

اثر تراکم خاک در رانش دینامیکی وارد بر کوله‌ی پل‌های یکسره و مجزا

سیده‌محمدالدین میرمحمد حسینی (استاد)

فاطمه خطیبی* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هندی‌س عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حذف مفاصل انبساطی و بالشتک‌ها در محل اتصال عرشه و کوله‌ی پل، به منزله‌ی یک مزیت قابل توجه از دو منظر اقتصادی و اجرایی، ساخت پل‌های یکسره را بسیار متداول کرده است. در این نوشتار، برای تعیین رانش خاک وارد بر کوله‌ی پل، از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. رانش خاک پشت کوله‌ی پل‌های یکسره، تحت سربار سیکلی ترفایک، در تراکم‌های مختلف به دست آمده و با رانش وارد بر کوله‌ی پل‌های متداول (پل‌های با بالشتک‌های ارتجاعی در محل اتصال عرشه به کوله، که در این نوشتار پل‌های مجزا نامیده شده‌اند) مقایسه شده است. نتایج تحلیلی عددی با نتایج یک تحلیل آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی شده است. بررسی اثر میزان تراکم خاک در رانش سیکلی، مبین تفاوت قابل ملاحظه در توزیع و مقدار رانش بین پل‌های یکسره و مجزاست.

واژگان کلیدی: کوله‌ی یکسره، کوله‌ی مجزا، رانش خاک، سربار سیکلی، مدل عددی، پل‌های یکسره، تراکم.

۱. مقدمه

پل‌های یکسره با داشتن مزیت اتصال یکپارچه بین عرشه و کوله و در بعضی موارد اتصال یکپارچه‌ی عرشه و کوله و دال دسترسی، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه طراحان قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین نگرانی در خصوص پل‌های یکسره مربوط به رفتار خاک قرارگرفته در پشت کوله‌هاست، که در واقع به نوعی پل را در بر گرفته است. اجرای یکپارچه‌ی عرشه و کوله، مکانیزم انتقال بار بین عرشه و کوله را تغییر داده و در اندرکنش کوله و خاکریز پشت آن مؤثر است. آئین‌نامه‌ی آشتو دستورالعمل‌های مشخصی برای ساخت پل‌های یکسره ندارد و ساخت این‌گونه پل‌ها بیشتر براساس تجربه صورت می‌گیرد. لذا بررسی دقیق اثرات اجرای پل‌ها به صورت یکسره در رفتار خاک و میزان این اثرات، به منظور حذف نیروها و لنگرهای اضافی در عرشه و کوله‌ها امری ضروری است. از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در مقدار فشار جانبی خاک، درصد تراکم خاک است. همچنین درصد تراکم یکی از عوامل مهم در اجرای خاکریز پشت کوله‌ی پل‌هاست. بیشتر مطالعات صورت‌گرفته تاکنون، در خصوص پل‌های یکسره، به مطالعه‌ی اثر بارهای سیکلی افقی ناشی از تغییرات حرارتی در رانش مرتبط بوده و اثر بارهای سیکلی قائم کمتر مورد توجه قرار گرفته است.^[۱] در پژوهشی در سال ۲۰۰۵، اثر نوع خاک در رانش پشت کوله‌های بلند، تحت مسیرهای تنش ناشی از تغییرات حرارتی بررسی شده است. در ادامه‌ی این مطالعه، در پژوهش‌های دیگری به طور اختصاصی به بررسی میزان فشار افقی در

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۳۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۶/۸، پذیرش ۱۳۹۲/۷/۲۰

