

تحلیل قابلیت اطمینان دال خط رهدا تحت اثر بارهای عبوری

سعید محمدزاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
جبارعلی ذاکری، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
نگین سادات طیبی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
مهرداد نوری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: mohammadz@iust.ac.ir

پذیرش: ۹۲/۰۸/۰۴

دریافت: ۹۲/۰۳/۲۰

چکیده

امروزه کاربرد خطوط بدون بالاست در راه آهن به دلایل مختلفی در حال گسترش است. از جمله علل این توسعه میتوان به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش عمر مفید خط، امکان افزایش سرعت و افزایش مقاومت جانبی خط آهن اشاره کرد.

از آنجایی که سازه‌های مدرن نیازمند طراحی پیچیده‌تر و بحرانی‌تری هستند، نیاز روز افزونی به ارزیابی عدم قطعیت‌ها در بارگذاری، هندسه، مشخصات مصالح و سایر عوامل موثر بر عملکرد سازه احساس می‌شود. یکی از روش‌های ارزیابی این عدم قطعیت‌ها روش تحلیل قابلیت اعتماد است.

در تحلیل قابلیت اعتماد روش‌های مختلفی برای تعیین شاخص ایمنی و احتمال خرابی وجود دارد. در این مقاله از روش مرتبه اول برای تعیین شاخص قابلیت اعتماد یک دال خط بتنی استفاده شده است. به این منظور تحلیل المان محدود سازه انجام گرفته و با استفاده از روش سطح پاسخ توابع نیرو برآزش شده است. معادلات سطح شکست بر مبنای ضوابط آیین‌نامه اروپایی تنظیم شده و قابلیت اعتماد دال خط مذکور محاسبه شده است. ضمناً یک آنالیز حساسیت به منظور تعیین تاثیر تغییرات عوامل مختلف در قابلیت اعتماد دال خط انجام شده است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد دال خط مورد مطالعه از قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار بوده و بحرانی‌ترین سطح شکست برای دال خط مذکور، سطح شکست مربوط به برش است. همچنین تنش تسلیم آرماتورها و مقاومت فشاری بتن مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در قابلیت اعتماد دال خط به شمار می‌روند.

واژه‌های کلیدی: دال خط، بارگذاری، قابلیت اعتماد، تابع سطح شکست

۱. مقدمه

با توجه به اهمیت زیاد دال‌خطها و استفاده‌های روزافزون از آنها در صنعت ریلی از یک سو و نظر به وجود عدم قطعیت‌های مختلف موجود در پارامترهای بار و مقاومت مرتبط با طراحی این عناصر و وابستگی پارامترهای خرابی بر چگونگی ساخت، اجرا و بهره‌برداری از آن از سوی دیگر، نیاز به نگاه احتمال‌اندیشانه در طراحی این نوع خطوط حائز توجه و اهمیت است.

اگر چه تعدادی از روش‌های احتمالاتی برای در نظر گرفتن عدم قطعیتها توسعه یافته‌اند، ولی هنوز در طراحی بسیاری از سیستم‌های پیچیده، از روش‌های ساده‌سازی شده مانند طراحی بر اساس ضریب اطمینان استفاده می‌شود. ضریب اطمینان برای در نظر گرفتن درجه‌ای از اطمینان در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد و معمولاً به عنوان نسبت مقاومت به بار مورد انتظار تعریف می‌شود. در عمل بار و مقاومت متغیرهایی هستند که حول مقدار میانگینشان پراکنده شده‌اند. با توجه به پراکندگی متغیرها حول مقادیر میانگین، طراحی براساس روش‌های معمول ضریب اطمینان، دید کافی و جامعی را نسبت به شرایط سازه فراهم نمی‌کنند. بنابراین ارزیابی عدم قطعیتها در سازه‌ها، می‌تواند نقش موثری در طراحی بهینه و قابل اعتماد سازه‌ها داشته باشد [Choi et al., 2006].

در این راستا در سالهای اخیر مطالعات متعددی در خصوص قابلیت اعتماد در زمینه مهندسی راه‌آهن صورت گرفته است که از آن جمله میتوان به بررسی قابلیت اعتماد پلهای راه‌آهن [Mohammadzadeh, 2004]، قابلیت اعتماد تراورس بتنی پیش تنیده B70 [Mohammadzadeh and Va-habi, 2012] و تحلیل قابلیت اعتماد خستگی در درز ریل [Mohammadzadeh et al., 2012] اشاره نمود.

همچنین، در زمینه طراحی دال‌خطها مطالعات مختلفی صورت گرفته است. Liu و همکاران در سال ۲۰۱۱ مطالعاتی در زمینه تئوریهای طراحی خطوط سریع‌السیر بدون بالاست انجام دادند و ملاحظات طراحی دال خط را با در نظر گرفتن

بار قطار و تاثیر حرارت و تغییرشکل بستر خطوط بدون بالاست سریع‌السیر، بررسی نمودند [Liu et al., 2011]. گزارش انجمن سیمان پرتلند که در سال ۲۰۰۵ توسط حمید لطفی و همکاران تدوین شده است، روند کاملی از طراحی سازه‌های دال خط تحت بار محوری ۳۹ تن را ارائه کرده است [Lotfi and Oesterle, 2005] Esveld در سال ۲۰۱۰ مطالعاتی در زمینه نکات قابل توجه در طراحی دال خط انجام داده و به نمونه‌هایی از مدل‌های شبیه‌سازی دینامیکی که مشخصات وسیله نقلیه هم در آنها مدنظر قرار گرفته است، اشاره کرده است [Esveld, 2010] Michas در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به موضوع سیستم دال خط برای خطوط آهن سریع‌السیر پرداخته است. وی در این مطالعات پس از معرفی کامل انواع سیستم‌های بدون بالاست یک آنالیز المان محدود توسط برنامه ABAQUS انجام داده است و نتایج آنرا با نتایج به دست آمده از یک مدل مشابه برای خطوط بالاستی مقایسه کرده است [Michas, 2012]. در سال ۲۰۱۲ مدح‌خوان و همکاران، مطالعاتی در زمینه رفتار دال خطها بر بسترهای غیربالاستی انجام دادند. به این منظور یک مدل با ابعاد $2/1 \times 2/1 \times 0/215$ متر، تحت بار یکنواخت مورد آزمایش قرار گرفته و مقادیر نیرو و تغییرمکانهای متناظر ثبت شد و آنالیز حساسیت به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف در مشخصات مکانیکی دال خط از جمله بارهای نهایی و ترک خوردگی و میزان جذب انرژی، صورت پذیرفت. همچنین یک مدل‌سازی المان محدود نیز به منظور مقایسه نتایج تستها با مقادیر نظری انجام شده است [Madhkan, 2012]. مطیعان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود را به بررسی و ارزیابی پارامترهای مهم و اصلی طراحی دال خطها و ارائه روند طراحی برای دال‌خطها اختصاص داده است [Motieeian, 2010].

