گاه میانی پل در شاه‌تیرهای خارجی افزایش و در شاه‌تیرهای داخلی کاهش می‌یابد.

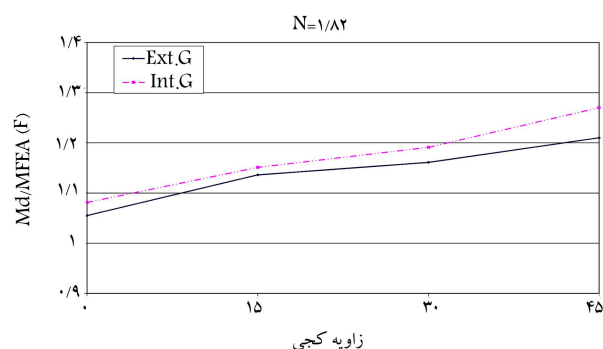
۶. با افزایش نسبت دهانه، نیروی برشی در پایه‌ی میانی برای هر ۲ بارگذاری مذکور کاهش می‌یابد. در حالت کلی، در حالت آرایش دیاگرام‌های عرضی موازی خطوط تکیه‌گاهی و زاویه‌ی بیه، تورب عرشه تأثیر چندانی در نیروی برشی در تکیه‌گاه‌های میانی پل ممتد مرکب بیه‌دار در شاه‌تیرهای خارجی و داخلی ندارد.

۷. رابطه‌ی پیشنهادی در تحلیل عرشه‌های بیه‌دار ممتد، لنگرهای خمشی طولی در پایه‌ی پل‌های بیه‌دار را نسبت به لنگرهای حاصل از تحلیل المان محدود، در هر ۲ بارگذاری آشتو و آیین‌نامه‌ی ایران، بیشتر برآورد می‌کند. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از نتایج رابطه‌ی مذکور محافظه‌کارانه است.

۸. خطای حاصل رابطه‌ی ساده‌شده در شاه‌تیرهای داخلی بیشتر از شاه‌تیرهای خارجی است، به طوری که در زاویه‌ی بیه‌ی ۴۵ درجه در نسبت ابعادی ۱،۷۸۲، خطای ذکرشده در شاه‌تیرهای داخلی در بارگذاری آشتو، ۸٪ بیشتر از شاه‌تیرهای خارجی است.



شکل ۲۲. نسبت لنگر ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی به لنگر تحلیل المان محدود (F)، در پل با ۲ باند ورودی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو برای نسبت ابعادی $N = 1/55$.



شکل ۲۳. نسبت لنگر ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی به لنگر تحلیل المان محدود (F)، در پل با ۲ باند ورودی، تحت بار کامیون استاندارد آشتو برای نسبت ابعادی $N = 1/82$.

تقریباً نزدیک به هم بوده و به بیشینه‌ی ۱۵٪ در زاویه‌ی بیه‌ی ۴۵ درجه رسیده است. در مورد بارگذاری آشتو نیز خطای رابطه‌ی ۳ با نسبت‌های ابعادی ارتباط مستقیمی دارد، به طوری که بیشینه‌ی خطا در نسبت دهانه‌ی $N = 1/88$ بوده و به حدود ۲۲٪ و ۱۷٪ به ترتیب در شاه‌تیرهای داخلی و خارجی رسیده است.

با مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به ۲ حالت بارگذاری می‌توان دریافت که خطای حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی برای بارگذاری بار کامیون استاندارد آشتو کمتر از بار عادی آیین‌نامه‌ی ایران است. تفاوت این خطا برای دو بارگذاری فوق در حدود ۴٪ است.

۱۰. نتیجه‌گیری

با توجه به نقصان معیارهای آیین‌نامه‌ی طراحی پل‌های ممتد مورب، اثر زاویه‌ی

پانوشته‌ها

1. moving load
2. linear multi-step static

منابع (References)

