

## آنالیز سازه و طراحی پلهای بتنی مسلح براساس روش های متداول مدلسازی و تاثیر این روشها بر طراحی

نهایی سازه

محمود شریعت نیا

کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان

### چکیده

طراحی نوین پل های بتنی مسلح غالباً بر پایه آنالیز الاستیک خطی استوار است که رویکردی کارآمد جهت محاسبه دقیق توزیع نیروها در سطح مقطع سازه محسوب می گردد. در پروژه های زیربنایی، ارزیابی پاسخ سازه به نیروهای وارده عموماً با بهره گیری از مدل سازی های پیشرفته نظیر روش اجزای محدود در فضای سه بعدی انجام می پذیرد تا توزیع نیروهای داخلی در هر دو امتداد طولی و عرضی با بالاترین سطح دقت ممکن برآورد شود. با توسعه روزافزون نرم افزارهای تجاری مبتنی بر روش اجزای محدود، رویکرد مدل سازی سه بعدی به منظور پیش بینی رفتار کلی و یکپارچه پل ها به طور چشمگیری مورد توجه مهندسان محاسب قرار گرفته است و فرآیند ایده آل سازی سازه ها را تسهیل نموده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی جامع، مقایسه تحلیلی و تعیین تمایز میان تکنیک های مختلف تحلیل سه بعدی اجزای محدود در ارزیابی سازه های پل های دال بتنی مسلح انجام شده است تا در نهایت رویکردی بهینه برای طراحی معرفی گردد. در این راستا، مدل سازی های متنوعی بر اساس مشخصات هندسی و مکانیکی پل های واقعی و از پیش ساخته شده توسعه یافتند و خروجی های تحلیلی آنها با نتایج معتبر حاصل از آزمایش های میدانی بر روی سازه های حقیقی مورد قیاس و ارزیابی قرار گرفتند تا بهترین تکنیک مدل سازی انتخاب گردد. یافته های این پژوهش به روشنی حاکی از آن است که برآیند نیروهای داخلی توزیع شده در سطح مقطع دال و همچنین مقادیر نهایی طراحی آرماتورهای پل، اختلاف بسیار ناچیز و قابل اغماضی را در میان تکنیک های مختلف مدل سازی نشان می دهند. بر این اساس، انتخاب نوع مدل سازه ای تأثیر بنیادینی بر خروجی های محاسباتی در فاز طراحی نهایی ندارد؛ لذا در انتخاب مدل بهینه، ضرورت دارد که بر سایر پارامترهای حائز اهمیت نظیر سهولت در ساخت مدل، قابلیت صحت سنجی آسان، سادگی کاربرد عملی و قابلیت اعتماد نتایج تمرکز نمود که می توانند روند طراحی مهندسی را به میزان قابل توجهی بهبود بخشند. افزون بر این، ارزیابی ها نشان دهنده خلأ ملموس و فقدان دستورالعمل های مدون در زمینه پروسه مدل سازی پل های دال بتنی مسلح است. تدوین یک راهنمای جامع و استاندارد در این حوزه می تواند ضمن ارتقای دقت طراحی و کمک شایان به مهندسان طراح، بستر مناسبی را برای یکپارچه سازی و تجاری سازی این فرآیندهای تحلیلی فراهم آورد.

واژگان کلیدی: آنالیز سازه، طراحی پل ها، سازه بتنی مسلح، روش اجزای محدود، طراحی مدل سازی، نرم افزار آباکوس.

## مقدمه :

طراحی پل‌های دال بتنی مسلح به طور متداول بر اساس آنالیز دقیق سازه‌ها انجام می‌شود تا ایمنی، سرویس‌دهی و کارایی آن‌ها در طول عمر مفید تضمین گردد. هدف اصلی از این آنالیز، تعیین دقیق نیروهای داخلی توزیع شده در سطح مقطع پل است، به طوری که معادلات بنیادی تعادل ارضا شده و مقادیر محاسبه شده بتوانند به عنوان مبنایی قابل اتکا برای طراحی سازه مورد استفاده قرار گیرند. در تحلیل‌های سنتی و قدیمی، مهندسان طراح برای آنالیز سازه بیشتر بر مدلسازی‌های ساده و تقریب‌های ریاضی تکیه می‌کردند. به عنوان مثال، دال بتنی فوقانی پل را با یک تیر ساده معادل نموده و کل شبکه پیچیده نیروها را در قالب یک مدل دو بعدی تحلیل می‌کردند. این مدل به طور طبیعی و ذاتی قادر به بیان توزیع دقیق و واقعی نیروها در سطح مقطع پل نبود و توزیع نیروها، به ویژه در امتداد عرضی دال، به طور مشخص با تقریب‌های محافظه‌کارانه یا گاهاً غیردقیق انجام می‌گرفت. بنابراین، طراحی بر اساس این مدل معادل دو بعدی در واقع یک تحلیل الاستیک خطی کامل و جامع از سازه به حساب نمی‌آمد، هرچند که در گذشته فرض بر این بود که طراحی بر اساس این روش‌های ساده‌سازی شده ممکن است بتواند نیازهای حداقل برای طراحی در حالات حدی نهایی را، به ویژه بعد از بازتوزیع کافی نیروها در مرحله پلاستیک سازه، برآورد نماید (یوال‌اس). با گذشت زمان و افزایش روزافزون حجم ترافیک و پیچیدگی بارگذاری‌ها، نیاز به دقت بالاتر در طراحی سازه‌های زیربنایی به شدت احساس شد. بر اساس آخرین ویرایش‌های آیین‌نامه‌های معتبر، از جمله آیین‌نامه طراحی پل‌های بتنی ایران و آیین‌نامه طراحی پل آمریکا، نیازهای طراحی و معیارهای حداقل پایداری برای پل‌ها تغییرات بنیادین و قابل توجهی داشته است (آشتو ال‌آرفادی ۲۰۲۰). در رویکردهای نوین، مدلسازی دقیق از پل برای تحلیل سازه نه تنها یک مزیت، بلکه یک الزام است که می‌تواند پاسخ سازه‌ای پل به نیروهای وارده را به طور کامل و با جزئیات بالا تعیین نماید. در عمل، استفاده از مدل دو بعدی پل که بر اساس معادل نمودن هندسه پیچیده پل با یک تیر ساده استوار بود، دیگر کارساز نبوده و لزوماً استفاده از مدل‌های جامع سه بعدی برای آنالیز رفتار پل توصیه می‌گردد. اگرچه مفهوم مدل سه بعدی برای طراحی پل‌ها با درجات آزادی متغیر از مدت‌ها قبل در پروژه‌های خاص مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما این روش به تازگی به عنوان یک نیاز و استاندارد اصلی در طراحی پل‌ها در نظر گرفته شده است.

برای ارضای این نیازهای سخت‌گیرانه طراحی، مدل‌های نرم‌افزاری جدیدی از پل‌ها برای آنالیز سازه ارائه گردید. به طور کلی، این مدل‌های نوین بسیار پیشرفته‌تر، حرفه‌ای‌تر و از نظر مدلسازی شرایط مرزی، ایده‌آل‌تر از مدل‌های سنتی گذشته می‌باشند. به عنوان نمونه، در مدلسازی سه بعدی مبتنی بر روش اجزای محدود، طراحان با شبکه پیچیده‌ای از المان‌ها و تعداد بسیار زیادی از درجات آزادی در مدلسازی پل سروکار دارند که رفتار واقعی سازه را شبیه‌سازی می‌کند. با این حال، انتخاب بین تکنیک‌های مدلسازی در نرم‌افزارهای امروزی بسیار وسیع است و از این رو، یک سازه کاملاً مشابه می‌تواند به چندین روش مختلف مدلسازی و تحلیل گردد. مسئله اساسی این است که امروزه، روش تدوین شده و مشخصی به عنوان دستورالعمل کلی برای طراحان وجود ندارد که الزاماً همه مهندسان از آن به عنوان منبع اصلی و بدون خطا برای مدلسازی سه بعدی سازه پل استفاده نمایند. در نتیجه، مشکلات و ابهاماتی که مهندسان طراح در هنگام انتخاب روش مدلسازی سه بعدی با آن‌ها برخورد می‌نمایند، تاکنون به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق، هدف اصلی مطالعه، بررسی و حذف بعضی از اثرات مخرب این انتخاب‌های سلیقه‌ای در مدلسازی سه بعدی پل‌های دال بتنی مسلح می‌باشد.

جهت بررسی برآیند تفاوت‌ها بین تکنیک‌های مختلف مدلسازی، یک پل یکپارچه بتنی به عنوان نمونه موردی در این پژوهش ارزیابی خواهد شد. این پل بر اساس روش‌های مختلف مدلسازی طراحی می‌گردد. نیروهای داخلی در سطح مقطع پل و برآیندهای طراحی در مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می‌گردند تا بتوان اثر انتخاب تکنیک‌های مدلسازی در مرحله طراحی پل را به وضوح بررسی نمود. مدل‌های ساخته شده بر اساس پیشینه تحقیق انجام شده در مقالات متعدد و کتاب‌های طراحی پل بنا شده‌اند. روش کلی مدلسازی بر اساس روش‌های اجزای محدود بوده و طراحی‌ها بر مبنای کتاب‌های طراحی پل‌های بتنی مسلح پیش می‌روند. در این راستا، از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود جهت

تحلیل استفاده شده است (بریگید/پلاس ۳.۴.۵). هسته پردازشی این نرم افزار بر اساس نرم افزار قدرتمند تجاری دیگری عمل می نماید (آباکوس). از طرفی، از محیط نرم افزاری اختصاصی برای ترسیمات گرافیکی مدل استفاده می گردد (آباکوس سی ای ئی). همچنین برای اعمال بارهای جاده ای، ترافیکی و ترکیبی از نرم افزار اصلی استفاده خواهد شد. لذا این نرم افزار مکمل که توسط شرکت توسعه دهنده ارائه شده است، به عنوان یک نرم افزار پوششی در مدلسازی پل و اعمال بارهای آیین نامه ای، قابلیت ساده سازی فرآیند را فراهم می آورد (اسکانکوت تکنولوژی ای بی، ۲۰۱۰).

باید توجه داشت که این پژوهش با محدودیت هایی همراه است. پل های مدلسازی شده در این تحقیق بر اساس ترکیبات بار ساده شده در حالات حدی نهایی ارزیابی می شوند. این بارها شامل وزن خود سازه، بارهای روسازی، خزش، فشار زمین، سربارهای آیین نامه پل ایران، بارهای یکنواخت تغییر دما در دال پل، بار باد و بارهای ترافیکی می باشند (آشتو ال آراف دی ۲۰۲۰). از آنجا که طبق آیین نامه های متداول ایران طراحی سازه های بتنی پل بر اساس آنالیز الاستیک خطی انجام می شود، آنالیز غیرخطی در این تحقیق لحاظ نگردیده است. افزون بر این، به دلیل محدودیت زمان، تمرکز پژوهش صرفاً بر بخش فوقانی پل و محاسبه آرماتورهای طولی و عرضی اصلی عرشه معطوف است و نتایج بخش تحتانی با وجود مدلسازی، در آنالیزها ارائه نشده است. در نهایت، این مقاله به طور ویژه نحوه اثرگذاری انتخاب سیستم مدلسازی بر خروجی ها و میلگردگذاری پل های بتنی را بررسی می نماید.

## ۲. مبانی نظری

### ۲-۱ تحلیل سازه ها برای پلهای بتنی مسلح

هدف اصلی از تحلیل سازه ها، ارزیابی دقیق پاسخ سازه به نیروهای وارده است که هم در طراحی سازه های جدید و هم در ارزیابی سازه های موجود کاربرد دارد. در فرآیند طراحی، یکی از مقاصد اساسی، تعیین توزیع نیروهای داخلی در سطح مقطع سازه است؛ در حالی که در بررسی سازه های موجود، هدف اصلی اطمینان از ظرفیت باربری و توانایی سازه در تحمل نیروهای وارده می باشد. به منظور انجام این تحلیل ها، آیین نامه های معتبر طراحی سازه های بتنی نظیر آیین نامه اروپا (یوروکد ۲، اس اس-ای ان ۲-۱۹۹۲، ۲۰۰۵) و آیین نامه بتن آمریکا (ای سی آی، ۲۰۲۰) چهار روش استاندارد را برای آنالیز سازه ارائه نموده اند. این رویکردها شامل آنالیز الاستیک خطی، آنالیز الاستیک خطی با باز توزیع محدود، آنالیز پلاستیک و آنالیز غیرخطی می باشند.