در رابطه با تحلیل قابلیت اعتماد دال‌های بتنی نیز مطالعات متعددی صورت گرفته است. Amleh و Lounis با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد به پیش بینی احتمالاتی

اعتماد دالخطها پرداخته شده است.

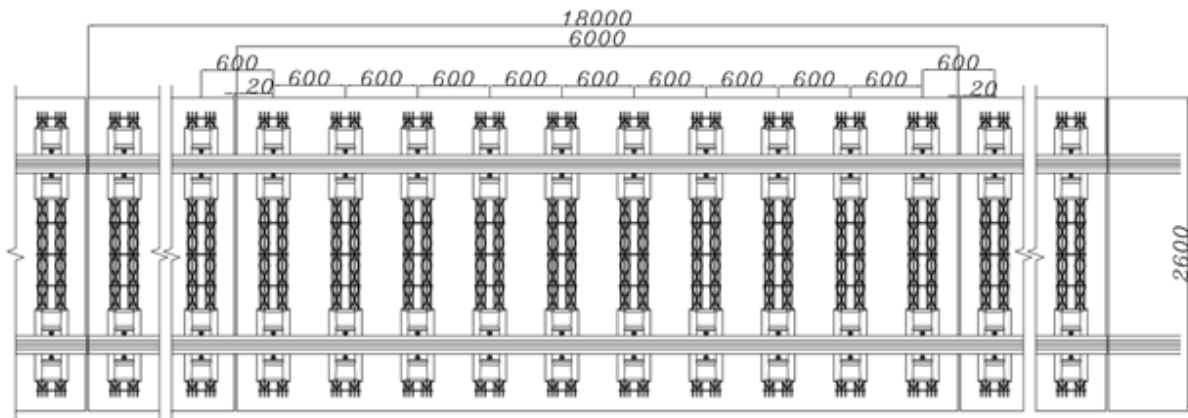
۲. مراحل انجام تحقیق

اولین گام برای تحلیل قابلیت اعتماد سازهها تشکیل معادلات سطح شکست است و معادلات سطح شکست در حالت کلی شامل دو بخش است؛ بخش اول شامل برآورد مقاومت سازه و بخش دوم آن معرف پاسخ سیستم است که هر یک از این بخشها تابع عوامل مختلف تصادفی و یا قطعی هستند. در این مقاله، یک مدل معمول دال خط بر بستر خاکی، مورد بررسی قرار گرفته است.

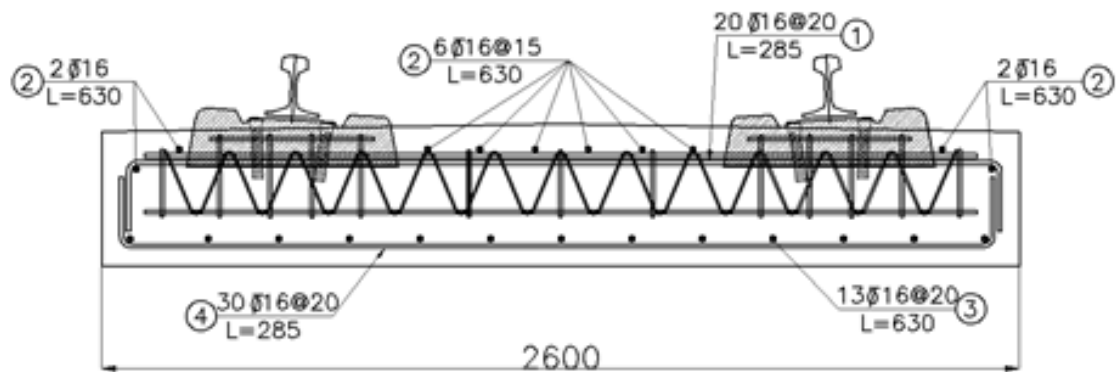
مدل مورد مطالعه مشابه سیستم رهدا ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است و پلان دال خط مورد مطالعه و مقطع عرضی آن به ترتیب در شکلهای (۱) و (۲) نشان داده شده است.

عمر مفید باقیمانده عرشه یک پل بتنی که در معرض خوردگی توسط کلریدها قرار گرفته است، پرداخته‌اند [Ferrand, Lounis and Amleh, 2004]. در سال ۲۰۰۵ مطالعاتی در زمینه تحلیل قابلیت اعتماد دال بتنی که بر روی تیرهای فولادی قرار دارد، انجام داده است [DaSilva, Ferrand, 2005]. و Roca احتمال گسیختگی دالهای بتنی را با توجه به متغیرهای هندسی، مصالح و شرایط محیطی مورد بررسی قرار داده و عدم قطعیت‌های موجود در بارگذاری و همچنین مشخصات مصالح را که با گذشت زمان تغییر می‌یابند، در تحلیل مسأله دخیل کرده‌اند [DaSilva and Roca, 1999].

با توجه به گسترش روزافزون خطوط بدون بالاست و نظر به اینکه تاکنون طراحی دال خط با نگاه احتمال اندیشانه مورد بررسی قرار نگرفته است، در این مقاله به تحلیل قابلیت



شکل ۱. پلان دال خط



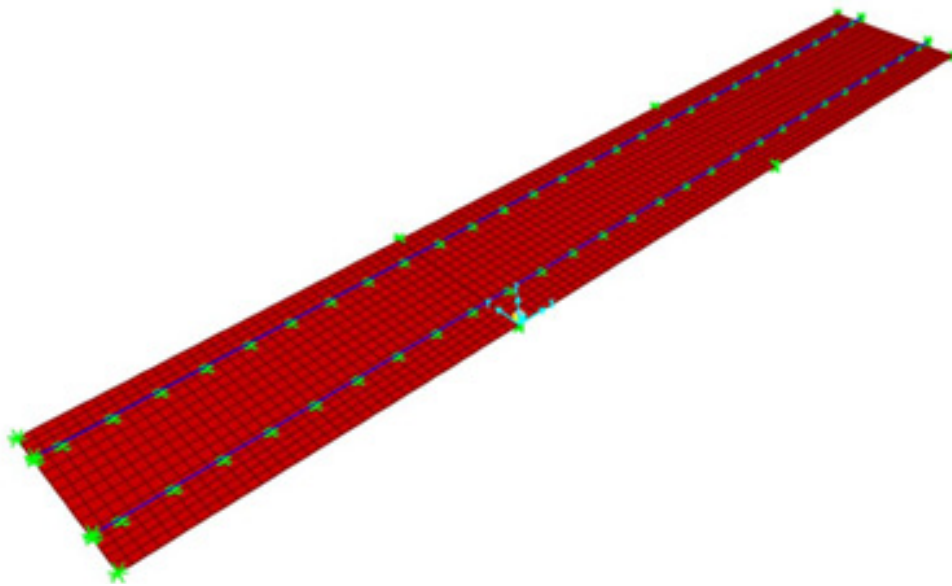
شکل ۲. مقطع عرضی دال خط

از نرم افزار SAP2000 انجام شده است. نمای مدل سه بعدی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این مدل سه عدد دال به طول ۶ متر مدلسازی شده است و درز بین دالها ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب می توان نتیجه مدلسازی را جهت بررسی نیروها در دالهای میانی و دو دال کناری دال خطها بکار گرفت.