خاکریزهای دانه‌ی پرداخته شده است.^[۲] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۷، با انجام مطالعات میدانی بر روی یک پل یکسره در ماساچوست، رفتار سیستم کوله‌ی یکسره‌ی مستقر بر شمع تحت تغییرات حرارتی روزانه و فصلی مورد بررسی قرار گرفته است.^[۳] و نیز در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۰۹، توزیع بار زنده در زیرسازه‌ی پل‌های یکسره براساس بارهای پیشنهادی آشتو به دست آمده و اثر پارامترهایی چون طول دهانه، فواصل شاه‌تیرها و... در توزیع بار بررسی شده است.^[۴] در خصوص بارهای سیکلی قائم نیز بیشتر مطالعات صورت‌گرفته مربوط به دیوارهای حائل است. در مطالعات دیگری در ایران (۲۰۰۹) نیز رانش سیکلی وارد بر دیوارهای حائل به صورت عددی بررسی شده است.^[۵] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۵ با استفاده از مدل آزمایشگاهی، رانش سیکلی وارد بر دیوار حائل اندازه‌گیری شده است، که از نتایج آن برای ارزیابی تحلیل‌های عددی این پژوهش نیز استفاده شده است.^[۸]

در این نوشتار دو هدف عمده دنبال می‌شود: ۱. مقایسه‌ی رانش ناشی از سربار ترفایک بر کوله‌ی پل‌های یکسره و مجزا در دو حالت استاتیکی و دینامیکی؛ ۲. بررسی و تعیین اثر میزان تراکم خاک در رانش سیکلی وارد بر کوله‌ی پل‌های یکسره و مجزا و مقایسه‌ی آنها با یکدیگر. هدف از مقایسه‌ی نتایج مربوط به این دو سیستم، رسیدن به شناخت جامع‌تر از رفتار خاکریز پشت کوله‌ی این پل‌ها در شرایط بهره‌برداری و همچنین دست‌یابی به معیاری برای انتخاب گزینه‌ی مناسب از بین پل‌های یکسره و مجزا در پروژه‌های مختلف است.

۲. مبانی و شرایط انجام مطالعات

نرم‌افزار FLAC با داشتن قابلیت در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، محاسبه‌ی تغییرشکل‌های بزرگ، استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته بدون نیاز به تغییر در الگوریتم حل، در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ی و... یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارها در حوزه‌ی تحلیل محیط‌های پیوسته‌ی خاکی و سنگی محسوب می‌شود. این نرم‌افزار از تحلیل لاگرانژی و روش حل صریح استفاده می‌کند. در تحلیل لاگرانژی، برخلاف تحلیل اولری که مصالح نسبت به شبکه‌ی ثابت المان‌ها حرکت می‌کنند، شبکه‌ی المان‌های تعریف‌شده نیز به همراه مصالح حرکت می‌کند. به این ترتیب که تغییرمکان جزئی‌گره‌ها به مختصات گره‌ی اضافه می‌شود و شبکه به همراه مصالح تغییرمکان می‌دهد.

در روش حل صریح، ابتدا با کمک معادلات حرکت و براساس تنش‌های موجود، تغییرمکان‌ها و سرعت‌ها به دست می‌آیند. سپس با استفاده از سرعت‌های گره‌ی، نرخ تغییرات کرنش در هر المان محاسبه می‌شود. با محاسبه‌ی کرنش‌های جدید، تنش‌های جدید در المان محاسبه و مجدداً سیکل قبلی تکرار می‌شود. روند حل صریح معادلات در هر گام زمانی، در شکل ۱ نشان داده شده است.

نرم‌افزار FLAC با داشتن قابلیت لازم جهت مدل‌سازی خاک و سازه‌ی پل و انجام تحلیل‌های موردنظر، برای مدل‌سازی انتخاب شده است. در ادامه، جزئیات بیشتری از مدل‌سازی عددی، مشخصات مصالح و مشخصات سر بار مورد استفاده در تحلیل‌ها ارائه شده است.