در میان روش های یاد شده، تنها آنالیز غیرخطی قادر است پاسخ سازه ها را در حین بارگذاری با دقت بسیار بالا پیش بینی کرده و پدیده پیچیده باز توزیع نیروها را در زمان ترک خوردگی بتن و تسلیم میلگردها به خوبی تبیین نماید (انگوستورم ۲۰۱۱ الف). به بیان دیگر، محاسبه دقیق رفتار سازه در وضعیت سرویس دهی و همچنین بررسی خرابی در حالت حدی نهایی، منحصراً از طریق تحلیل غیرخطی امکان پذیر است. با این وجود، بهره گیری از این روش مستلزم صرف زمان و تلاش فراوان برای مدل سازی، انجام محاسبات سنگین برای دستیابی به همگرایی و بر خورداری از دانش تخصصی عمیق است. علاوه بر این، روش غیرخطی به تنهایی برای طراحی سازه های جدید کاربرد ندارد، زیرا دستورالعمل مدون و تایید شده ای در آیین نامه ها برای آن ارائه نشده است و مهم تر از همه، در مدل سازی سازه های بتنی مسلح به روش غیرخطی، امکان استفاده از اصل جمع آثار قوا (سوپرپوزیشن) وجود ندارد؛ اصلی که برای طراحی پل های بتنی مسلح تحت اثر ترکیب های گوناگون بارگذاری، حیاتی و اجتناب ناپذیر محسوب می شود.

هنگام آنالیز سازه در مرحله طراحی، هدف اصلی تهیه توزیع واقعی و مطلوب نیروها بر سطح مقطع سازه می باشد به طوریکه معادلات تعادل ارضا شده و بتواند برای طراحی سطح مقطع در حالات حد نهایی مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که بیشتر سازه های پل از نظر سازه ای نامعین می باشند، تعداد نامنتهای معادلات باید تحلیل گردد که به طور طبیعی بسیاری از مقادیر نمی توانند در طراحی سازه مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲-۲ مدل سازی الاستیک خطی

در یک مدل خطی الاستیک فرض می شود که رفتار سازه بصورت خطی وابسته به بارهای وارده می باشد. این روند بعنوان روشی برای ساده سازی مسائل تحلیل سازه های بتن مسلح شناخته می شود. مدل خطی الاستیک فقط بعنوان توزیع درست از نیرو تحت شرایط معین مانند شرایط مقطع ترک نخورده می باشد. این شرایط در واقع هیچگاه در عمل برقرار نخواهند بود زیرا سازه های بتنی اغلب حتی تحت بارهای بسیار ناچیز نیز دچار ترک می شوند. به طور طبیعی، بتن ترک خورده و باز توزیع نیروها در سازه اتفاق می افتند (سازه ها به طور ذاتی در حالت استاتیک قابلیت باز توزیع نیرو را دارا می باشند). در نتیجه این عوامل، طراحان سازه می توانند توزیع نیروها در سازه در حالات حد نهایی را در نظر بگیرند. سازه سپس، به میزان کافی ظرفیت پلاستیک دورانی را تامین و ظرفیت مقطع براساس آن بالا می رود.

## ۲-۳ روش اجزا محدود و فرمولبندی المانها

مدل اجزای محدود (افئ ام) یک روش جامع و کارآمد برای حل معادلات دیفرانسیل است که به شکلی مطلوب در تحلیل سازه های مهندسی به کار می رود. این روش با تجزیه سازه های بزرگ به اجزای کوچک تر به نام «المان» و تدوین معادلات حاکم بر آن ها، امکان تحلیل دقیق رفتار سازه را فراهم می آورد. از آنجا که نوع پیکربندی و معادلات حاکم بر المانها تأثیر مستقیمی بر نتایج تحلیل دارند، طراحان نیازمند دانش عمیقی در این زمینه هستند. به طور کلی، المانهای کاربردی در این روش به سه دسته پیوسته، سازه ای و خاص تقسیم می شوند. المانهای پیوسته (مانند المانهای سه بعدی سالیید و تنش/ کرنش صفحه ای دوبعدی)، سازه را به عنوان یک جسم یکپارچه در نظر گرفته و با تکیه بر وضعیت تنشها، رفتار واقعی آن را به دقت توصیف می کنند. با این وجود، خروجی های حاصل از این نوع المانها بسیار حجیم بوده و استفاده از آن ها در طراحی سازه های بتن آرمه چالش برانگیز است؛ زیرا طراحی این سازه ها غالباً بر اساس نیروهای مقطع انجام می پذیرد و بهره گیری از المانهای حجمی نیازمند انتگرال گیری روی سطح مقطع برای دستیابی به عکس العمل های تکیه گاهی و مقاطع است.

در مقابل، المانهای سازه ای بر پایه معادلات مستخرج از تئوری های تیر، ورق و پوسته عمل می کنند و به دلیل محاسبه مستقیم نیروهای داخلی در هر سطح مقطع، ابزارهایی بسیار کارآمد در فرآیند طراحی محسوب می شوند. این المانها (مانند استفاده از المان تیر برای ستونها و المان پوسته یا شل برای دال فوقانی) شرایط مدل سازی را به مراتب ساده تر و بهینه تر می کنند (شکل ۲-۲). فرضیات بنیادین در این المانها مبتنی بر تئوری های کلاسیک (نظیر تئوری برنولی) است که توزیع خطی کرنش در سطح مقطع را مفروض می دانند؛ به این معنا که مقاطع مسطح پس از بارگذاری نیز مسطح باقی می مانند. با این حال، این فرضیات در نواحی خاصی از سازه مانند گوشه قابها، تیرهای عمیق و اطراف بازشوها که توزیع کرنش از حالت خطی خارج می شود، با محدودیت روبه رو هستند؛ چالشی که مهندسان با به کارگیری تکنیک های جبرانی در بخش های آتی مقاله به رفع آن می پردازند. در نهایت، المانهای خاص نیز به منظور شبیه سازی شرایط ویژه ای در مدل، نظیر اندرکنش بین سازه و فونداسیون، مورد استفاده قرار می گیرند.

## ۳. روش پژوهش

پاسخ سازه های بتن مسلح به دلیل ترک خوردگی بتن و تسلیم میلگردها ماهیتاً غیرخطی است (پلوس، ۱۹۹۶). با وجود ناتوانی مدل الاستیک خطی در توصیف دقیق این رفتار، با اتکا به قابلیت باز توزیع نیروها در سازه های دارای شکل پذیری و ظرفیت دوران پلاستیک کافی، می توان از این روش در طراحی حالات حدی نهایی استفاده نمود. در این شرایط، سازه می تواند پیش از رسیدن به مکانیزم نهایی خرابی، از تمام ظرفیت مقاطع بحرانی خود بهره برده و مقاطع ضعیف تر با تسلیم شدن، نیروها را به درستی باز توزیع کنند. در نتیجه، طراحی بر مبنای آنالیز الاستیک خطی با این فرض که مقطع برای رسیدن به ظرفیت نهایی خود تنها به دوران پلاستیک اندکی نیاز دارد، رویکردی مطلوب ارزیابی می شود (ایکستروم، ۲۰۱۱ الف).

## ۱-۳. مقطع بحرانی

موقعیت مقطع بحرانی مستقیماً به مد شکست سازه وابسته است. در اتصالات صلب نظیر گوشه قاب‌ها یا محل اتصال به ستون‌ها و دیوارها، ترک‌های خمشی بحرانی در امتداد بر تکیه‌گاه شکل می‌گیرند؛ از این رو، طراحی خمشی برای لنگرهای الاستیک در همین سطح کفایت می‌کند (پلهای پایدار، ۲۰۰۷). در مقابل، ترک‌های برشی بحرانی با زاویه تقریبی ۴۵ درجه فرض شده و مقطع بحرانی برش در فاصله‌ای معادل بازوی مقاوم داخلی از بر تکیه‌گاه (پلهای پایدار، ۲۰۰۷) یا در فاصله‌ای تقریباً برابر با ضخامت عضو در نظر گرفته می‌شود (رومباچ، ۲۰۰۴). نیروهای برشی موجود در حد فاصل این مقطع تا تکیه‌گاه، مستقیماً منتقل شده و برای شکست برشی بحرانی تلقی نمی‌گردند.

## ۲-۳. بازتوزیع لنگر خمشی

پدیده بازتوزیع لنگرها که از رفتار غیرخطی مقطع پس از ترک خوردگی و تسلیم آرماتورها نشأت می‌گیرد، شرایط مقطع را با تحلیل الاستیک خطی قابل مقایسه می‌سازد (انگوستورم، ۲۰۱۱ الف). در دال‌های بتنی، این روند با تبدیل لنگرهای پیچشی به خمشی پس از ترک خوردگی (مرحله دوم رفتار مقطع) همراه بوده و بازتوزیع نیروها میان تکیه‌گاه‌ها و وسط دهانه، و همچنین بین امتداد میلگردهای اصلی و ثانویه رخ می‌دهد. مطابق با استانداردهای معتبر طراحی نظیر آیین‌نامه اروپا (اس-اس-ان ۱-۱۹۹۲، ۲۰۰۸) و آیین‌نامه بتن آمریکا (ای-سی-آی)، حد مجاز این بازتوزیع به میزان نیاز دوران پلاستیک و شکل‌پذیری مقطع بستگی دارد. در صورت انجام طراحی بر این مبنا، میزان شکل‌پذیری بر اساس نسبت عمق ناحیه فشاری بتن ( $X_u$ ) به عمق موثر مقطع ( $d$ ) از طریق روابط محاسبه می‌گردد. علاوه بر آن، شکل‌پذیری میلگردهای فولادی باید براساس رابطه زیر مجاز به بازتوزیع به مقدار کافی باشند.

## ۳-۳. طراحی تیرها

طراحی المان‌های تیر می‌تواند بر مبنای نیروهای مقطع حاصل از تحلیل الاستیک خطی یا تحلیل غیرخطی انجام پذیرد (پلهای پایدار ۲۰۰۷). تعادل لنگرهای وارده در مقطع، از طریق تشکیل یک کوپل نیرو شامل مقاومت فشاری بتن و مقاومت کششی میلگردها تامین می‌گردد. جهت طراحی اولیه و تخمین سریع سطح مقطع آرماتور مورد نیاز، می‌توان از روابط ساده‌شده‌ای که ال عمرانی و همکاران (۲۰۰۸) ارائه کرده‌اند، استفاده نمود. در این رویکرد، لنگر مقاوم مقطع با فرض تسلیم میلگردهای کششی و در نظر گرفتن یک بازوی لنگر داخلی فرضی به دست می‌آید. بر این اساس، تخمین بازوی داخلی برای یک مقطع شکل‌پذیر تحت خمش خالص طبق رابطه ۳-۳ محاسبه می‌گردد:

$$z \approx 0.9 \cdot d \quad ۱.۳$$

ظرفیت خمشی مقطع با تسلیم میلگرد ها همراه بوده و می‌تواند براساس رابطه زیر محاسبه گردد

$$M_{Rd} \approx f_{yd} \cdot A_s \cdot 0.9d \quad ۲.۳$$

در رابطه بالا سطح مقطه مورد نیاز برای آرماتورها براساس رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$A_s \approx \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot 0.9d} \quad ۳.۳$$

## ۳-۴ طراحی اعضا، صفحات و پوسته ها

یک مسیر انتخابی برای میلگردها در امتداد تنش های اصلی تعیین می گردد. براساس دستورالعمل (۲۰۰۸) ۴۵ Fib Bulletin. با اینحال، این مسیرها هنگامی که سازه بارگذاری می شود تغییر می کنند و ممکن است منجر به میلگرد گذاری نامتعارف در سازه شوند. بنابراین، توصیه می شود که میلگرد گذاری در دو امتداد عمود بر هم در امتدادهای اصلی سازه تعبیه و اجرا گردد. این المان دارای ۵ برآیند تنش شامل لنگرهای خمشی و پیچشی می باشد که عبارتند از تنشهای خمشی  $m$  و تنش های برشی  $v$ . برای بدست آوردن یک میلگرد گذاری منطقی با میلگردهای طولی در امتدادهای  $X$  و  $Y$ ، لنگر پیچشی باید بوسیله میلگردهای در این دو امتداد تحمل گردد. لنگرهای دورانی در لنگرهای خمشی متداول اعمال می گردند که در همان جهات اصلی قرار دارند. این لنگرها براساس روابط زیر براساس آیین نامه پل امریکا (AASHTO LRFD ۲۰۲۰) قابل محاسبه می باشند. جاییکه  $m_x$  و  $m_y$  لنگرهای خمشی صفحه هستند و  $m_{xy}$  لنگر تابیدگی می باشد. توابع  $\mu$  نیز فاکتورهای انتخابی هستند که اغلب برای سادگی مقدار آنها برابر واحد فرض می گردد. به روشی مشابه برای تنش های برشی درون صفحه که براساس نیروهای داخل صفحه المان های پوسته ای بدست می آید که براساس روابط ارایه شده توسط بلوندرد (۲۰۱۰) به صورت ذیل ارایه می گردد:

$$\begin{aligned} n_{xt} &= n_x + |n_{xy}| \\ n_{yt} &= n_y + |n_{xy}| \\ n_c &= -2|n_{xy}| \end{aligned} \quad ۴.۳$$