میزان مقاومت سازه در برابر لنگرهای خمشی، برش و ضوابط کنترل عرض ترک بر مبنای ضوابط آیین نامه یوروکد و با حذف ضرایب اطمینان در ضوابط مذکور برآورد شده است. به منظور تعیین پاسخ سیستم، تحلیل المان محدود تحت بار زنده متحرک صورت گرفته است.

۱-۲ تحلیل المان محدود سازه

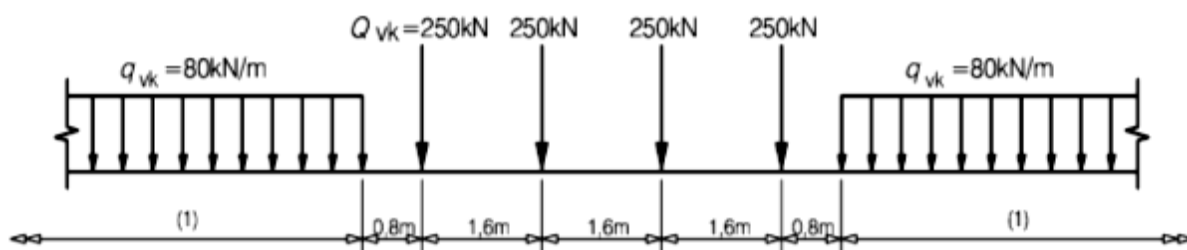
مدلسازی روسازی بتنی به صورت سه بعدی و با استفاده



شکل ۳. مدل سه بعدی دال خط در نرم افزار SAP

با استفاده از المان اتصال دو گرهی انجام شده است. المان اتصال از نوع فنر خطی فرض شده که سختی محوری آن برابر سختی پد ریل بوده و در سایر جهات آزاد است. سطح زیر دال به صورت بسترخاکی متراکم و به کمک فنر سطحی به نرم افزار معرفی شده است. مطابق با ضوابط آیین نامه یوروکد بار زنده وارد بر خط به صورت بار متحرک ناشی از عبور قطار و طبق الگوی بارگذاری LM71 به مدل معرفی شده است و ضریب ضربه طبق ضوابط آیین نامه یوروکد برای خطوط در شرایط نگهداری استاندارد، برابر با ۲ در نظر گرفته شده است [Lotfi and Oesterle, 2005, Esveld, 2010].

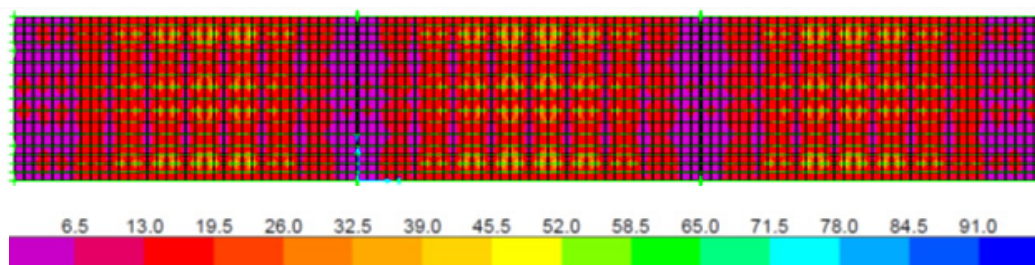
مطابق شکل (۳)، در این مدل فاصله محور تا محور ریل ۱۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است و دال بتنی توسط المان پوسته مدل سازی شده است. طول کلی دال ۱۸ متر و عرض و ضخامت آن به ترتیب ۲۶۰ و ۴۰ سانتی متر است. مش بندی دال به صورتی در نظر گرفته شده است که در محل اتصال به ریلها دارای گره باشد و شکل المانها به مربع نزدیک باشد. ابعاد مشهای ایجاد شده برابر ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. ریلها به طول ۱۸ متر با استفاده از المان قاب مدل سازی شده اند و مشخصات مقطع ریل UIC60 به آنها اختصاص داده شده است و اتصال ریل به دال بتنی در فواصل ۶۰ سانتی متری



شکل ۴. الگوی بارگذاری LM71

برای طراحی دال خط استفاده شده است. نمونه ای از نتایج تحلیل مدل دال خط در نرم افزار SAP که پوش لنگر طولی مثبت در دال خط را نشان می دهد در شکل (۵) ارائه شده است.

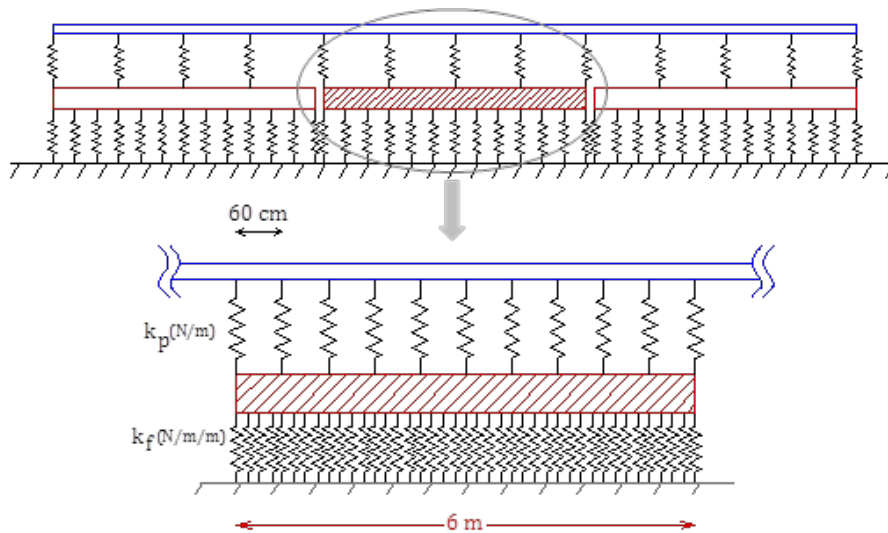
از آنجایی که در اکثر موارد برای طراحی دال خط در ایران، الگوی بارگذاری LM71 مطابق پیشنهاد آیین نامه یوروکد بر سازه اعمال می شود. به منظور حفظ هماهنگی میان ضوابط طراحی و بارگذاری، در این مقاله، از ضوابط آیین نامه یوروکد



شکل ۵. نتایج تحلیل سازه (لنگر طولی مثبت (kN.m/m))

مجزا متصل شده و دالها بر روی فنرهای گسترده که نمایانگر سختی بستر هستند، قرار گرفته‌اند. در شکل (۶) مدل اجزای محدود به منظور محاسبه پوش لنگر در دال بتنی نشان داده شده است.