۲.۱. مدل‌سازی عددی و کالیبراسیون

در کلیه‌ی روش‌های آنالیز عددی، از جمله آنالیز لاگرانژی که در نرم‌افزار FLAC مورد استفاده قرار می‌گیرد، از فرضیاتی استفاده می‌شود که الزاماً انطباق کاملی با رفتار واقعی مصالح ندارند. همچنین همواره امکان بروز خطا در مدل‌سازی و تعریف شرایط مرزی وجود دارد. لذا لازم است که نتایج تحلیل‌های عددی به نحوی کنترل و نسبت به صحت آنها اطمینان حاصل شود. این امر می‌تواند از طریق مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی یا میدانی موجود صورت پذیرد. در صورتی که اختلاف نتایج در حد قابل قبولی باشد، می‌توان به صحت عملکرد مدل عددی اعتماد کرد و مدل‌سازی‌های دیگری را نیز با منطق به‌کاررفته در مدل‌سازی اولیه انجام داد. در این پژوهش، با توجه به دسترسی به نتایج آزمایشگاهی رانش سیکلی دیوار حائل مربوط به یک مدل فیزیکی، ابتدا مدلی از یک دیوار حائل و خاکریز پشت آن مشابه مدل فیزیکی فوق در نرم‌افزار FLAC ساخته شده است.

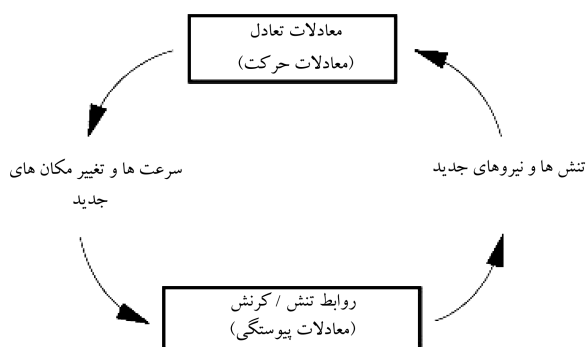
نتایج آزمایشگاهی مربوط به مدلی است که در تحقیقات قبلی ساخته شده است.^[۸] در این مدل، یک دیوار حائل صلب فلزی به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر درون تانک خاک قرار گرفته و سر بار سیکلی توسط سیلندر پنوماتیک در فاصله‌ی مشخصی از دیوار بر روی یک صفحه‌ی صلب وارد شده است. از طریق حس‌گرهای الکترونیکی نصب‌شده بر روی دیوار، میزان فشار جانبی در ترازهای مختلف ارتفاعی دیوار اندازه‌گیری شده و دیاگرام توزیع تنش در ارتفاع دیوار به دست آمده است. دستگاه آزمایش و سیستم کنترل سر بار و قرائت و پردازش اطلاعات مربوط به مدل آزمایشگاهی به همراه مخزن بارش ماسه جهت رسیدن به تراکم یکنواخت و موردنظر در شکل ۲ نشان داده شده است.

مدل دیوار حائل مورد بحث در نرم‌افزار FLAC نیز ساخته شده است. ابعاد و جنس دیوار، مشخصات مصالح خاکریز و سر بار سیکلی وارد شده دقیقاً مانند مدل آزمایشگاهی بوده است. شبکه‌ی مربوط به خاکریز المان‌هایی با ابعاد 10×10 سانتی‌متر داشته و در طی ۵ مرحله‌ی خاکریزی ایجاد شده است. در هر مرحله، ۱۰ سانتی‌متر از ارتفاع خاکریز ایجاد شده و مدل کشسان، به‌عنوان مدل تحلیل رفتار خاک به آن اختصاص یافته است. پس از تحلیل مدل تحت وزن خاکریز و رسیدن به تعادل اولیه، کلیه‌ی جابجایی‌ها صفر و لایه‌ی بعدی خاکریزی با روند مشابه انجام می‌شود. پس از ایجاد خاکریز ۵۰ سانتی‌متری و قبل از قراردادن سر بار سیکلی، مدل رفتار خاک از مدل کشسان به مدل موهر-کولمب تغییر می‌یابد. رانش استاتیک تحت وزن خاک، که از مدل عددی به دست آمده بود، با رابطه‌ی Jacky (۱۹۴۸) و نیز پس از اعمال سر بار سیکلی، رانش سیکلی ناشی از سر بار با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقایسه‌ها در هر دو مورد نشان داده است که نتایج تحلیل عددی با نتایج روابط تئوری موجود و همچنین مدل آزمایشگاهی هماهنگی قابل قبولی دارد. شکل ۳، کانتورهای تنش افقی مدل عددی دیوار حائل و شکل ۴، مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با روابط تئوریک و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهند.