در روابط فوق  $n_x$  و  $n_y$  نیروهای برشی درون صفحه می باشند. در این روابط  $n_c$  نیروی فشاری است که در بازوی فشاری بتن در مقاطع برشی توزیع می گردد. یک المان shell به طور کلی ترکیب رفتار پوسته ای و لنگرهای خمشی می باشد. طراحی المان پوسته ای/خمشی می تواند با استفاده از اصول و تئوری ورق-خمش و رفتار پوسته ای در مدل ساندویچ پانل انجام شود. شکل های ۳-۴ نمای کلی این توزیع و ترکیب تنش ها را نمایش می دهد. این روند براساس دستورالعمل (۲۰۰۸) Fib Bulletin و آیین نامه SS-EN ۱۹۹۲ که در سال ۲۰۰۵ ویرایش شده است ارایه شده است. در مدل ساندویچ پانل، سطح مقطع به سه لایه تقسیم می گردد که لایه های بیرونی تحت رفتار پوسته غشایی و لایه میانی نیروهای برشی خارج از صفحه را تحمل می کنند و بازوی لنگر برای لایه غشایی را ایجاد می نماید به طوریکه بتواند در مقابل لنگرهای خمشی مقاومت نماید. با ترکیب مدل های فوق برای ورقها و المانهای پوسته ای، با استفاده از ضخامت لایه میانی  $d_v$ ، بازوی لنگر میانی، معادلات ۸.۳ بدست می آیند.

$$\begin{aligned}
 a_{sx} f_y &\geq \frac{m_x}{d_v} + \frac{n_x}{2} + \left| \frac{m_{xy}}{d_v} + \frac{n_{xy}}{2} \right| & ۵.۳ \\
 a_{sy} f_y &\geq \frac{m_y}{d_v} + \frac{n_y}{2} + \left| \frac{m_{xy}}{d_v} + \frac{n_{xy}}{2} \right| \\
 a'_{sx} f_y &\geq -\frac{m_x}{d_v} + \frac{n_x}{2} + \left| \frac{m_{xy}}{d_v} + \frac{n_{xy}}{2} \right| \\
 a'_{sy} f_y &\geq -\frac{m_y}{d_v} + \frac{n_y}{2} + \left| \frac{m_{xy}}{d_v} + \frac{n_{xy}}{2} \right|
 \end{aligned}$$

در رابطه بالا  $a_s$ ، مساحت میلگردهای مورد نیاز و  $f_y$  تنش تسلیم برای میلگردهای فولادی می باشد. اگر هسته میانی لایه مرکزی شامل ترکهای برشی عرضی باشد، مقدار آنها با استفاده از عبارات زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned}
 a_{sx} f_y &\geq \frac{m_x}{d_v} + \frac{n_x}{2} + \frac{v_x^2}{2v_0} + \left| \frac{m_{xy}}{d_v} + \frac{n_{xy}}{2} + \frac{v_x v_y}{2v_0} \right| & ۶.۳ \\
 a_{sy} f_y &\geq \frac{m_y}{d_v} + \frac{n_y}{2} + \frac{v_y^2}{2v_0} + \left| \frac{m_{xy}}{d_v} + \frac{n_{xy}}{2} + \frac{v_x v_y}{2v_0} \right| \\
 a'_{sx} f_y &\geq -\frac{m_x}{d_v} + \frac{n_x}{2} + \frac{v_x^2}{2v_0} + \left| \frac{m_{xy}}{d_v} + \frac{n_{xy}}{2} + \frac{v_x v_y}{2v_0} \right| \\
 a'_{sy} f_y &\geq -\frac{m_y}{d_v} + \frac{n_y}{2} + \frac{v_y^2}{2v_0} + \left| \frac{m_{xy}}{d_v} + \frac{n_{xy}}{2} + \frac{v_x v_y}{2v_0} \right|
 \end{aligned}$$

این مدل بسیاری مواقع ساده است زیرا فرض می شود که لایه میانی در انتقال نیروهای پوسته ای مشارکت نخواهد داشت. لایه میانی و بازوی آنها فرض می شود که دارای میلگرد یکسانی می باشند.

### ۵-۳. بارهای ترافیکی روی پل

برای مدلسازی پلها بارهای وارد بر پل براساس آیین نامه ۲۰۲۲ AASHTO LRFD با استفاده از ترکیب بارها و بارهای متمرکز انجام می شود. مسیر عبور وسایل نقلیه روی پل به لاین های عبوری تفکیک می گردد که مدل آن در شکل ۵-۳ نمایش داده شده است. بارها و امتداد حرکت وسایل نقلیه و مسیرهای عبور وسایل برای بدست آوردن پاسخ سازه تحت عبور کامیون ها براساس موقعیت قرارگیری آنها با استفاده از معادلات خط تاثیر حاصل می شود. نتایج سپس به یک محدوده پاسخ که ماکزیمم نتایج را ارائه می دهد نمایش داده خواهد شد.

بارهای متمرکز بصورت گروهی همراه با محل قرارگیری چرخهای کامیون طراحی مدل می شود (شکل ۵.۳). هر محور شامل دو بار متمرکز و دو محور بار که نمایان گر بارگذاری پل می باشد. توزیع بارها روی کل لاین ترافیک پل انجام می شود. مقادیر بار محورهای کامیون و توزیع بارها براساس آیین نامه ۲۰۲۲ AASHTO LRFD انجام می شود که در جدول نمایش داده شده است.

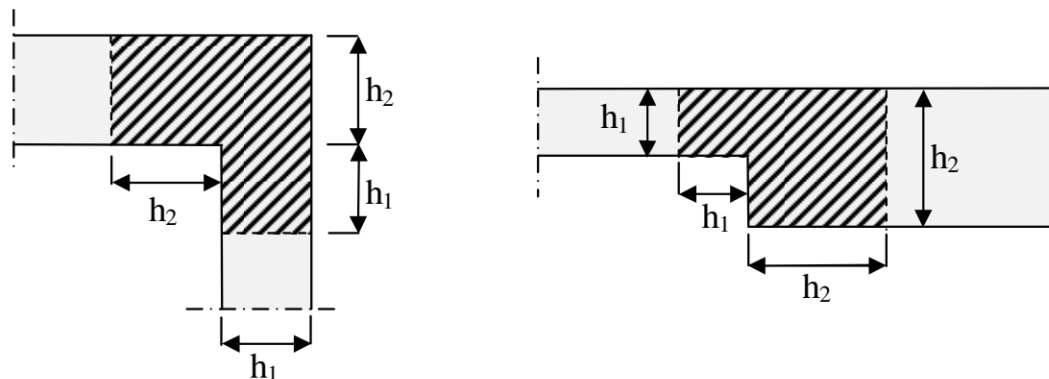
جدول ۱.۳ بارهای ترافیکی گسترده و متمرکز براساس آیین نامه ۲۰۲۲ AAHTO LRFD

Traffic lane	Distributed load $q$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Axle loads $Q$ [kN]
1	6.3	270
2	2.5	180
3	2.5	0
Remaining lanes	2.5	0
Remaining surface	2.5	0

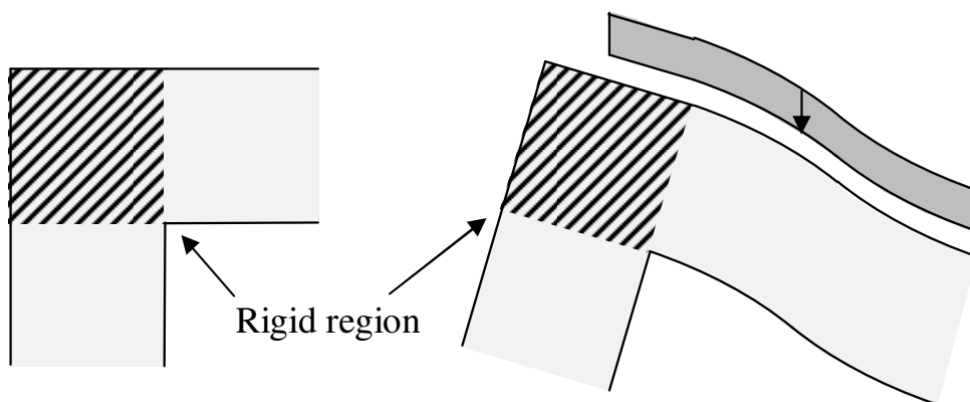
بارهای افقی روی پل ( بارها در صفحه پل ) ناشی از ترمز کامیون، شتاب ناشی از چرخش کامیون روی پل است. بارهای ترمزها بعنوان بخشی بارهای قائم کامیون که در ترافیک اعمال می شود محاسبه می گردد. شتاب ناشی از تغییر جهت نیز مشابه بار ترمزها ایجاد می گردد.

#### ۴. یافته‌ها

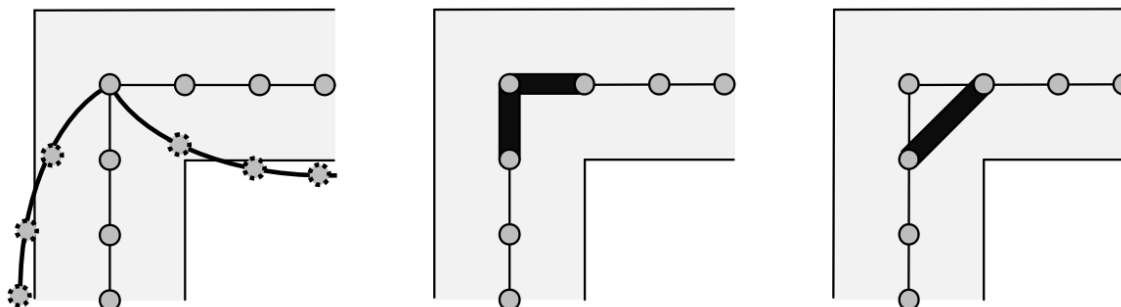
آنالیز سه بعدی پل‌های بتنی مسلح با روش اجزای محدود، امکان ارزیابی دقیق هندسه، المان بندی و انتخاب بهینه نوع المان‌های سازه‌ای را برای دستیابی به واقعی‌ترین پاسخ‌های سازه‌ای فراهم می‌سازد. در این راستا، شبکه بندی مدل باید به اندازه کافی متراکم باشد؛ به گونه‌ای که بر اساس تجربیات مهندسی، ابعاد المان‌های پوسته‌ای (شل) معمولاً برابر یا کوچک‌تر از ضخامت المان در نظر گرفته می‌شود و تراکم مش‌ها در نواحی بحرانی نظیر اتصالات مفصلی و نقاط تحت بارگذاری شدید افزایش می‌یابد، هرچند مطالعات نشان می‌دهد که وابستگی به مش بندی‌های متفاوت تأثیر ناچیزی در تغییر پاسخ کلی سازه ایجاد می‌کند (داویدسن ۲۰۰۳، آیین‌نامه پل آمریکا ۲۰۲۲). بهره‌گیری از المان‌های سازه‌ای در مدل‌های سه بعدی، علاوه بر ارائه نتایج قابل اتکا برای مراحل اولیه و نهایی طراحی تحت ترکیبات بارگذاری متعدد، به درک و تبیین بهتر عملکرد سازه کمک شایانی می‌نماید. افزون بر این، برای تحلیل دقیق‌تر، سیستم سازه‌ای متمایز می‌گردد تا مناطقی که توزیع کرنش در آنها تحت حالت کرنش صفحه‌ای خطی بوده و از تئوری برنولی پیروی می‌کند (نواحی بی) از مناطقی با توزیع کرنش غیرخطی و پیچیده (نواحی دی) تفکیک شوند.



شکل ۴-۱ مثالی از نواحی جداسازی شده، ناحیه  $D$ ، جایی که توزیع کرنش متفاوت از کرنش خطی تعیین شده توسط تئوری تیرها می باشد. این نواحی تنها بر پاسخ موضعی اثر ندارند و بلکه مدلسازی آنها همچنین برای تعیین مقدار صحیحی تنشها در کل سیستم سازه نیز بسیار مهم می باشد. بعنوان مثال برای المان های گوشه قابها، شکل ۴-۲ مشاهده گردد، توزیع کرنش دیگر بصورت خطی باقی نمی ماند و هنگام مدلسازی این قابها، المانهای ناحیه گوشه نمی توانند بصورت مستقل عمل نمایند. اغلب مواقع خط مرکزی المانهای گوشه بصورت تیر یا المان SHELL مدلسازی می گردد و از آنجا که گوشه ها کم یا زیاد مانند دیافراگم عمل می کنند، سختی ناچیز در نظر گرفته می شود. بنابراین، المانها در این محدوده باید بصورت کوپل و وابسته مدلسازی گردند.