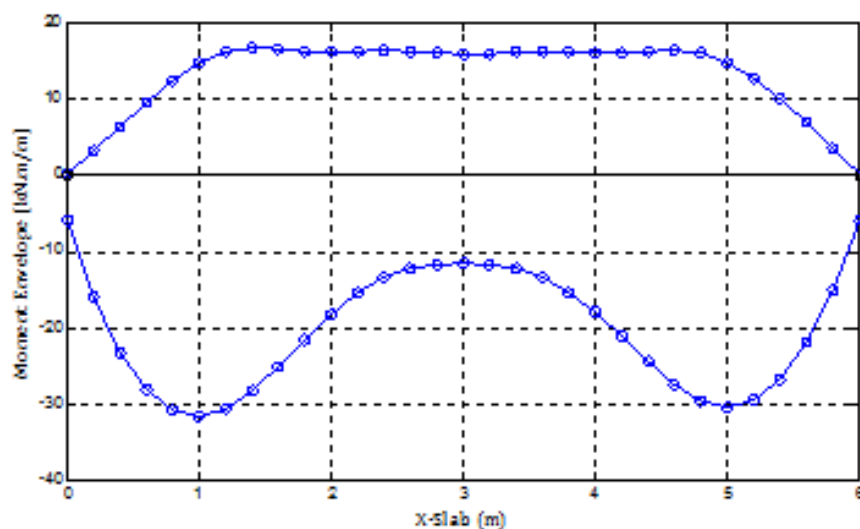
به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی، یک مدل ساده اجزای محدود با در نظرگیری دال به صورت چند تیر مجزا (به جای المان پوسته) توسعه داده شده است. المان ریل از طریق فنرهای متمرکز که نمایانگر سختی پدها هستند به دالهای



شکل ۶. مدل اجزای محدود با در نظرگیری دال به صورت چند تیر مجزا

دال میانی به دست آمده از نتایج تحلیل را نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار SAP، نشان می‌دهد.

در این مدل، نصف الگوی بار یوروکد (LM71) به صورت متحرک به سازه اعمال و نصف بُعد عرضی دال در محاسبات منظور شده است. شکل (۷) پوش لنگر طولی مثبت و منفی



شکل ۷. پوش لنگر مثبت و منفی در دال میانی بر اساس نتایج آنالیز اجزای محدود

در این مقاله به منظور تعیین توابع پاسخ سطح ۱۴ نقطه شامل مقادیر مختلف بار زنده و مدول عکس‌العمل خاک بستر مورد تحلیل قرار گرفت و مقادیر حداکثر لنگرهای خمشی و برش به عنوان پاسخ سیستم معرفی شدند. صحت توابع برازش شده، با مقایسه پاسخ توابع و نتایج تحلیل در ۸ نقطه جدید مورد بررسی قرار گرفت و دقت قابل قبول توابع سطح پاسخ مشخص شد. نمونه‌ای از توابع پاسخ به دست آمده برای لنگر خمشی مثبت طولی در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$M_L = 1000(0.21Q - 2659.3K_S - 188.76K_S^2 - 0.078Q \times K_S - 962.94) \quad (1)$$

در رابطه فوق، ML لنگر طولی مثبت ناشی از بار زنده (برحسب نیوتن-میلیمتر)، Q بار محوری (برحسب نیوتن) و KS مدول عکس‌العمل خاک بستر (برحسب نیوتن بر میلی‌متر مکعب) است.

با توجه به روند طراحی دال خط طبق ضوابط آیین‌نامه یوروکد و همچنین با استفاده از توابع نیروی برازش شده به روش پاسخ سطح، معادلات سطح شکست که در تحلیل قابلیت اعتماد دال خط بکار گرفته میشوند، شامل معادله سطح شکست خمشهای طولی و عرضی مثبت و منفی، معادله سطح شکست برش در مقطع عرضی، معادله سطح شکست برش پانچ و معادله سطح شکست کنترل عرض ترک تنظیم شد.

در این مقاله از نرم افزار MINITAB برای برازش تابع به روش سطح پاسخ استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت آنرا دارد که با معرفی مقادیر حداکثر و حداقل متغیرهای موجود، نقاطی را که آزمایش باید در آنها صورت گیرد، مشخص نماید. مقادیر حداکثر و حداقل با اضافه و کم نمودن ۳ برابر واریانس متغیر از مقدار میانگین محاسبه شده‌اند. پس از تعیین نقاط مورد آزمایش و تعداد آزمایشهای لازم، مقادیر نیروهای داخلی به ازای هر یک از این نقاط با استفاده از نتایج تحلیل اجزا محدود مشخص شده و به نرم افزار

همچنین به منظور بررسی تاثیر تعداد دال‌هایی که در مدل در نظر گرفته می‌شوند، یک مدل اجزای محدود شامل ۵ عدد دال مورد تحلیل قرار گرفت و همان طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، افزایش تعداد دال‌های مدلسازی شده، تاثیر چندانی در نتایج به دست آمده ندارد.

جدول ۱. نتایج حداکثر لنگر خمشی در مدل‌های شامل ۳ و ۵ عدد دال

مدل شامل ۳ عدد دال	مدل شامل ۵ عدد دال	
۱۶/۶۹۷	۱۶/۷۰۳	حداکثر لنگر طولی مثبت (kN.m/m)
۳۱/۴۸۵	۳۱/۴۸۳	حداکثر لنگر طولی منفی (kN.m/m)

۲-۲-۲-۲ برازش توابع پاسخ سیستم

یکی از مراحل اصلی تشکیل معادلات سطح شکست برای تحلیل قابلیت اعتماد، تعیین روابط بین نیروهای داخلی و پارامترهای موثر بر آنها است. به این منظور می‌بایست رابطه بین لنگرها و برشهای موجود در دال با مقدار بارزنده اعمال شده و نیز مدول عکس‌العمل خاک تعیین شود. در این مقاله از روش سطح پاسخ برای برازش نیروهای داخلی به صورت تابعی از بار زنده و مدول عکس‌العمل خاک استفاده شده است.