1. AASHTO, *Standard Specification for Highway Bridges*, Washington D.C., AASHTO (2003).

2. Ontario Ministry of Transportation and Comm., *Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC)*, 3rd ed., Downsview, Ontario: Highway Engineering Division, OMTC (1992).
3. AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications*, 5th Ed., Washington DC.: AASHTO (2010).
4. Khaleel, M.A. and Itani, R. "Live-load moment for continuous Skew bridge", *Journal of Structural Engineering*, **116**(9), pp. 2361-2373 (1990).
5. Helba, A. and Kennedy, J. "Parametric study on the collapse loads of Skew composite bridge", *Journal of Structural Engineering*, **120**(5), pp. 1415-1433 (1994).
6. Huang, H., Shenton, H. and Chajes, M. "Load distribution for a highly skewed bridge, testing and analysis", *Journal of Bridge Engineering*, **9**(6), pp. 558-562 (2004).
7. Ebeido, T. and Kennedy, J. "Girder moment in continuous Skew composite bridge", *Journal of Bridge Engineering*, **1**(1), pp. 37-44 (1996).
8. Ebeido, T. and Kennedy, J. "Shear and reaction distributions in continuous Skew composite bridges", *Journal of Bridge Engineering*, **1**(4), pp. 155-165 (1996).
9. Khaloo, A. and Mirzabozorg, H. "Load distribution factor in simply supported Skew bridge", *Journal of Bridge Engineering*, **8**(4), pp. 241-244.
10. Ashebo, B.D. and Tommy, H. "Evaluation of dynamic load on a Skew box girder continuous bridge", *Journal of Structural Engineering*, **29**(6), pp. 1052-1063 (2006).
11. Menassa, C., Mabsout, M., Tarhini, K. and Frederick, G. "Influence of skew angle on reinforced concrete slab bridge", *Journal of Bridge Engineering*, **12**(2), pp. 205-214 (2007).
12. Zokaie, T., Osterkamp, T.A. and Imbsen, R.A. "Distribution of wheel loads on highway bridges", Transportation Research Record 1290, Transportation Research Board, Washington D.C. (1991).
13. Ashebo, D., Chan, T.H.T. and Ling, Y. "Evaluation of dynamic load on a skew box girder continuous bridge. Part I: Field test and modal analysis", *Journal of Structural Engineering*, **29**(6), pp. 1052-1063.
14. Nouri, G. and Ahmadi, Z. "Influence of Skew angle on continuous composite girder bridge", *Journal of Bridge Engineering*, **17**(4), pp. 617-623 (2012).
15. Hea, X., Shenga, X., Scanlonb, A., Linzellb, D. and Yua, X. "Skewed concrete box girder bridge static and dynamic testing and analysis", *Engineering Structures*, **39**, pp. 38-49 (2012).
16. Bishara, A., Liu, M. and El-Ali, N. "Wheel load distribution on simply supported Skew I-beam composite bridges", *Journal of Structural Engineering*, **119**(2), pp.399-419 (1993).
17. *The Code of Practice for the Analysis and Design of Concrete Bridges*, The Islamic Republic of Iran, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Tehran (2008).
18. *Standard Loads for Bridges*, The Islamic Republic of Iran, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision (2000).
19. Hays, C.O., Sessions, L.M. and Berry, A. "Further studies on lateral load distribution using a finite element method", Washington D.C., Transportation Research Record 1072, Transportation Research Board, pp. 6-14 (1986).
20. Imbsen, R.A. and Nutt, R.V. "Load distribution study on highway bridges using STRUDL FEA", in *Proc., Conf. on Computing in Civil Engineering*, Atlanta (1978).
21. Brockenbrough, R.L. "Distribution factors for curved I-girder bridges", *Journal of Structural Engineering*, **112**(10), pp. 2200-2215 (1986).
22. Tarhini, K.M. and Frederick, G.R. "Wheel load distribution in I-girder highway bridges", *Journal of Structural Engineering*, **118**(5), pp. 1285-1294 (1992).
23. I. Computers and Structures, *SAP2000 User's Manual*, Berkeley, CA: (CSI) (2000).
24. Barr, P.J. and Amin, M.D.N. "Shear live-load distribution factors for I-girder bridges", *Journal of Bridge Engineering*, **11**(2), pp. 197-204 (2006).
25. Cai, C.S. "Discussion on AASHTO LRFD load distribution factors for slab-on-girder bridge", *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, **10**(3), pp. 171-176 (2005).
26. Hughs, E. and Idriss, R. "Live-load distribution factors for prestressed concrete, spread box-girder bridge", *Journal of Bridge Engineering*, **11**(5), pp. 573-581 (2006).
27. Puckett, J.A., Huo, X.S., Patrick, M.D., Jablin, M.C., Mertz, D. and Peavy, M.D. "Simplified live load distribution factor equations for bridge design", *Transp. Res. Rec.*, **11**(5), pp. 67-78 (2008).