شکل ۴.۲ تغییر شکل در اطراف گوشه ناشی از بارگذاری



شکل ۲.۲.۴ پاسخ المانهای گوشه در قاب تحت بارگذاری با الترناتیو شامل المان Rigid ارائه شده توسط رومباچ ۲۰۱۸

شکل ۲-۴ تغییر شکل با نادیده گرفتن سختی گوشه و مدلسازی گوشه با المان rigid برای در نظر گرفتن سختی گوشه ها.

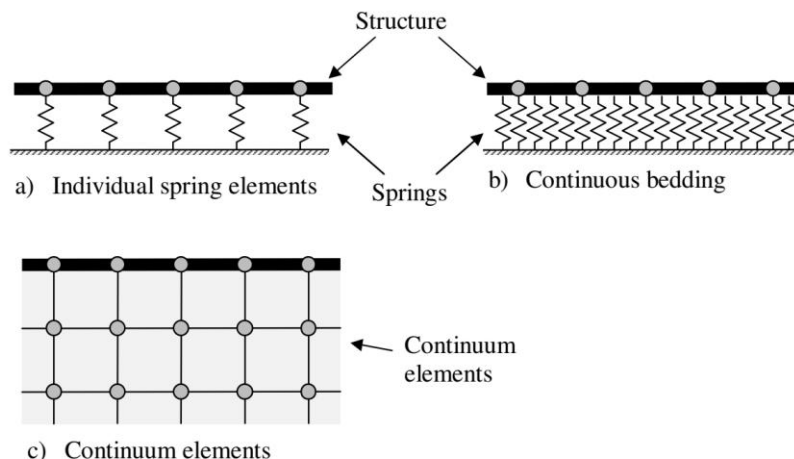
افزایش سختی اتصالات می تواند از طریق تعریف المان های گوشه صلب با ابعاد بزرگ و سختی بی نهایت یا با معرفی یک المان خرابایی مایل و سخت در ناحیه اتصال صورت پذیرد (رومباچ، ۲۰۱۸). با این وجود، در تخصیص مصالح سخت کننده باید دقت فراوانی لحاظ گردد؛ زیرا انتخاب مقادیر بسیار بزرگتر از سختی متداول مقطع، منجر به بروز مشکلات تحلیلی در روند آنالیز سازه می شود. به ویژه در المان های پوسته ای (شل)، بسیار مهم است که افزایش سختی دقیقاً در جهت صحیح اعمال گردد؛ به عنوان مثال، در دال ناحیه اتصال پل، این افزایش باید صرفاً در امتداد قائم بر سطح مقطع قاب صورت گیرد تا از خطاهای محاسباتی ناشی از افزایش کاذب سختی دیوار در جهت عرضی جلوگیری شود. هرچند پیاده سازی دقیق این اثرات جهتی در مدل سازی دشوار است، اما از آنجا که امتداد اصلی سازه طولی است، تغییرات سختی جانبی تنها بر بارگذاری های خاصی که موجب خمش عرضی در دیوار می شوند تأثیرگذار خواهد بود و در این راستا می توان از معادله ۲-۴ که بیانگر رابطه مصالح ارتوتروپیک در تنش صفحه ای برای المان های پوسته ای است، جهت محاسبه دقیق سختی در مدل سازی بهره برد.

۱.۴

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

#### ۵-۴ اندرکنش خاک-سازه

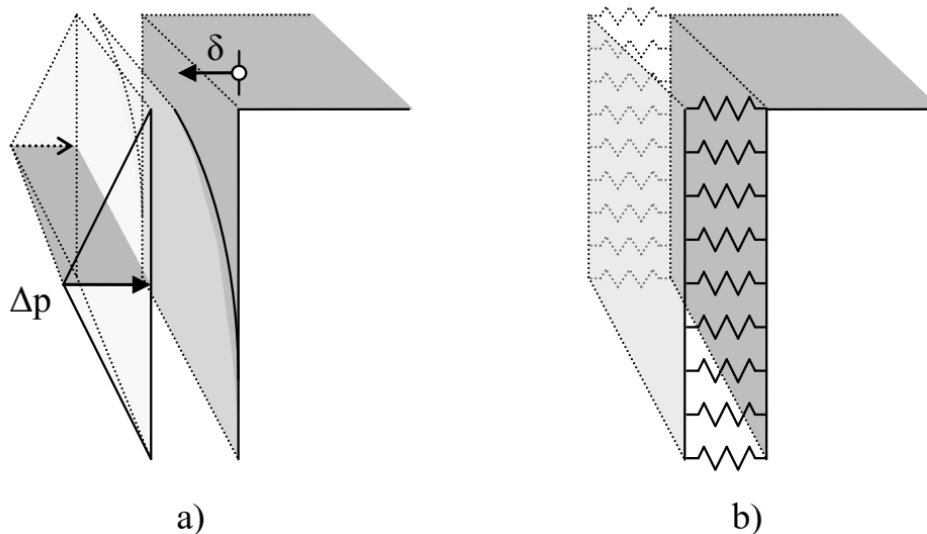
در بسیاری از مدلها، تکیه گاهها تحت اثر بارهای وارده تغییر شکل می دهند. مثلاً در فونداسیون های باریک این تغییر شکل قابل ملاحظه خواهد بود. در این موارد، خاک زیر فونداسیون در اثر بارهای وارده تغییر شکل می دهد (رومباچ ۲۰۱۸) که این تغییر شکل باعث تغییرات در پاسخ سازه خواهد شد. به طبع آن، این اثرات باید در مدل سازه در نظر گرفته شود (ترافیک ورتک ۲۰۱۹ الف). خصوصیات خاک و اثرات آن بر سیستم سازه می تواند به روشهایی مختلفی در مدل اعمال گردد. بعضی از مثالها در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است.



به منظور شبیه‌سازی خصوصیات و تغییر شکل فونداسیون (مصالح الاستیک)، مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است که ساده‌ترین و متداول‌ترین آن‌ها استفاده از المان‌های فنر به صورت مجزا یا پیوسته و رویکرد پیشرفته‌تر آن بهره‌گیری از المان‌های پیوسته می‌باشد. در مدل‌سازی رفتار خاک با استفاده از فنر، سختی قائم سیستم از طریق پارامتری به نام مدول نشست تعیین می‌گردد؛ با این تفاوت که در مدل فنرهای مجزا متصل به گره‌های المان، سختی به فاصله میان گره‌ها و در نتیجه به تراکم مش‌بندی وابستگی مستقیم دارد، در حالی که در مدل فنرهای پیوسته، سختی در داخل ماتریس المان ادغام شده و کاملاً مستقل از ابعاد مش‌بندی عمل می‌کند. البته باید توجه داشت که در صورت اعمال مش‌بندی به اندازه کافی ریز و متراکم، هر دو روش فنر مجزا و پیوسته پاسخ‌های سازه‌ای یکسانی را ارائه خواهند داد، مشروط بر آنکه فنرها عمود بر المان قرار گرفته باشند. جهت محاسبه مدول نشست، می‌توان از محاسبات ساده‌سازی شده نشست تحت یک بار اختیاری استفاده نمود که مبانی و معادلات مربوط به این روش در دستورالعمل‌های معتبر تشریح گردیده است (تی آر برو، ترافیک ورکت، ۲۰۰۹ ب).

$$k = F / d \quad ۲.۴$$

مدل‌سازی مبتنی بر فنر به دلیل ناتوانی در محاسبه اندرکنش برشی بین فنرها و خاک، معمولاً این اثر قابل ملاحظه را نادیده می‌گیرد؛ هرچند راهکارهایی برای لحاظ کردن این سختی برشی توسط پژوهشگران ارائه شده است (بلاوندرد، ۲۰۱۰؛ کاسلانگ و اریکسون، ۲۰۱۸). افزون بر این، به دلیل استفاده متداول از فرض مصالح خطی و الاستیک در طراحی، فنرهای خطی با تحمل تنش کششی از شبیه‌سازی دقیق پدیده بالازدگی فونداسیون ناتوان هستند و استفاده از فنرهای غیرخطی جهت رفع این مشکل نیز در طراحی متداول پل‌ها رایج نیست. از سوی دیگر، اندرکنش اعضای قائم سازه نظیر دیوارهای حائل، دیوارهای قابی و سپرها با مصالح خاکی اطراف نیز بسیار حائز اهمیت است، زیرا مقاومت خاکریزها در برابر تغییر شکل‌های افقی، تأثیر بسزایی بر پاسخ سازه دارد و باید در محاسبات دیده شود. برای مدل‌سازی این خاکریزها می‌توان رویکردی مشابه فونداسیون‌ها اتخاذ کرده و خاک را با فنرهای معادل جایگزین نمود، و یا اثر آن را از طریق اعمال یک بار خارجی معادل با افزایش فشار خاک ناشی از تغییر شکل سازه، در نظر گرفت (ترافیک ورکت، ۲۰۰۹ ب).



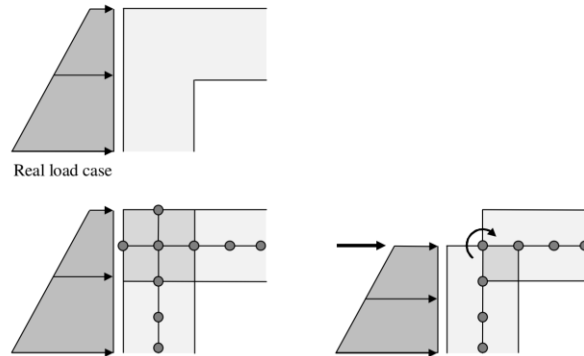
شکل ۴-۴ افزایش فشار خاک در مدل: (a) مدل براساس ترافیک ورک، (b) مدلسازی مشابه فنرهای فونداسیون در این مدل که براساس ترافیک ورک ارایه شده است، افزایش فشار خاک بصورت مقدار ماکزیمم در ارتفاع میانی اعضای قائم و مقدار صفر در بالا و گوشه پایین عضو وارد می شود. مقدار  $\Delta P$  براساس رابطه ۳.۴ ارائه می شود.

$$\Delta p = c \cdot \gamma \cdot z \cdot \beta \quad 3.4$$

در این رابطه مقادیر مقدار  $c$  برای حالتی که فشار زمین مناسب است برابر ۳۰۰ و برای حالت نامناسب ۶۰۰ در نظر گرفته می شود. همچنین مقدار  $\beta$  برابر نسبت بین تغییر شکل به ارتفاع عضو می باشد.  $Z$  نیز عمق مقطع را بیان می نماید.

#### ۴-۶. اعمال بارگذاری

در مدل سازی سازه ها، هنگام بارگذاری در نواحی گوشه مانند اتصالات قاب، بار معمولاً تنها در امتداد محور یا تار میانی عضو وارد شده و به بخش های خارجی این ناحیه اعمال نمی گردد (شکل ۴-۵). برای رفع این محدودیت و توزیع صحیح بار در تمام بخش های ناحیه گوشه ای، می توان از راهکارهای جایگزینی نظیر به کارگیری المان های بیرونی در کناره ها و یا افزودن نقاط اعمال بار و لنگر جهت جبران خروج از مرکزیت نیروها استفاده کرد (رومباچ، ۲۰۱۹).



شکل ۴-۵ مدل‌های مختلف برای اعمال بار در بیرون خط مرکزی عضو

در هر دو دیدگاه برای اعمال بار، مشکلات خاصی وجود خواهد داشت. هنگام پخش المان بر امتداد گوشه‌ها، باید دقت کافی در معرفی مشخصات المانها انجام شود به طوری که آنها بر پاسخ سازه تاثیر نداشته باشند. این می‌تواند برای مدل‌های سه بعدی پیچیده تر و مشکل تر نیز باشد زیرا در این مدل‌ها خصوصیات سختی در جهات مختلف با هم تفاوت دارند و باید بصورت دستی با توجه به جهت قرارگیری المان تنظیم شود. همچنین اضافه کردن نقاط بارگذاری در این نواحی نیز می‌تواند تعریف بارها را پیچیده تر نماید و ریسک افزایش خطا را نیز بالا ببرد.

## ۵. نتیجه گیری و پیشنهادها

یک پل یکپارچه بتنی، شکل ۵-۱، جهت بررسی اثرات مدلسازی بر آنالیز سازه، طراحی دال بتنی مورد آنالیز قرار گرفته است. دیدگاههای مدلسازی در این مطالعه عبارتند از: اثرات سختی نواحی گوشه، اثرات اندرکنش خاک-سازه در دیوارهای پل، اثرات ماهیچه های پل بر مدلسازی و اثرات بارهای اعمال شده به مدل. این دیدگاهها با جزییاتی که در بخش ۵-۳ توضیح داده می‌شود اعمال می‌گردند. پل با استفاده از نرم افزار Brigade/plus مدلسازی خواهد شد.