روش سطح پاسخ را می‌توان مجموعه‌ای از روش‌های تحلیل آماری دانست که در آن سعی می‌شود ارتباط بین پاسخ‌های سیستم و تغییرات متغیرهای ورودی به شکل روابط ساده‌ای بیان شود. مفهوم اصلی روش پاسخ سطح تقریب زدن یک تابع حالت حدی واقعی پیچیده و یا یک تابع حالت حدی ضمنی با استفاده از یک تابع صریح و ساده است. بنابراین برازش نیروهای داخلی بر اساس متغیرهای مدول عکس‌العمل خاک بستر و بار محوری با استفاده از این روش با دقت مناسب امکان پذیر شده است [Mohammadzadeh, 2004].

$$g = \frac{310}{310 \times f_{yk} \times M_{ED}} \times \frac{f_{yk} \times 0.5d \left(1 + \sqrt{1 - 2.353 \frac{M_{ED}}{bd^2 f_{ck}}} \right)}{500A_s} \times \left(11 + 1.84 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{1.2 \sqrt{f_{ck}} \times 10^{-3}}{\frac{A_s}{bd}} \right) + 3.9 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{1.2 \sqrt{f_{ck}} \times 10^{-3}}{\frac{A_s}{bd}} - 1 \right)^{3/2} \right) - \frac{6000}{d}$$

در روابط فوق، A_s مساحت آرماتورهای طولی تحتانی (بر حسب میلیمتر مربع)، f_{yk} تنش تسلیم آرماتورها (بر حسب نیوتن بر میلیمتر مربع)، d ضخامت موثر دال (بر حسب میلیمتر)، b عرض دال (بر حسب میلیمتر)، f_c مقاومت فشاری بتن (بر حسب نیوتن بر میلیمتر مربع)، M_{ED} لنگر طولی مثبت کل (بر حسب نیوتن-میلیمتر)، M_D لنگر طولی مثبت ناشی از بار مرده (بر حسب نیوتن-میلیمتر) و V_{ED} معرف برش (بر حسب کیلونیوتن) است.

۳. مشخصات آماری سیستم

مشخصات آماری متغیرهای مورد نظر در این پروژه شامل بار محوری، مقاومت فشاری بتن، تنش تسلیم فولاد، عمق موثر مقطع دال، مساحت میلگردها و مدول عکس‌العمل بستر خاکی در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات آماری سیستم

توزیع	ضریب تغییرات	نسبت مقدار اسمی به میانگین	مقدار اسمی	متغیر تصادفی	
نرمال	۰/۱۵	۱/۱	۲۵۰ (kN)	بارمحوری قطار	بارگذاری
نرمال	۰/۱۹	۰/۹۵	۳۰۰ (kg/cm ^۲)	مقاومت فشاری بتن	مشخصات مصالح
نرمال	۰/۱	۱/۲	۴۰۰۰ (kg/cm ^۲)	تنش تسلیم فولاد	
نرمال	۱/۷۸ / d*	۱	۳۵۰ (mm)	عمق موثر	مشخصات هندسی مقطع
نرمال	۰/۰۳	۱	متغیر در جهات مختلف	مساحت میلگرد	
نرمال	۰/۱	۱	۳۵ (kg/cm ^۳)	مدول عکس‌العمل بستر	مشخصات بستر

d* (عمق موثر) بر حسب سانتی‌متر است.

MINITAB معرفی میشوند. برای تطابق بین معادله برازش شده با داده‌های نمونه از معیار R2 یا R-square استفاده میشود [Box and Draper, 2007].

نمونه‌ای از معادلات سطح شکست که شامل خمش طولی مثبت، برش، برش پانچ و کنترل عرض ترک هستند، به ترتیب در روابط (۲) تا (۵) نشان داده شده است.

(۲): معادله سطح شکست شامل خمش طولی مثبت

$$g = A_s \times f_{yk} \times d - \frac{2.353}{4} \times \frac{A_s^2 f_{yk}^2}{b \times f_c} - M_{ED}$$

$$M_{ED} = M_D + M_L = 80000 + 1000(0.21Q - 2659.3K_S - 188.76K_S^2 - 0.078Q \times K_S - 962.94)$$

(۳): معادله سطح شکست شامل برش

$$g = \frac{A_{sw} \times 0.9d \times f_{yk}}{S} + \left(0.042 \times \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right)^{3/2} \times f_{ck}^{1/2} \right) \times b \times d - V_{ED}$$

$$V_{ED} = 600000 + 3Q + 62485K_S + 191071K_S^2 - 2Q \times K_S - 70287$$

(۴): معادله سطح شکست شامل برش پانچ

$$g = \left(0.042 \times \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right)^{3/2} \times f_{ck}^{1/2} \right) \times 2d \times (200 + 400 + 8d) - V_{ED}$$

$$V_{ED} = 0.4Q$$

۴. نتایج تحلیل قابلیت اعتماد

اولین گام در تحلیل قابلیت اعتماد تشکیل معادلات حالت حدی است. حالت‌های حدی، نشان‌دهنده حاشیه ایمنی بین مقاومت و بارگذاری هستند و می‌توان عدم بروز خرابی سازه را به صورت زیر بیان کرد:

$$g(x) = R(x) - S(x) \quad (6)$$

$$P_f = P[g(x) < 0] \quad (7)$$

که در آن R بیانگر مقاومت سازه و S بیانگر بارگذاری سیستم است. توابع R و S توابعی از متغیرهای تصادفی X هستند. $g(x) < 0$ معرف ناحیه شکست است و $g(x) = 0$ و $g(x) > 0$ به ترتیب معرف سطح شکست و ناحیه ایمن هستند. شاخص ایمنی یا قابلیت اعتماد را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2\rho_{RS}\sigma_R\sigma_S}} \quad (8)$$

در رابطه فوق β معرف شاخص ایمنی و μ_g و σ_g به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر میانگین و انحراف معیار تابع حالت حدی $g(x)$ هستند.