با توجه به هماهنگی خوب مدل دیوار حائل با تحلیل‌های تئوری و تجربی، پل یکسره و مجزا نیز با روش مشابه مدل‌سازی شده‌اند. در این مرحله از مدل‌سازی، طول عرشه ۲۰ متر، طول هر یک از خاکریزها ۱۲ متر و ارتفاع کوله‌ها و خاکریزها ۵ متر است. شکل شماتیک پل به همراه بارگذاری ترافیک در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به ارتفاع ۵ متری کوله، خاکریز در ۵ مرحله - در هر مرحله ۱ متر خاکریزی با مدل کشسان - ساخته شده و پس از برقراری تعادل استاتیکی سر بار موردنظر وارد شده است. پل‌های یکسره و مجزای مدل‌شده، هر دو بتنی و سیستم عرشه‌ی دو عنصری داشتند. شرایط تحلیل کرنش مسطح و ابعاد المان‌ها در



شکل ۲. مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری رانش سیکلی وارد بر دیوار حائل.^[۸]



شکل ۱. الگوریتم حل معادلات به روش صریح در نرم‌افزار FLAC (۲۰۰۲).

شبکه‌بندی کوله و عرشه، $5^\circ \times 5^\circ$ سانتی‌متر و در خاکریز، به منظور تأمین دقت کافی برای اعمال بار سیکلی، $1^\circ \times 1^\circ$ سانتی‌متر بوده است. بین خاک و کوله از المان‌های مرزی استفاده شده است، که میزان سختی آنها از طریق رابطه‌ی ۱ تعیین شده است:

$$K_n = K_s \approx 10 \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق K_n و K_s به ترتیب سختی نرمال و برشی المان مرزی می‌باشند. K مدول کشسانی حجمی و G مدول کشسانی برشی المان مرزی است. ΔZ_{\min} حداقل بعد زون‌های متصل به محل درز یا المان مرزی است. زاویه‌ی اصطکاک المان مرزی (interface) بین کوله و خاکریز از طریق رابطه‌ی ۲ تعیین و در مرزهای قائم از شرایط مرزی آزاد استفاده شده است:

$$\varphi_{\text{int}} = \frac{2}{3} \varphi_{\text{soil}} \quad (2)$$

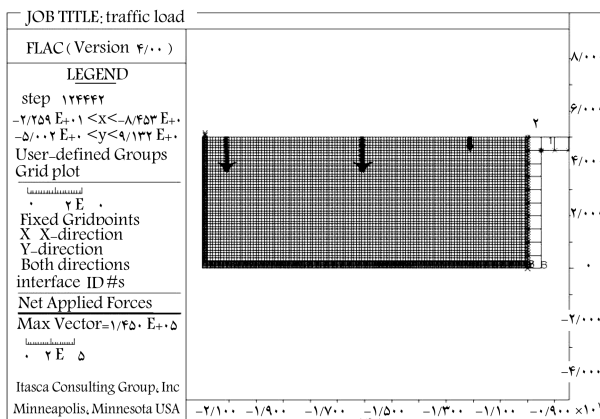
ابعاد و مشخصات مکانیکی بالشتک‌ها در پل مجزاء، براساس تخمینی از عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی و همین‌طور فرضیاتی برای تغییرات حرارتی محیط تعیین شده است. بالشتک به صورت یک شبکه در فاصله‌ی بین عرشه و کوله تعریف شده است. قسمتی از مدل پل یکسره در نرم‌افزار FLAC بزرگ‌نمایی و در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲.۲. مشخصات مصالح