شکل ۵-۱ مدل مورد مطالعه برای پل یکپارچه بتنی با دال بتنی. دیوارهای حائل، پل داری مسیر عبوری وسیله نقلیه و همچنین گذر عبوری دوچرخه می‌باشد که براساس این نام AASHTO طراحی شده است.

پل مورد مطالعه شامل مسیر عبور وسایل نقلیه و همچنین کنار گذر عبور دوچرخه می‌باشد. این پل در شهر ادینبرو در کشور اسکاتلند ساخته شده و جزییات آن از سایت شهرداری ناحیه ای ادینبرو گرفته شده است. این پل دارای فونداسیون بتنی نواری و بسته می‌باشد و به طور مستقیم روی خاک اجرا شده است. دال فوقانی به شکل دال بتنی که در امتداد افقی بصورت ماهیچه های دورانی به سمت داخل پل و پیاده روهای

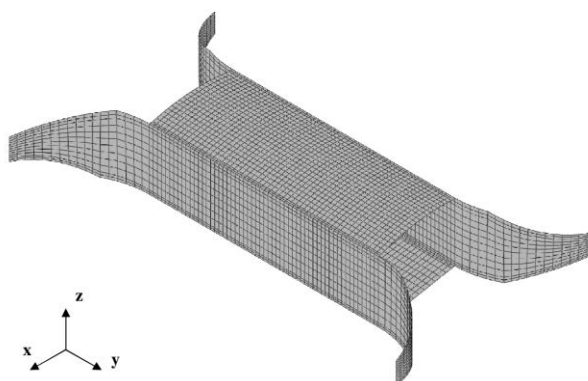
کناری با شیب ۲.۵ درصد در جهت عرضی تعبیه شده اند. از این رو در میانه پل، ضخامت ۰.۱۸ متر ضخیم تر از لبه های پل می باشد. ضخامت های مختلف های پل در جدول زیر ارائه شده است. باز شو پل به طول ۵ متر است که دارای ۱۳.۶ متر و ۱۴.۱ متر بوده و ارتفاع دیوارها نیز ۴ متر در نظر گرفته می شود.

جدول ۱.۵ ضخامت بخشهای مختلف پل مورد بررسی

ضخامت	اجزا سازه
۴۵۰mm	دال فونداسیون
۴۰۰mm	دیوارهای پل
۴۵۰mm	بالهای پل
۷۴۰mm-۹۲۰mm	دال بتنی فوقانی پل در دیوارها
۲۴۰mm-۴۲۰mm	دال بتنی فوقانی پل در در میانه دهانه

۱-۲-۵ مدل سازی

برای مدل سازی هندسه پل از المان های پوسته ای سه بعدی بهره گرفته شده است که تغییرات هندسی و ضخامت دال آن از طریق ابزار میدان تحلیلی در نرم افزار بریگید/پلاس اعمال می گردد. بر اساس مطالعات پیشین و قاعده تجربی مبنی بر لزوم کوچکتر بودن ابعاد المانها نسبت به ضخامت مقطع، سائز شبکه بندی برای دال ۰.۲۵ متر و ۰.۲۵ متر و برای سایر اجزا ۰.۴ در ۰.۴ متر در نظر گرفته شده است. همچنین، با توجه به فرض رفتار الاستیک خطی در این مطالعه، مصالح به صورت بتن خالص و بدون ترک (رده C۴۵/۳۵ مطابق آیین نامه ایران) با ضریب پواسون ۰.۲ و مدول الاستیسیته ۳۴ گیگاپاسکال تعریف شده است (نویل، ۱۹۹۵).



شکل ۲-۵ مدل هندسی پل مورد مطالعه با استفاده از المان shell

۲-۲-۵ شرایط مرزی و فونداسیون

فونداسیون با استفاده از المانهای فنر Spring با سختی ۳۰۰ MPa در همه جهات مدل شده است. سختی براساس نشست ساده فونداسیون تحت بار ۲۰ کیلوپاسکال در خاک محاسبه و تعیین شده است. مدول نشست نیز براساس روابط مکانیک خاک و از نسبت تنش موجود در خاک به مقدار نشست بدست آمده است.

۳-۲-۵ مدل سازی بارهای وارده و ترکیب بارها

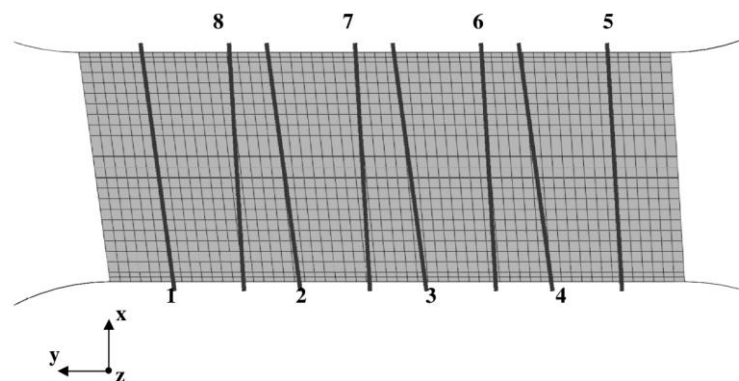
بارهای وارده شده برای آنالیز براساس آیین نامه پل امریکا ارایه شده است. این بارها عبارتند از:

بارهای وزن سازه: شامل بار گسترده بعنوان بار مصالح بتنی که مقدار آن برابر  $25 \text{Kn/m}^3$  در نظر گرفته شده است. این بار با استفاده از معرفی چگالی بتن به مقدار  $2500 \text{Kg/m}^3$  و شتاب ثقل  $10$  متر بر مجذور ثانیه انجام شده است.

بارهای پوشش سطحی پل: بارهای پوشش سطح پل براساس ضخامت  $70$  میلیمتر برای این پوشش و وزن واحد سطح  $24$  کیلونیوتن مدلسازی شده است. برای سطح تونل براساس مقادیر  $60$  میلیمتر برابر  $23$  کیلو نیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است. بارهای اعمال شده برابر  $1.68 \text{Kn/m}^2 = 24 * 0.07$  برای دال پل و برابر  $1.38 \text{Kn/m}^2 = 23 * 0.06$  برای دال بتنی در مدل اعمال شده است.

فشار زمین: فشار زمین بر قاب کلی سازه و دیواره های بالی شکل پل با چگالی  $22$  کیلونیوتن بر مترمکعب و زاویه اصطحاک  $45$  درجه ( بر اساس نمونه واقعی پل در کشور سوئد ) وارد می شود. این مشخصات برای فشار زمین با ضریب فشار زمین برابر  $0.29$  در حالت بدون فشار و برابر با  $0.39$  در طراحی با اعمال فشار زمین در نظر گرفته شده است.

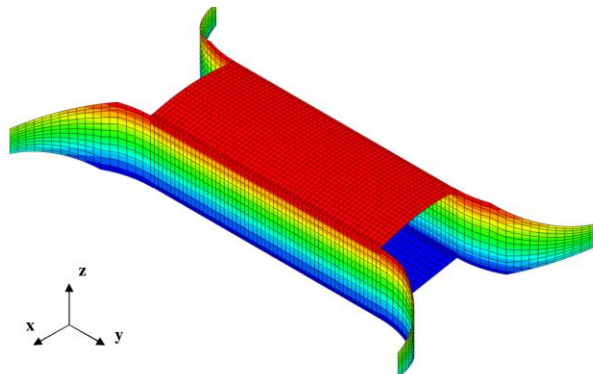
بارهای ترافیکی: بارهای ترافیکی براساس مدل ۱ و مدل ۲ در آیین نامه پل اعمال شده است. بارهای خطوط ترافیک براساس شکل ۵.۳ تعیین شده اند. این بارها براساس آیین نامه پل سوئد که در طراحی این پل استفاده شده است بدست آمده است. در این مدل بارهای اعمالی کامیون طراحی در محورهای ۱ تا ۳ به ترتیب برابر  $270$ ،  $180$ ، و صفر کیلو نیوتن می باشد. توزیع بارها در بقیه امتدادها برابر  $6.3$ ،  $1$  و  $2.5$  کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است. در مدل ۲ نیز بار محور تک برابر  $360$  کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۵ تعریف بارهای ترافیکی (کامیون طراحی) استفاده شده برای آنالیز بار زنده. خط شماره ۱ و ۵ با فاصله از گوشه پل و خطوط ۲ الی ۴ با فاصله ۳ متر از خط شماره ۱ قرار دارند. خطوط ۶ تا ۸ با فاصله مشابه از خط شماره ۵ قرار گرفته اند.

بارهای ترمز، شتاب و بارهای ترافیکی جانبی: بارهای افقی ناشی از ترمز و شتاب در دال پل و بارهای جانبی مانند بارها در امتداد ثانویه پل نیز بعنوان بارهای خطی در طراحی و مدلسازی پل اعمال شده است. بارهای ناشی از ترمز برابر  $324$  کیلونیوتن و مولفه بار پخش شده ناشی از آن معادل  $11$  کیلونیوتن می باشد. مولفه نیروی جانبی ترمز نیز برابر  $81$  کیلونیوتن می باشد. همه بارهای جانبی و قائم ترافیکی پل بعنوان بار گسترده در امتداد خطوط اصلی عبوری (جاده ای) روی پل به طول  $5.9 \text{m}$  توزیع می شود.

بارهای ناشی از دما: بارهای دمایی تابع عوامل مختلفی از جمله تفاوت دمایی در بالا و پایین و بین لایه های پل و همچنین تغییرات دما در طول مدت شبانه روز در پل می باشد. اختلاف دما بین لایه های پل با استفاده از الگوی افزایش/کاهش با تغییرات  $15$  درجه سانتیگراد بین لایه پایین و بالای پل اعمال می گردد. در دیوارهای پل، بین فونداسیون و دال پل، تغییرات خطی فرض می شود که این فرض برای محدود کردن اثرات مقاومتی و بدست آوردن توزیع دمای نرمال در پل می باشد (شکل ۴-۵)



شکل ۴-۵ توزیع دما بر پل برای ترکیبات بارگذاری. دال فوقانی دمای ۲۰ درجه دارد در حالیکه دمای فونداسیون حدود ۱۵ درجه گرمتر است (مثلا به ۵ درجه رسیده است). تغییرات خطی دما روی دیوار مشخص می باشد

ماکزیمم افزایش دما برای دال بربر ۲۰ درجه و ماکزیمم کاهش دما برابر ۴۰- درجه سانتیگراد محاسبه گردید. تغییرات دما با گرم شدن سطح برابر ۱۰.۵ درجه سانتیگراد و تغییرات دما در حالت سرد شدن برابر ۸ درجه سانتیگراد محاسبه شده است.

بار باد: بارهای باد بصورت افقی در امتداد جانبی دال پل و دیوارهای کناری وارد می گردد. خروج از مرکزیت بارها برای اعمال لنگرهای اضافی ناشی از آن برابر فاصله میانه تا خط مرکزی دال پل در نظر گرفته می شود.

افزایش فشار زمین: یک افزایش در فشار زمین برای بارهای جانبی نیز به سازه اعمال می گردد. این بارها براساس مدل ارائه شده در TR-BRO (ترافیک ورک ۲۰۰۹ ب) اعمال می گردد که در محاسبه تغییر شکل ها موثر می باشد.

ترکیب بارها: مطالعه پل مورد بررسی در حالات حدی نهایی ULS انجام می شود و لذا ترکیب بارهای این حالت براساس آیین نامه ایران در نظر گرفته شده است. در این ترکیب بارها، بار ترافیک یا دیگر بارهای موثر بر پل می تواند بصورت ترکیبی با ضرایب مشخص با هم ادغام گردند.