احتمال شکست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_f = P[g(x) < 0] = \int \dots \int f_x(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (9)$$

$g(x)$ تابع حالت حدی n بعدی و (x_1, \dots, x_n) تابع چگالی احتمالاتی مربوط به متغیرهای تصادفی X است. در یک حالت خاص با فرض اینکه R و S دارای توزیع نرمال و بدون همبستگی باشند تابع حالت حدی نیز دارای توزیع نرمال است و $g(x)$ تابع خطی از R و S است و تابع چگالی احتمال تابع حالت حدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_g(g) = \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{g - \mu_g}{\sigma_g} \right)^2 \right] \quad (10)$$

و احتمال شکست برابر است با:

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_g(g) dg \quad (11)$$

در حالتی که $g(x) = 0$ دارای توزیع نرمال باشد احتمال شکست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_f = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{0 - \mu_g}{\sigma_g} \right)^2 \right] dg = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \beta^2 \right] dg = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad (12)$$

که $\Phi(\cdot)$ تابع توزیع حجمی نرمال استاندارد است. بنابراین مقدار شاخص ایمنی می‌تواند نشانگر وضعیت کیفی سازه و میزان احتمال شکست باشد و این امر در شکل (۸) نشان داده شده است [Phoon, 2004]. به منظور محاسبه شاخص قابلیت اعتماد، از روش هازوفر-لیند استفاده شده است [Liu and Kiureghian, 1991]. شاخص قابلیت اعتماد براساس این روش، مطابق فرآیند تکراری روابط (۱۳) و (۱۴)، انجام می‌پذیرد.

$$\begin{aligned} \min \quad & \beta = |u| = \sqrt{u^T u} \\ \text{sub to} \quad & g(u) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

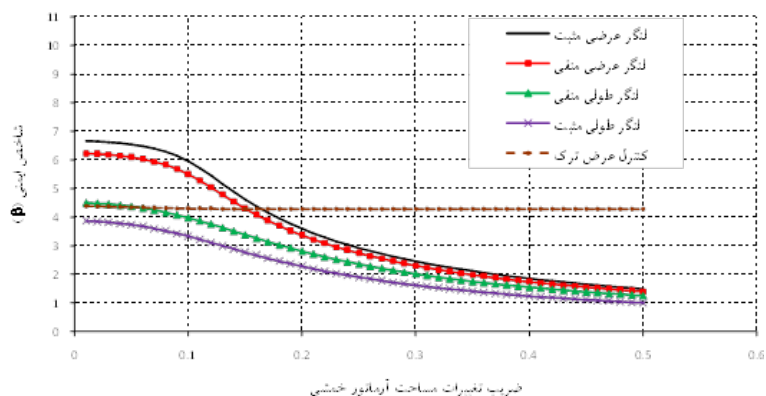
$$u^{(k+1)} = \frac{G_{u^{(k)}}^T u^{(k)} - g(u^{(k)})}{G_{u^{(k)}}^T G_{u^{(k)}}} G_{u^{(k)}} \quad (14)$$

که در این روابط، β شاخص قابلیت اعتماد، u پارامترهای نرمال شده (رابطه ۱۴)، g تابع حالت حدی و G مشتقات تابع حالت حدی نسبت به هر کدام از پارامترهای نرمال شده (رابطه ۱۶)، است.

$$u_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (15)$$

$$G_{u^{(k)}} = \left\{ \frac{\partial g}{\partial u_1}, \frac{\partial g}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial g}{\partial u_n} \right\}^T = \left\{ \sigma_1 \frac{\partial g}{\partial x_1}, \sigma_2 \frac{\partial g}{\partial x_2}, \dots, \sigma_n \frac{\partial g}{\partial x_n} \right\}^T \quad (16)$$

پس از تشکیل معادلات سطح شکست و تحلیل قابلیت



شکل ۸. رابطه شاخص ایمنی و احتمال

یک طراحی بهینه طرحی است که شاخص ایمنی آن با توجه به کلیه معادلات سطح شکست در حد قابل قبول و نزدیک به هم قرار گیرد. بنابراین نتایج تحلیل قابلیت اعتماد را می توان با توجه به نحوه بهره برداری، اهمیت سازه و شرایط مختلف محیطی در طراحی سازه بکار گرفت.

همچنین یک آنالیز حساسیت به منظور تعیین تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف در شاخص ایمنی سازه برای هر یک از حالات شکست صورت گرفت که نمونه ای از اهم نتایج به دست آمده برای دال میانی در اشکال (۹) تا (۱۴) نشان داده شده است.

نتایج این تحلیل نشان می دهد که تغییرات تنش تسلیم آرماتورها و مقاومت فشاری بتن بیشترین تأثیر را در شاخص ایمنی سازه داشته اند. تغییرات شاخص ایمنی برای سطوح شکست شامل لنگرهای خمشی و نیروهای برشی روند مشابهی در نمودارهای مختلف نشان می دهند و این در حالی است که روند مذکور برای سطح شکست شامل کنترل عرض ترک، متفاوت است. نمودارها نشان می دهند که نرخ تغییرات شاخص ایمنی هنگامی که ضریب تغییرات در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۳۶ قرار دارد، نسبت به سایر محدوده ها قابل ملاحظه است.

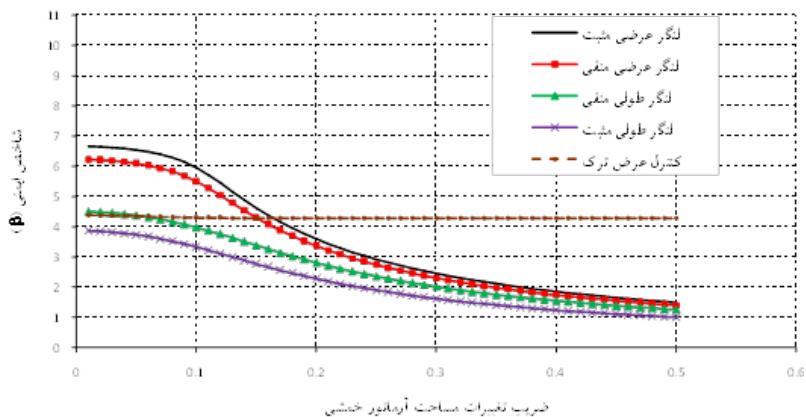
اعتماد دال خط، شاخص ایمنی دال خط های کناری و میانی به شرح جدول (۳) محاسبه شده است.