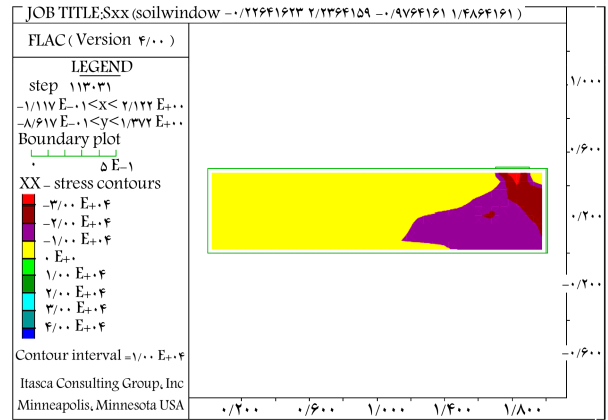
خاک مورد استفاده در مدل‌سازی خاکریز، ماسه‌ی خشک فیروزکوه است، که قبلاً در مطالعات میرمحمدحسینی و نیکخواه (۲۰۰۵)^[۸] مورد استفاده قرار گرفته و خصوصیات آن در ۳ تراکم مختلف در آزمایشگاه تعیین شده است (جدول ۱). مدول کشسانی خاک (E) در آزمایشگاه تعیین شده و مدول برشی (G) و مدول بالک (K) با استفاده از روابط ۳ و ۴ به دست آمده‌اند:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

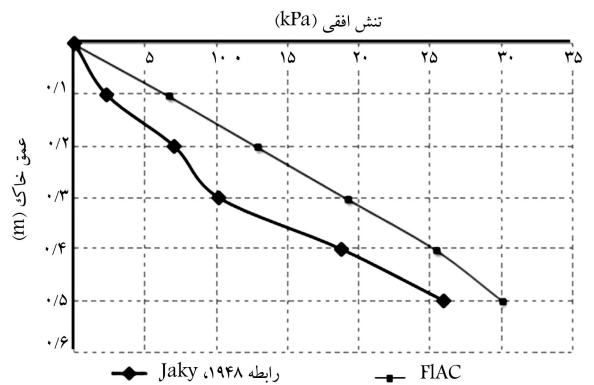
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4)$$



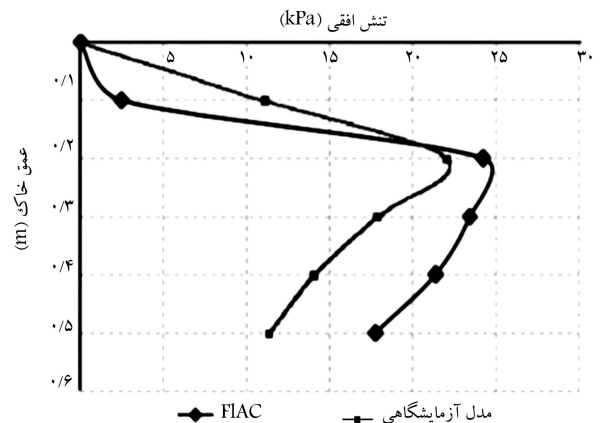
شکل ۶. بزرگ‌نمایی کوله‌ی پل یکسره و خاکریز پشت آن تحت سربار ترافیک در **FLAC 2D**.



شکل ۳. کانتورهای تنش افقی وارد بر دیوار حائل تحت سربار سیکلی در نرم‌افزار **FLAC**.

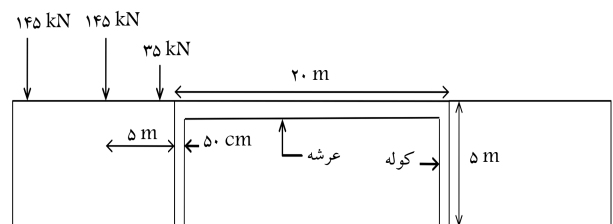


الف) رانش استاتیکی تحت وزن خاک؛



ب) رانش سیکلی تحت سربار.

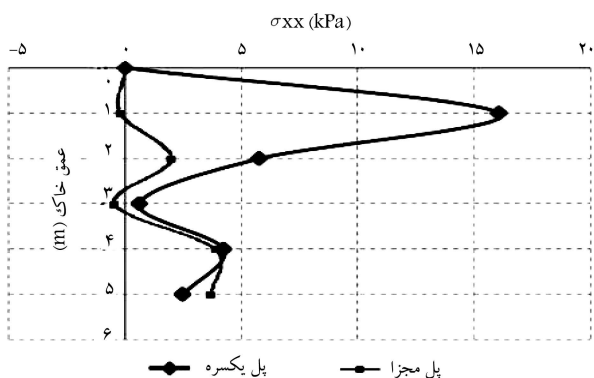
شکل ۴. کنترل نتایج مدل عددی دیوار حائل.