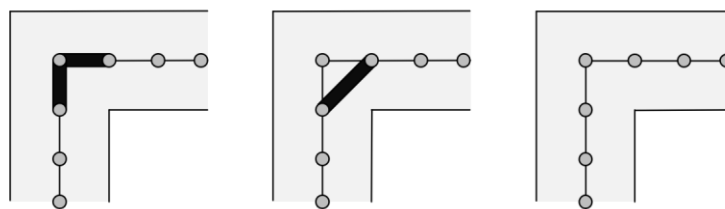
۳-۵ اثرات مدلسازی سختی گوشه

برای مطالعه روشهای مختلف مدلسازی سختی گوشه در اتصال قابهای پل، براساس مطالب ارائه شده در فصل قبل، سه مدل ارائه شده در شکل زیر مورد بررسی قرار می گیرند. این مدلها عبارتند از

مدل کوپل المانهای گوشه از طریق افزایش جزئیات سختی المان در مسیرهای اصلی (مدل ۳: المان سخت کننده)

کوپل کردن نقاط گوشه در بخش بحرانی از طریق المان سخت کننده مورب (مدل ۲: المان مورب)

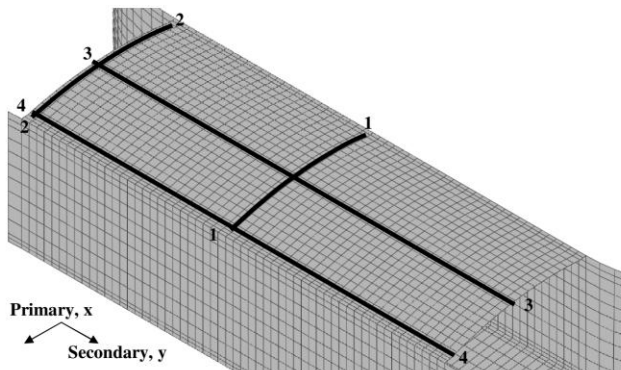
حذف کامل سختی گوشه ها به طور کامل (مدل ۱: بدون سختی)



مدل ۳: المان سخت کننده

مدل ۲: المان مورب

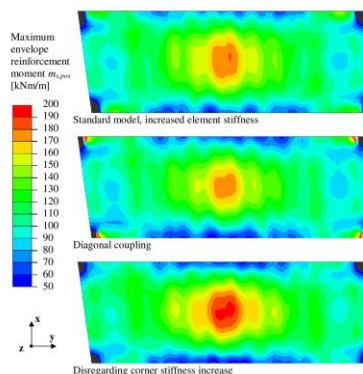
شکل ۴-۵: مدل ۱ بدون سختی



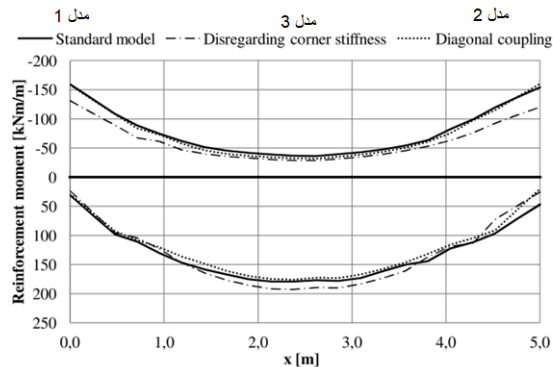
شکل ۵-۶ پیکربندی آنالیز برای دال پل

تفاوت بین لنگر مقاوم براساس آنالیز و تحلیل مدل مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج قابل انتظاری ارائه داده شد:

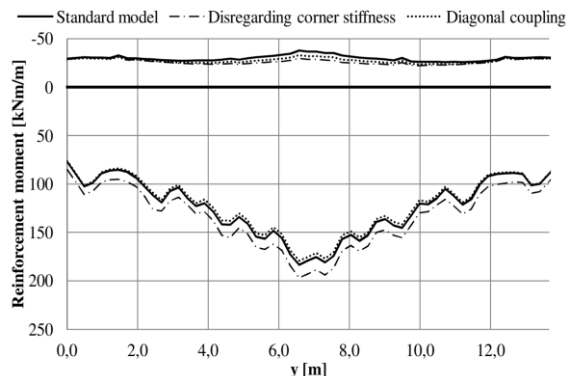
در مدل ۳ که در آن از سختی اعضا صرف نظر شده بود، در عکس العمل ها هیچ تفاوتی ایجاد نشد، در حالیکه بعضی تفاوت ها می تواند بین توزیع لنگرها مشاهده گردد. در مقدار ماکزیمم لنگر (پوش ماکزیمم)، لنگر ماکزیمم بوسیله میلگردهای پایینی تحمل می شود، لنگر در محاسبات ریاضی برای این ناحیه مقداری کمتر از لنگر حاصل از تحلیل این مدل می باشد. شکل های ۵-۶ الی ۵-۸ این توضیحات را نمایش می دهند. با اینحال، برای سطح پایین پوش لنگرهای مقاوم در میلگردها، لنگر توسط میلگردهای فوقانی تحمل می شود و مقدار لنگر تا حدودی از مقدار محاسباتی بیشتر است (شکل ۵-۷)



شکل ۵-۷ ماکزیمم پوش لنگر مقاوم در دال پل (لنگر تحمل شده توسط میلگردهای تحتانی دال پل). مدل ۱ (شکل اول) با افزایش سختی مصالح مدلسازی شده است، مدل ۲ (المان مورب) نیز با استفاده از المان مورب در میان بخش بحرانی گوشه مدلسازی شده است و مدل ۳ (بدون سختی) بدون هیچ افزایش سختی مدل شده است. در مقطع ۱-۱ (شکل ۵-۶) برای مینیمم پوش لنگرها، (شکل ۵-۷)، لنگر مقاوم در مدل ۱ بیشتر از مدل های ۲ و ۳ می باشد. این اختلاف قابل انتظار است زیرا در مدل با افزایش سختی گوشه ها (مدل ۲) لنگر بیشتری جذب می شود. هنگام اعمال بارهای مجزا بر پل مثلا بار باد یا بارهای ناشی از وزن، لنگر در میانه پل مقدار بالاتری را در مدل با حذف سختی گوشه (مدل ۳) ارایه می دهد.

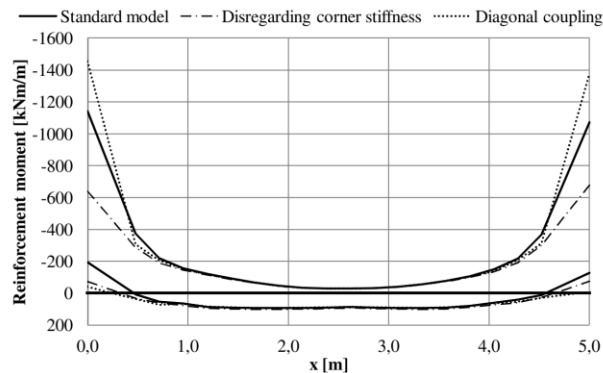


شکل ۵-۸ پوش لنگرهای خمشی اصلی در مقطع ۱-۱ شکل ۶.۵ در میانه دال فوقانی پل. لنگرهای منفی بوسیله میلگردهای فوقانی و لنگرهای مثبت بوسیله میلگردهای پایینی تحمل می شوند

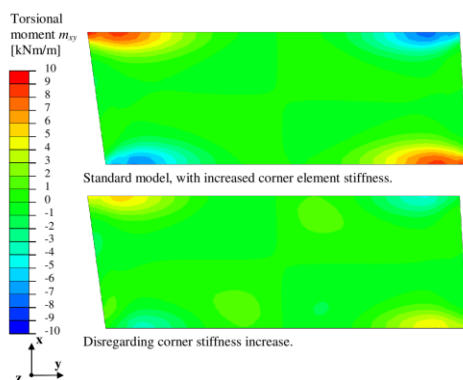


شکل ۵-۹ لنگرهای اصلی در مقطع ۳-۳ از شکل ۶.۵ در امتداد میان دهانه پل

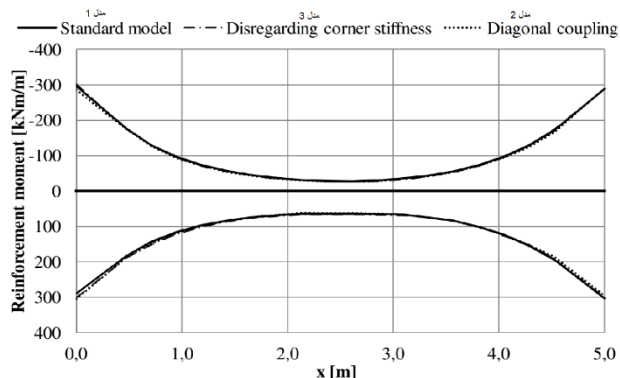
مهمترین تفاوت بین لنگرهای مقاوم میلگردها در موقعیت نزدیک گوشه های دال پل اتفاق افتاده است که در شکل ۵-۹ قابل مشاهده است. این دقیقا در جایی است که لنگرهای پیچشی در دال بیشترین اثر را دارند و باعث افزایش لنگرهای مقاوم در همه مدلها می شوند. با اینحال، این افزایش برای مدلها گوشه سخت شده (مدل ۱) بزرگتر می باشد زیرا آنها لنگر پیچشی قابل ملاحظه ای در مدلها ایجاد می کنند که دقیقا در مغایرت با مدل بدون سختی در گوشه ها (مدل ۳) می باشد. این رفتار برای مدل ۳ که در آن از سختی گوشه صرفنظر شده در شکل ۵-۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۰ لنگرهای مقاوم اصلی در مقطع ۲-۲ در شکل ۶.۵ نزدیک به لبه های تیر در دال پل

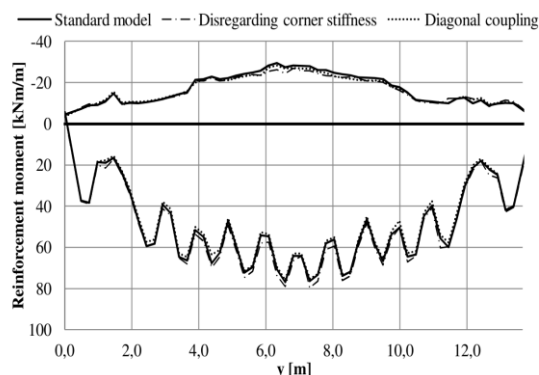


شکل ۵-۱۱ تفاوت در لنگرهای پیچشی در دال پل تحت وزن خود سازه. مدل ۳ با نادیده گرفتن سختی تکیه گاهی (شکل پایینی) نشان دهنده لنگر پیچشی کمتر در نزدیکی گوشه های دال است. در حالیکه که در مدل های فوقانی با در نظر گرفتن سختی گوشه مقادیر لنگر پیچشی بیشتری نمایش داده شده است. در رابطه با لنگر در امتداد میلگردهای فرعی دال پل نیز بررسی انجام شده است. نتایج مطالعه نشان داد که هیچ تفاوتی در لنگر در امتداد میلگردهای عرضی دال پل بین مدل ارائه شده مشاهده نمی گردد (شکل ۱۱.۵). هر چند در نزدیکی گوشه های دال پل، جایی که لنگرهای پیچشی اثرات قابل ملاحظه ای دارند، نتایج تا حدودی متفاوت خواهد بود. (شکل ۵-۱۱)



شکل ۵-۱۲ میلگردهای فرعی در مقطع ۱-۱، یک مقطع بین دیوار قاب در میان دهانه دال پل

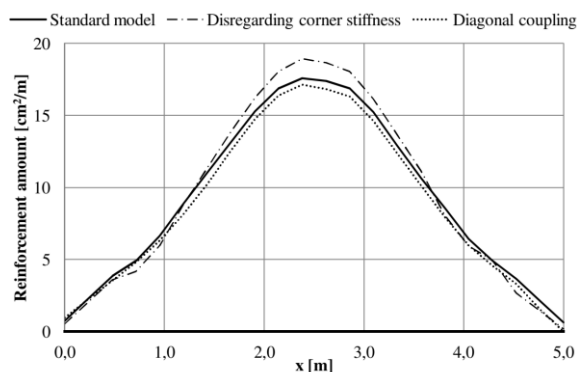
پوش تغییرات لنگرهای ثانویه در میان دهانه دال پل یکی از اثراتی است که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت. این موضوع در مقطع ۳-۳ مورد بررسی قرار گرفته است. این اثر ناشی از ترافیک در امتداد خطوط لاین عبوری کامیون می باشد که در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است.