جدول ۳. مقادیر شاخص ایمنی دال میانی و دال های کناری (β)

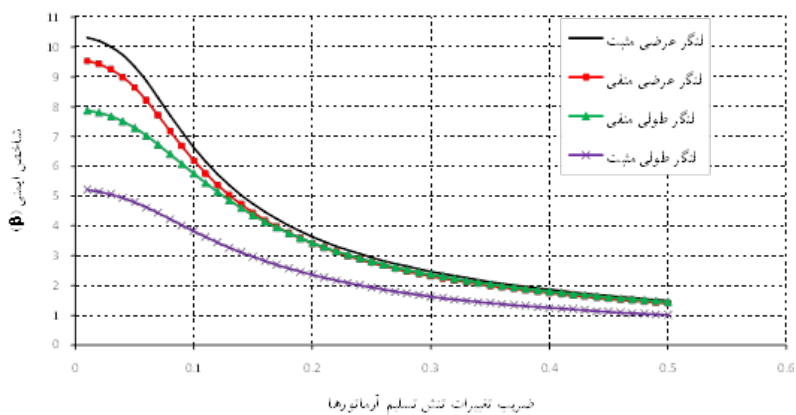
شاخص ایمنی		سطوح شکست		
دال کناری	دال میانی			
۳/۹۴	۳/۸۲	مثبت	طولی	لنگر
۳/۴۰	۴/۴۵	منفی		
۶/۱۳	۶/۶۲	مثبت	عرضی	
۵/۵۴	۶/۱۸	منفی		
۱/۸۶	۲/۶۷	برش		
	۵/۰۴	برش پانچ		
۴/۳۲	۴/۳۰	کنترل عرض ترک		

قابلیت اعتماد سازه به طور مستقیم می تواند معرف احتمال خرابی باشد و همچنین برآورد عمر باقی مانده سازه را ممکن می سازد. به این ترتیب نتایج به دست آمده از تحلیل قابلیت اعتماد نقش موثری در تصمیم گیری برنامه های تعمیر و نگهداری سازه های موجود ایفا می کند. نکته قابل توجه دیگر در این زمینه اهمیت قابلیت اعتماد سازه در تعیین ضرایب اطمینان در روند طراحی سازه است؛

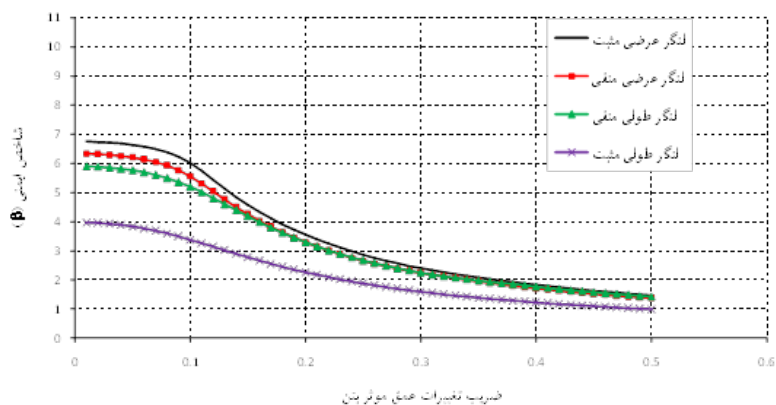
تحلیل قابلیت اطمینان دال خط ره‌دا تحت اثر بارهای عبوری



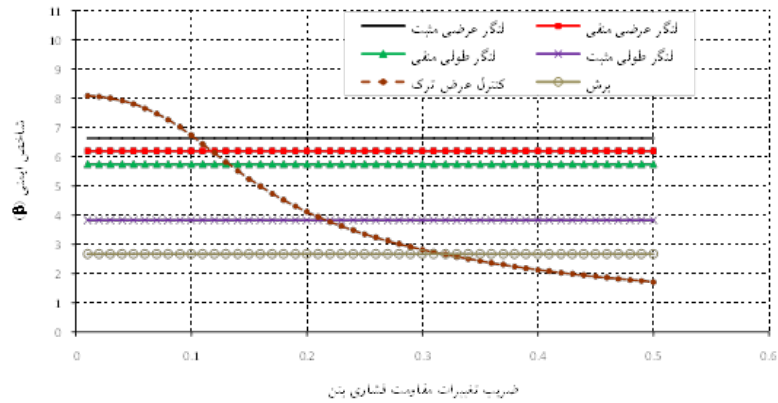
شکل ۹. تأثیر تغییرات مساحت آرمان‌تور خمشی بر شاخص ایمنی



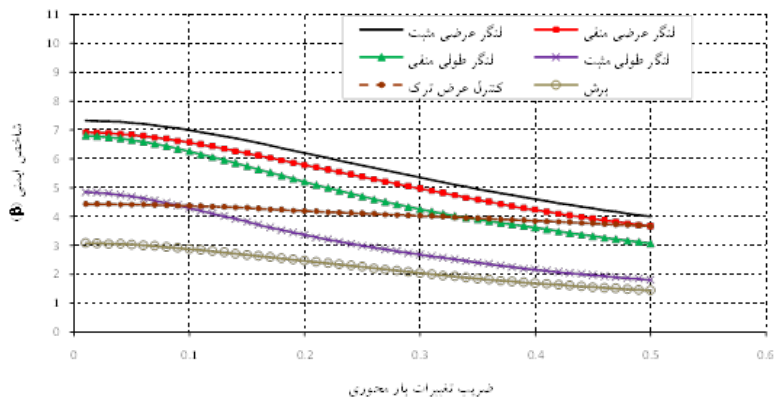
شکل ۱۰. تأثیر تغییرات تنش تسلیم آرمان‌تورها بر شاخص ایمنی



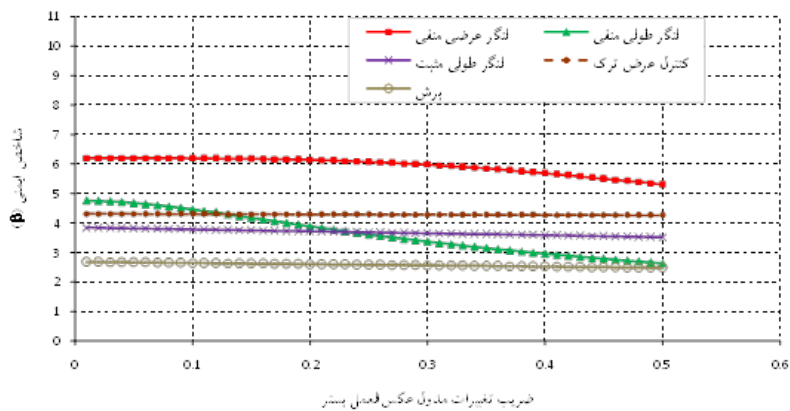
شکل ۱۱. تأثیر تغییرات عمق موثر بتن بر شاخص ایمنی



شکل ۱۲. تأثیر تغییرات مقاومت فشاری بتن بر شاخص ایمنی



شکل ۱۳. تأثیر تغییرات بار محوری بر شاخص ایمنی



شکل ۱۴. تأثیر تغییرات مدول عکس العمل بستر بر شاخص ایمنی

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد تمامی عوامل موثر در طراحی و تحلیل دال خط مورد بررسی قرار گیرد. هدف مقاله به دست آوردن شاخص قابلیت اعتماد دال خط بر بستر خاکی تحت بار LM71 است. به این منظور یک مدل دال خط متداول مشابه سیستم Rheda2000 مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام تحلیل سازه و تنظیم معادلات سطح شکست، شاخص قابلیت اعتماد دال خط با توجه به مهم ترین عوامل تاثیرگذار در پاسخ و مقاومت، براساس هر یک از این معادلات به دست آمد. نتایج به دست آمده شاخص ایمنی دال خط مورد نظر را معین کرده و همچنین مهم ترین عوامل موثر در ایمنی سازه با استفاده از نتایج آنالیز حساسیت صورت گرفته، مشخص شده است.