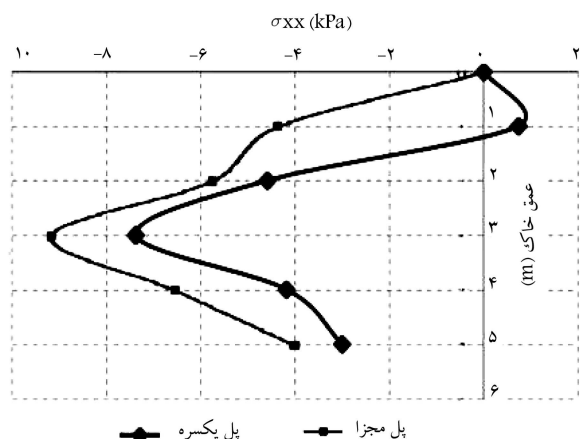
شکل ۵. شماتیک پل یکسره و سربار ترافیک وارد بر خاکریز.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی خشک فیروزکوه در ۳ حالت مختلف. [۸]

نوع خاک	چگالی نسبی (%)	وزن مخصوص متوسط (kN/m^3)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (درجه)
ماسه‌ی سست	۲۴	۱۴٫۱۶	۳۳
ماسه‌ی متوسط	۵۵	۱۵٫۳۰	۳۶٫۵
ماسه‌ی متراکم	۶۷	۱۵٫۵۹	۳۸٫۵



الف) رانش وارد بر کوله‌ی چپ؛



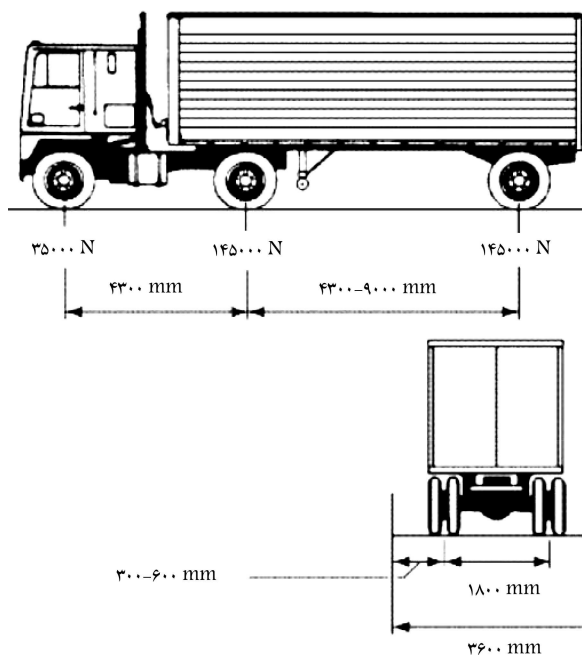
ب) رانش وارد بر کوله‌ی راست.

شکل ۸. رانش استاتیکی کل تحت سربار ترافیکی.

اگرچه روند تغییرات رانش در ارتفاع کوله، برای هر دو پل تقریباً یکسان است؛ اما تقریباً در تمامی عمق‌ها رانش وارد بر کوله‌ی پل یکسره بیشتر از پل مجزاست. این امر به این دلیل است که پیوستگی و یکپارچگی عرشه و کوله در پل‌های یکسره، جابجایی کوله را محدود می‌کند و به آن اجازه‌ی حرکت نمی‌دهد، اما در پل‌های معمولی به دلیل خاصیت کشسان بالشتک، امکان تغییر مکان محدودی وجود دارد، لذا ضریب فشار افقی خاک و به دنبال آن تنش‌های افقی کاهش می‌یابند. در منحنی‌های شکل ۸ ب جهت نیروی خاک، برخلاف کوله‌ی سمت چپ است و کوله‌ی سمت راست به سمت خاک حرکت و به آن فشار وارد می‌کند. این فشار در پل یکسره مقدار کمتری دارد، زیرا پیوستگی عرشه و کوله امکان جابجایی کوله را محدود کرده است. در حالی که در پل مجزا امکان انتقال بار بیشتر بوده است.