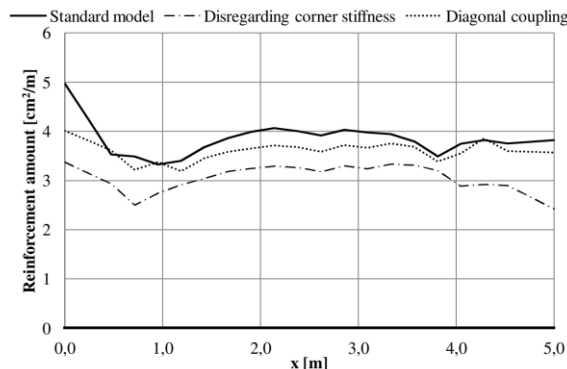
شکل ۳-۵ لنگرهای فرعی در آرماتورها در مقطع ۳-۳. توجه: تغییرات لنگر در ماکزیمم بصورت پوش ارائه شده است (منحنی پایینی)

میلگرد لازم برای دال پل براساس بخش ۳-۵ محاسبه می گردد. با محاسبه و مقایسه مقدار میلگردها در سطح مقطع دال و نیروهای مقطع های دال، اثر پارامترهای مختلف بر مدل سازی پل بررسی می گردد. تفاوت در مقدار توزیع لنگر در بخش ۲.۴.۵ باعث تقاضا برای میلگرد بیشتر در بخش تحتانی در امتداد اصلی دال در مدل ۳ که سختی نادیده گرفته شده است، می شود (شکل ۱۳.۵). همچنین میلگرد بیشتر در بخش

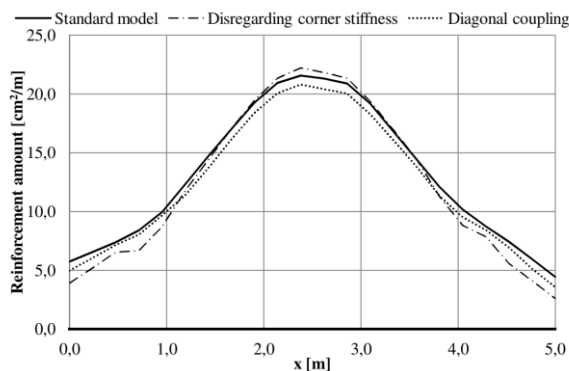
فوقانی دال در مدل با سختی گوشه (مدلهای ۲ و ۱) مشاهده می گردد. شکل ۱۵-۵



شکل ۱۴-۵ میلگرد لازم تحتانی برای بخش ۱+۱ در شکل ۶.۵ برای مدل ۳ نشان دهنده نیاز به میلگرد بیشتر در میان دهانه است.



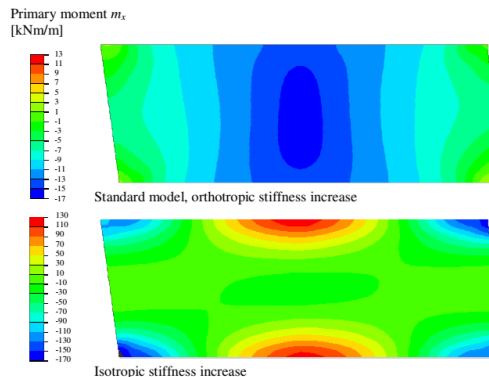
شکل ۵-۱۵ میلگرد مورد نیاز برای بخش فوقانی در مقطع ۱-۱. مدل ۳ نشان دهنده نیاز کمتر به میلگرد در بخش میانی می باشد با مطالعه مجموع میلگردهای مورد نیاز در بالا و پایین در امتداد اصلی، می توان مشاهده نمود که تفاوت بین مدلها در واقع باعث تفاوت در توزیع میلگردها در دال می شود (شکل ۵-۱۵)



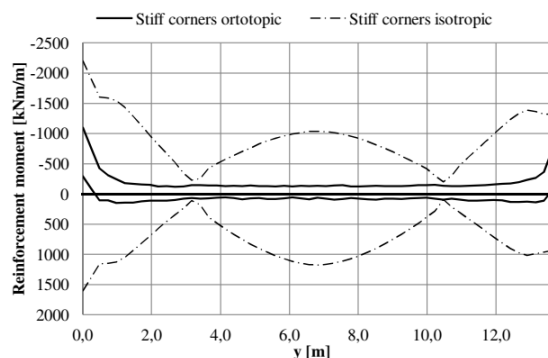
شکل ۵-۱۶ مجموع میلگردهای اصلی در مقطع ۱-۱. فقط تفاوت بسیار ناچیز بین مدلها مشاهده می گردد.

۵-۳-۱ مدلسازی با سختی ایزوتروپیک افزایش یافته در گوشه ها

همان طور که پیش تر اشاره شد، افزایش سختی در نواحی گوشه‌ای معمولاً تنها در امتدادهای اصلی اعمال شده و در امتدادهای ثانویه همان سختی اولیه بتن حفظ می شود؛ با این وجود، به منظور بررسی دقیق تر، یک مدل تحلیلی اضافی با فرض افزایش سختی ایزوتروپیک یکنواخت برای المان‌های پوسته‌ای (شل) در هر دو امتداد تعریف و ارزیابی گردید. نتایج نشان می دهد که در اکثر ترکیبات بارگذاری که موجب خمش دال در امتدادهای اصلی می شوند (نظیر بارهای مرده ناشی از وزن خود سازه)، تفاوت ملموسی میان این دو حالت مشاهده نمی گردد و عملاً اثر افزایش سختی در امتدادهای ثانویه قابل چشم پوشی است. با این حال، در شرایطی نظیر اعمال تغییرات حرارتی که منجر به بروز خمش عرضی در سازه و به ویژه در دیوارهای قابی پل می گردند، پاسخ سازه از منظر توزیع و مقدار لنگرها در مدلی که سختی امتداد ثانویه در آن افزایش یافته است، تفاوت‌های چشمگیر و قابل ملاحظه‌ای را نسبت به مدل فاقد این سختی نشان می دهد (شکل ۵-۱۶).



شکل ۵-۱۷ لنگرهای اصلی در دال پل برای بارهای تغییر دما بر مدل با افزایش سختی فقط در امتداد اصلی پل که توزیع ارتوتروپیک نامیده می شود (مدل بالا) و با افزایش سختی (سختی ایزوتروپیک) در هر دو جهت اصلی و فرعی (شکل پایینی). توجه: تفاوت در هر دو مدل در توزیع و مقدار عکس العمل ها ارائه شده است.



شکل ۱۸-۵ لنگر خمشی در مقطع ۴-۴ (نزدیک تکیه‌گاه) و تفاوت‌های قابل توجه در مقدار و شکل توزیع آن را نشان می‌دهد. بررسی‌ها حاکی از آن است که افزایش سختی گوشه دال صرفاً در امتداد اصلی، تغییری در عکس‌العمل‌های کلی و میزان آرماتور مورد نیاز مقطع ایجاد نمی‌کند. با این حال، تفاوت‌های جزئی و قابل‌انتظاری در توزیع نیروها و آرماتورهای پوشش حداکثر و حداقل (بالا و پایین مقطع) وجود دارد که عمدتاً بر رفتار سرویس‌دهی سازه تأثیر می‌گذارد. در نهایت باید دقت نمود که اختصاص نادرست سختی به امتدادهای اصلی و فرعی در هنگام مدل‌سازی، می‌تواند منجر به بروز خطاهای جدی در فرآیند طراحی شده و باعث عدم تطابق نتایج تحلیل اجزای محدود با مقادیر صحت‌سنجی گردد.

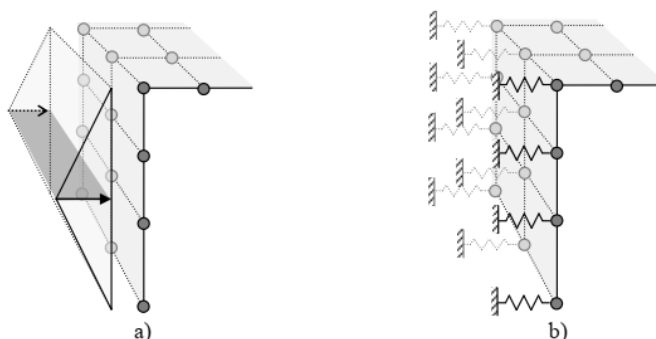
۵-۳-۲ تأثیر فشار زمین بر دیواره های قاب در مدلسازی

دیوارهای یک پل یکپارچه بوسیله خاکریزها مهار می‌شوند. بنابراین، خاکریز باعث مقاومت در برابر خیز در دیواره ها می‌گردد. فشار زمین باعث افزایش فشار در خاک هنگام تغییر شکل در دیوار خواهد شد. این اثرات باید در آنالیز سازه بررسی و اعمال گردد. روشهای مختلفی برای آنالیز سازه تحت اثر فشار زمین در این تحقیق بررسی گردید که توضیح داده خواهد شد.

۵-۴ مدلسازی

مدل نخست (شکل ۱۸-۵ الف) بر اساس دستورالعمل ترافیک ورک (۲۰۰۹) بارهای خارجی را به صورت وابسته به تغییر شکل به دیوارهای پل اعمال می‌کند. در روش دوم (شکل ۱۸-۵ ب)، دیوارها به عنوان تکیه‌گاه در برابر فونداسیون فنی (فونداسیون وینکلر) مدل‌سازی می‌شوند. در

این راستا، سه حالت مختلف ارزیابی می‌گردد: مدل ۱ با فنرهای مشابه برای فونداسیون و دیوار (سختی ۳ مگاپاسکال بر متر)، مدل ۲ با فنر سخت‌تر برای خاکریز دیوارها (سختی ۱۰ مگاپاسکال بر متر) و در نهایت مدل ۳ که در آن اثرات فشار زمین به طور کامل نادیده گرفته می‌شود.

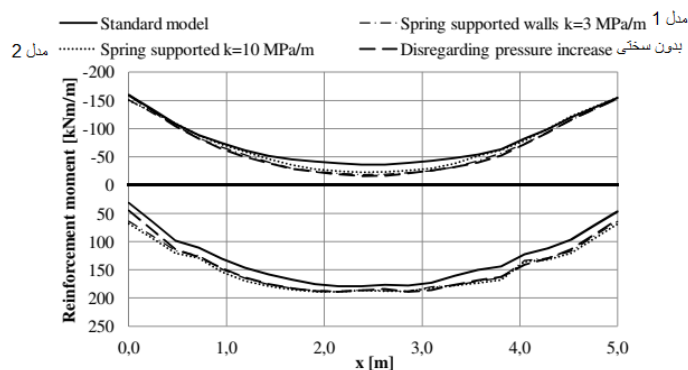


شکل ۵-۱۹ مدل‌های استاندارد برای اعمال فشار زمین بر اساس ترافیک ورک (۲۰۰۹) شکل الف، و الترناتیو مدلسازی برای اعمال فشار خاک

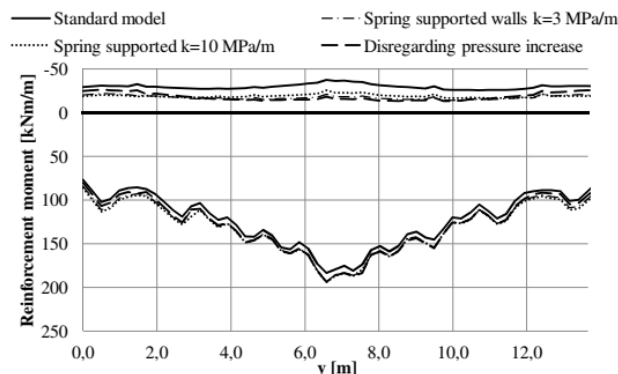
بر اساس روش تکیه‌گاه-فنر (مدل ۲) در شکل ب

۵-۵ نیروهای مقطعی در دال پل

با مطالعه لنگرهای مقاوم اصلی در دال پل، می‌توان نتیجه گرفت که مدل ۱ که توسط ترافیک ورک (۲۰۰۹) ارائه شده است بیشترین تاثیر را در مقایسه با روشهای دیگر، تحت اثر فشار زمین دارا می‌باشد. این تکنیک مدلسازی اثر مطلوبی در تعیین ماکزیمم پوش، با مقدار نسبتاً ثابت کاهش در لنگر مقاوم در میلگردهای پایین خواهد داشت که در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نمایش داده شده است. در پوش مقادیر میمینم مدلهای افزایش فشار خاک باعث افزایش لنگرها می‌شود لذا، اثر غیرمطلوبی بر رفتار سازه خواهد داشت. این افزایش به طور مشخص در میان دهانه دال پل مشخص می‌باشد.