اهم نتایج به دست آمده با توجه به تحلیل قابلیت اعتماد دال خط به شرح زیر است:

۱- بحرانی ترین سطح شکست برای دال خط مورد مطالعه، سطح شکست مربوط به برش است که کمترین میزان شاخص ایمنی را در مقایسه با سایر حالات حدی نشان می‌دهد. شاخص ایمنی دال خط در برابر برش ۲/۶۶ است که مقدار متوسطی برای شاخص ایمنی به شمار می‌آید.

۲- مهم ترین عوامل تاثیرگذار در شاخص ایمنی سازه به ترتیب، تغییرات تنش تسلیم آرماتورها، مقاومت فشاری بتن، عمق موثر مقطع، مساحت آرماتورها و بار محوری است و مدول عکس‌العمل خاک بستر در مقایسه با موارد فوق تأثیر کمتری بر شاخص ایمنی خواهد داشت.

۳- نتایج محاسبه شاخص قابلیت اعتماد نشان می‌دهد که نرخ تغییرات شاخص ایمنی هنگامی که ضریب تغییرات در محدوده صفر تا ۰/۰۵ و محدوده ۰/۳۶ تا ۰/۵ قرار دارد در مقایسه با حالتی که ضریب تغییرات در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۳۶ قرار دارد، بسیار ناچیز است.

۴- شاخص ایمنی دال کناری در برابر لنگر طولی منفی، لنگرهای عرضی و برش به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از

شاخص ایمنی دال میانی است.

۵- شاخص ایمنی دال میانی در برابر لنگر طولی مثبت ۳/۸۲ و در برابر لنگر منفی ۴/۴۵ است که قابلیت اعتماد مناسبی به شمار می‌رود.

۶. پی‌نوشتها

- 1-Shell
- 2-Frame
- 3-Link
- 4-Area spring
- 5- Hasofer & Lind (HL)

۷. مراجع

- Bilow, D. N. and Li, D. (2005) "Concrete slab track test on the high tonnage loop at the Transportation Technology Center", AREMA Annual Conference & Exposition.
- Bouassida, Y. and Bouchon, E. (2012) "Bridge design to Eurocodes worked examples", European Commission, Joint Research Centre.
- Box, G. E .P. and Draper, N. R. (2007) "Response surfaces, mixtures and ridge analyses", John Wiley & Sons, Second edition.
- Choi, S., Grandhi, R.V. and Canfield, R. A. (2006) "Reliability-based structural design", Springer.
- DaSilva, T.J. and Roca, P. (1999) "Reliability updating of deteriorating concrete floor slabs", Second International Conference on High Performance

- Madhkhan, M., Entezam, M. and Torki, M. E. (2012) "Mechanical properties of precast reinforced concrete slab tracks on non-ballasted foundation", *Scientia Iranica* 19(1), pp. 20-26.
- Michas, G. (2012) "Slab track system for high-speed railways", Master Degree Project, Department of Transport Science, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Mohammadzadeh, S and Shayanfar, M.A. (2004) "Reliability analysis of railway bridges under the train dynamic loads using response surface method", 2nd International ASRANet Colloquium, Barcelona.
- Mohammadzadeh, S. and Vahabi, E. (2011) "Time-dependent reliability analysis of B70 pre-stressed concrete sleeper subject to deterioration", *Engineering Failure Analysis* 18(1), pp. 421-432.
- Mohammadzadeh, S., Sharavi, M. and Keshavarzian, H. (2013) "Reliability analysis of fatigue crack initiation of railhead in bolted rail joint", *Engineering Failure Analysis* 20, pp. 132-148.
- O'Connor, A. and Enevoldsen, L. (2008) "Probability based modelling and assessment of an existing post-tensioned concrete slab bridge", *Engineering Structure* 30(5), pp 1408-1416.
- Phoon, K. K. (2004) "Towards reliability-based design for geotechnical engineering", Special lecture Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures.
- Esveld, C. (2010) "Recent developments in high-speed track", First International Conference on Road and Rail Infrastructure, Opatija, Croatia.
- Ferrand, D. (2005) "Reliability analysis of a reinforced concrete deck slab supported on steel girders", Doctoral Dissertation, University of Michigan.
- Liu, P.L. and Kiureghian, A. D. (1991) "Optimization algorithms for structural reliability", *Structural Safety* 9, pp 161-177.
- Liu, X., Zhao, P. and Dai, F. (2011) "Advances in design theories of high-speed railway ballastless tracks", *Journal of Modern Transportation* 19(3), pp 154-162.
- Lotfi, H.R. and Oesterle, R. G. (2005) "Slab track for 39-ton axle loads structural design", Portland Cement Association, PCA R&D Serial No.2832.
- Lounis, Z and Amleh, L. (2004) "Reliability-based prediction of chloride ingress and reinforcement corrosion of aging concrete bridge decks", ASCE, pp 113-122.
- Low, H.Y. and Hao, H. (2001) "Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading", *Structural Safety* 23(2), pp. 157-178.

ogy in numerical geotechnical analysis”, 55th Canadian Society for Geotechnical Conference, Hamilton, Ontario.

- مطیعان نجار، م.ع. (۱۳۹۰) "بررسی و ارزیابی پارامترهای مهم و اصلی طراحی دال خطها و ارائه روند طراحی برای دال خطهای کشور"، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

for Korean Geotechnical Society, Seoul.

- Vogt, L., Wolffersdorff, P. A. V. and Rehfeld, E. (2005) "Behavior of slab track under extreme stress conditions", European Slab Track Symposium, Bruxelles.

- Zangeneh, N., Azizian, A., Lye, L. and Popescu, R. (2002) "Application of response surface methodol-