۲.۳. تحلیل دینامیکی

سربار سیکلی ترافیک با اندازه و موقعیت قرارگیری طبق شکل ۵، بر خاکریز وارد شده است. در صورتی که سرعت کامیون 90 km/hr باشد، فاصله‌ی 10 متری بین محور اول و آخر در طول 0.4 ثانیه طی خواهد شد. لذا بسامد بار 2.5 Hz به دست می‌آید. رانش سیکلی کل وارد بر کوله‌ی سمت چپ پل‌ها، پس از 10° سیکل بارگذاری، در شکل ۹ نشان داده شده است. نمودارها نشان می‌دهند که برخلاف رانش استاتیکی رانش سیکلی وارد بر کوله‌ی مجزا بزرگ‌تر از کوله‌ی یکسره است. همچنین محل برآیند رانش نیز در کوله‌ی مجزا، در فاصله‌ی کمتری از پای کوله قرار دارد. دلیل این امر گیرداری بیشتر کوله‌ی یکسره در محل اتصال به عرشه است.



شکل ۷. مشخصات کامیون طرح آشتو. [۹]

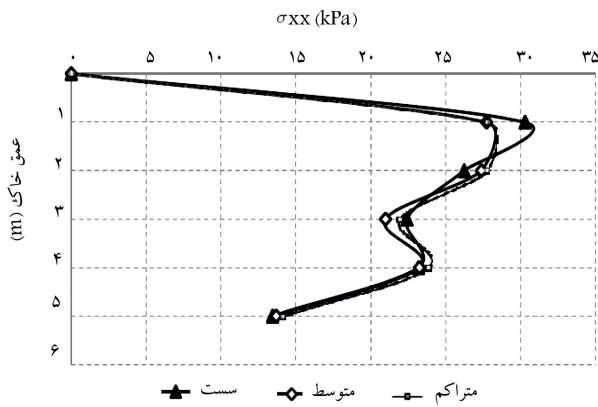
۳.۲. مشخصات سربار

کامیون طرح آئین‌نامه‌ی آشتو به‌عنوان سربار ترافیک در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. بار محورها به صورت نقطه‌یی در محل چرخ‌های کامیون وارد شده است. شکل ۷، کامیون استاندارد آشتو به همراه بار محورها و فواصل آنها را نشان می‌دهد. در این نوشتار فاصله‌ی دو محور سنگین 5.7 متر فرض و مجموع فاصله‌ی محور اول تا سوم کامیون 10 متر در نظر گرفته شده است. در کلیه‌ی تحلیل‌های صورت گرفته محل بار مطابق شکل ۵ است.

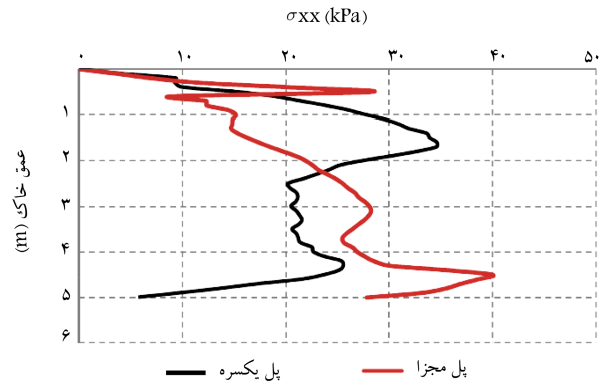
۳. تحلیل‌های عددی

۱.۳. تحلیل استاتیکی

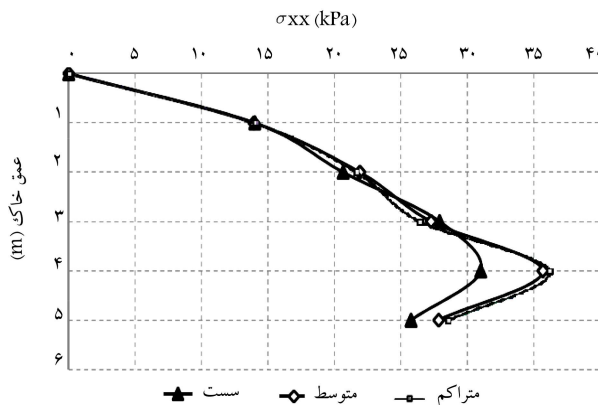
پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل عددی دیوار حائل، مدل پل یکسره و پل مجزا با روند مشابه ساخته و رانش استاتیکی وارد بر کوله‌ها تحت سربار کامیون آشتو محاسبه شدند. شکل ۸، نمودار تغییرات رانش کل استاتیکی وارد بر کوله‌های سمت چپ و راست پل‌ها را نشان می‌دهد. منحنی‌های شکل ۸ الف نشان می‌دهند که