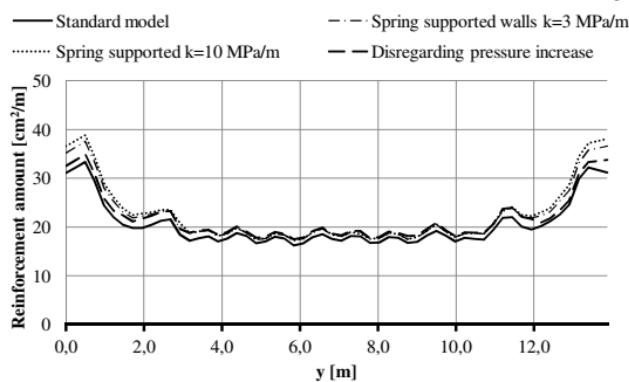


شکل ۲۰-۵ لنگر اصلی در میلگردها در دال پل در مقطع ۱-۱ از شکل ۶.۵

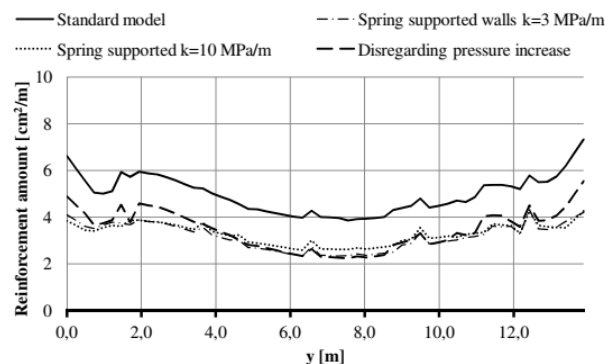


شکل ۵-۲۱ لنگرهای اصلی در میلگردها در دال پل در مقطع ۳-۳ از شکل ۶.۵

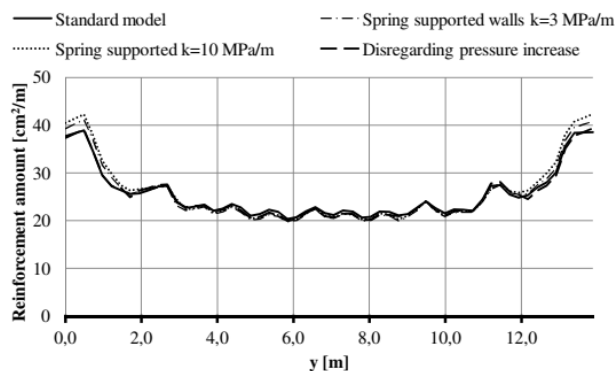
در مدل فاقد سختی گوشه، تغییری در لنگرهای مقاوم امتداد ثانویه دال ایجاد نمی‌شود و بررسی توزیع نیروها حاکی از تفاوت‌های جزئی در میزان آرماتور مورد نیاز مدل‌ها است. به‌گونه‌ای که در مدل‌های دیوار فنری (مدل‌های ۱ و ۲) و مدل بدون افزایش سختی، مقدار آرماتور تحتانی در دهانه پل اندکی افزایش می‌یابد (شکل ۲۱-۵). در مقابل، در مدل استاندارد که اثرات فشار خاک از طریق اعمال بار شبیه‌سازی می‌شود، نیاز به آرماتور در بخش فوقانی مقطع نسبت به سایر روش‌ها افزایش جزئی نشان می‌دهد (ترافیک ورکت ۲۰۰۹ الف). این تغییرات در نتایج مدل‌سازی به‌خوبی نمایان است (شکل ۲۲-۵).



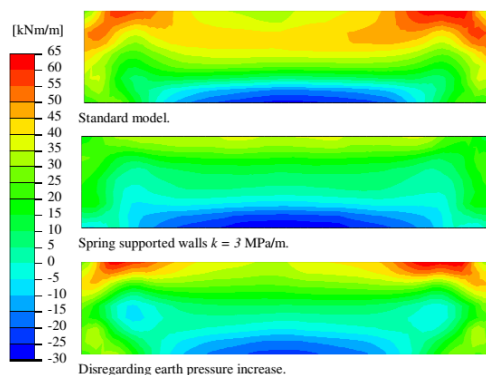
شکل ۵-۲۲ میلگرد مورد نیاز در بخش تحتانی دال پل در مقطع ۳-۳. تفاوت بسیار ناچیز بین مدل‌ها مشاهده می‌شود



شکل ۵-۲۳ میلگرد مورد نیاز در بخش فوقانی در مقطع ۳-۳ از شکل ۵.۶. از آنجاکه مقدار میلگرد مورد نیاز بسیار ناچیز است لذا اثر این مدلسازی ها بر نتایج قابل اغماض است. در مجموع با مشاهده این تفاوتها می توان نتیجه گرفت، ک حالت بالانس و تعادل در همه مدلها ایجاد شده است که این تعادل باعث می شود مقدار مورد نیاز برای میلگرد در همه مدلها تقریباً یکسان باشد (شکل ۵-۲۳)



شکل ۵-۲۴ مجموع میلگرد مورد نیاز برای مقطع ۳-۳ دال پل. تقریباً مقدار میلگرد مورد نیاز برای همه مدلها یکسان می باشد. همچنین می توان انتظار داشت که انتخاب روش مدلسازی اثر قابل ملاحظه ای بر دیوارهای پل داشته باشد. این موضوع با مطالعه کانتورهای توزیع تنش در مدلها قابل ارزیابی می باشد (شکل ۵-۲۴). لنگر طراحی به طور جزئی برای مدل ۲ و ۳ که دیوارها با فنر مدل شده اند، کاهش می یابد. مقدار ماکزیمم این لنگرها در نزدیکی گوشه های لبه فوقانی کاهش دارند، درحالیکه در مدل استاندارد، این مقادیر افزایش یافته است. این کاهش در مدلهایی که از فنر استفاده شده احتمالاً به علت کمک فنرها در توزیع نیروها به طور یکنواخت در مقطع می باشد.



شکل ۵-۲۵ لنگرهای اصلی توزیع شده در دیوارهای پل که بصورت پوش ماکزیمم نتایج ارائه شده است. اولین مدل (بالاترین) مدل استاندارد با فشار خاک که براساس تذلفیک ورک مدلسازی شده است، شکل میانی براساس مدلسازی فنر برای دیوار و فونداسیون با سختی  $k=3$  مگاپاسکال بر متر و مدل تحتانی با نادیده گرفتن فشار خاک مدلسازی شده است.

در این پژوهش، روشهای گوناگون مدلسازی سه بعدی برای تحلیل و طراحی پل های یکپارچه بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاکی از تفاوت های عموماً جزئی میان پاسخ مدل های مختلف بود؛ با این وجود، تغییر در پارامترهای بنیادین می تواند تأثیرات چشمگیری بر رفتار کلی سازه داشته باشد. یکی از چالش های اساسی در این مسیر، مدلسازی لبه های دال پل با المان های پوسته ای (شل) و اعمال پیچیده بارهایی نظیر فشار خاک و اثرات حرارتی است که به دلیل کمبود مطالعات صحت سنجی جامع، تحلیل و طراحی این بخش ها را با خطاهای احتمالی و ریسک

بالا مواجه می‌سازد (ترافیک ورک، ۲۰۰۹). از این رو، ارزیابی دقیق نتایج و تأیید صحت رفتار سه‌بعدی مدل تحت بارهای پیش‌بینی شده امری به‌شدت حیاتی است و نیاز به دستورالعمل‌های ساده و دقیق را برجسته می‌کند.

اگرچه پاسخ واقعی سازه‌های بتنی ماهیتی غیرخطی دارد، اما طراحی آن‌ها عموماً بر پایه تحلیل الاستیک خطی و با اتکا به ظرفیت بازتوزیع نیروها در مقاطع انجام می‌پذیرد. از آنجا که هدف اصلی در مرحله طراحی، یافتن حداکثر نیروها و لنگرهاست و نه لزوماً بیان رفتار دقیق سازه، مسائلی همچون پایداری مدل، صحت‌سنجی و درونیابی صحیح نتایج اهمیت دوچندانی می‌یابند. با توجه به اینکه تفاوت پاسخها در روش‌های مختلف ناچیز است، طراحان باید تمرکز خود را بر انتخاب تکنیک‌های ساده‌تر و به دور از پیچیدگی‌های غیرضروری معطوف سازند تا ضمن جلوگیری از خطاهای ترسیمی و محاسباتی، نتایجی قابل اعتماد و استوار برای طراحی دست آورند. باید توجه داشت که دستاوردهای این مطالعه منحصرأً برای طراحی پل‌های یکپارچه جدید معتبر بوده و ارزیابی سازه‌های موجود نیازمند رویکردها و تکنیک‌های متفاوتی است. بر مبنای چالش‌های بررسی‌شده، برای پژوهش‌های آتی تدوین یک راهنمای جامع و کاربردی برای مدل‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی پیشنهاد می‌گردد. افزون بر این، بومی‌سازی روندهای مدل‌سازی بین‌المللی جهت ادغام در آیین‌نامه پل ایران و همچنین واکاوی دقیق‌تر اثرات مبانی طراحی الاستیک خطی بر پاسخ سازه در حالات حدی سرویس‌دهی، از گام‌های ضروری و بنیادین برای ارتقای کیفیت و ایمنی این سازه‌ها به شمار می‌روند.

#### منابع

- AASHTO/NSBA Steel Bridge Collaboration. (۲۰۰۳). *G12.1-2003: Guidelines for design for constructability*.
- AASHTO/NSBA Steel Bridge Collaboration. (۲۰۱۱). *Guidelines for the analysis of steel girder bridges (G13.1)*. American Association of State Highway and Transportation Officials; National Steel Bridge Alliance.
- Al-Hashimy, M. (۲۰۰۵). *Load distribution in curved concrete slab-on-steel I-girder bridges* [Master's thesis, Ryerson University].
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (۱۹۹۶). *AASHTO Standard specifications for highway bridges* (۱۶th ed.).
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (۲۰۰۱). *AASHTO A policy on geometric design of highways and streets* (۴th ed.).
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (۲۰۱۴). *AASHTO LRFD bridge design specifications* (۷th ed.).
- Amiri, A. (۱۹۸۸). *Behavior of skewed continuous I-beam bridge structures* [Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign].
- Bae, H. U., & Oliva, M. G. (۲۰۱۲). Moment and shear load distribution factors for multigirder bridges subjected to overloads. *Journal of Bridge Engineering*, 17(۳), ۵۱۹-۵۲۷. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000271](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000271)

- Bakht, B. (۱۹۸۸). Analysis of some skew bridges as right bridges. *Journal of Structural Engineering*, 114(۱۰), ۲۳۰۷-۲۳۲۲.
- Bakht, B., & Jaeger, L. G. (۱۹۸۵). *Bridge analysis simplified*. McGraw-Hill.
- Bakht, B., & Jaeger, L. G. (۱۹۹۲). Ultimate load test of slab-on-girder bridge. *Journal of Structural Engineering*, 118(۶), ۱۶۰۸-۱۶۲۴.
- Bakht, B., & Moses, F. (۱۹۸۸). Lateral distribution factors for highway bridges. *Journal of Structural Engineering*, 114(۸), ۱۷۸۵-۱۸۰۳.
- Bapat, A. V. (۲۰۰۹). *Influence of bridge parameters on finite element modeling of slab on girder bridges* [Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University].
- Bishara, A. G., Chuan Liu, M., & El-Ali, N. D. (۱۹۹۳). Wheel load distribution on simply supported skew I-beam composite bridges. *Journal of Structural Engineering*, 119(۲), ۳۹۹-۴۱۹.
- Coletti, D., Chavel, B., & Gatti, W. (۲۰۱۱). Challenges of skew in bridges with steel girders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2251(۱), ۴۷-۵۶.
- Coletti, D., & Puckett, J. (۲۰۱۲). *Steel bridge design handbook: Structural analysis* (Technical Report No. FHWA-IF-۱۲-۰۵۲ - Vol. ۸). Federal Highway Administration.
- Computers and Structures, Inc. (۲۰۰۷). *CSiBridge v21 user's manual*. Computers and Structures, Inc.
- Computers and Structures, Inc. (۲۰۱۵). *CSiBridge user's manual*. Computers and Structures, Inc.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., & Plesha, M. E. (۱۹۸۹). *Concepts and applications of finite element analysis* (۳rd ed.). Wiley.
- Cross, B., Panahshahi, N., Vaughn, B., Petermeier, D., & Siow, Y. (۲۰۰۶). *Investigation of select LRFD design factors through instrumentation of bridge bearings* (Report No. FHWA/IL/HRC.۲۰۰۶-۲/۱۵۲). Southern Illinois University Edwardsville.
- Cross, B., Vaughn, B., Panahshahi, N., Petermeier, D., Siow, Y., & Domagalski, T. (۲۰۰۹). Analytical and experimental investigation of bridge girder shear distribution factors. *Journal of Bridge Engineering*, 14(۳), ۱۵۴-۱۶۳.
- Davis, J. M. (۲۰۰۳). *Serviceability field testing of hybrid HPS bridge A-6101* [Master's thesis, University of Missouri-Columbia].
- Mohseni, I., & Khalim, A. R. (۲۰۱۳). Live load distribution factor of continuous skewed multicell box-girder bridges. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 10(۲), ۲۴۷-۲۶۲.
- Mohseni, I., Khalim, A. R., & Kang, J. A. (۲۰۱۳). Development of a simplified method to estimate the fundamental frequency of skew continuous multicell box-girder bridges. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 10(۶), ۱۱۶۱-۱۱۷۷.
- Neville, A. M. (۱۹۹۵). Elastic modulus of concrete: Influence of aggregate type. *Construction and Building Materials*, 9(۲), ۱۰۵-۱۱۰.