شکل ۱۰. توزیع رانش کل سیکی در درصد‌های مختلف تراکم پشت کوله‌ی پل یکسره پس از ۱۰ سیکل.



شکل ۹. رانش کل سیکی وارد بر کوله‌ی چپ پل‌های یکسره و مجزا تحت سربار تراфик پس از ۱۰ سیکل.



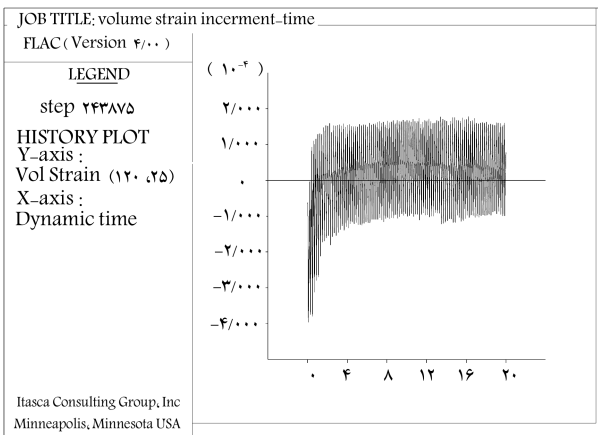
شکل ۱۱. توزیع رانش کل سیکی در درصد‌های مختلف تراکم پشت کوله‌ی پل مجزا پس از ۱۰ سیکل.

۴. تأثیر درصد تراکم خاک در رانش سیکی

در این بخش رانش سیکی بیشینه‌ی پشت کوله‌ی پل‌های یکسره و مجزا در درصد‌های مختلف تراکم خاک مورد بررسی قرار گرفته است. موقعیت بار مطابق شکل ۵ و مشخصات خاکریز در ۳ حالت سست، متوسط و متراکم طبق جدول ۱ است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب توزیع رانش سیکی وارد بر کوله‌ی سمت چپ پل یکسره و پل مجزا را در درصد‌های مختلف تراکم نشان می‌دهند.

نمودارهای رسم‌شده بیانگر نتایج متفاوتی برای تأثیر تراکم خاکریز در بیشینه‌ی رانش دینامیکی وارد بر کوله‌ی پل‌های یکسره و مجزا هستند. به طوری که در پل یکسره با کاهش درصد تراکم یا سست‌تر شدن خاک، بیشینه‌ی رانش سیکی پشت کوله بزرگ‌تر می‌شود. در حالی که در پل مجزا با متراکم‌تر شدن خاک، بیشینه‌ی رانش سیکی پشت کوله افزایش می‌یابد. البته در هر دو مورد، در دو تراکم متوسط و زیاد، تفاوت مقادیر ناچیز است؛ اما نسبت به حالت سست تفاوت بیشتری مشاهده می‌شود. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده برای پل مجزا مشابه نتایجی است که قبلاً در بررسی‌های آزمایشگاهی در مورد دیوار حائل به‌دست آمده است.^[۸]

آزادی حرکت در رأس دیوارهای حائل باعث می‌شود که خاکریز همراه با دیوار حرکت کند و لذا تنش‌های افقی بیش از آنکه متأثر از رفتار کرنشی خاک باشند، تحت تأثیر درصد تراکم یا چگالی نسبی خاک هستند. بدیهی است که هر چه چگالی نسبی خاک بیشتر باشد، تنش‌های قائم و به دنبال آن تنش‌های افقی، نیز که ضریبی از تنش‌های قائم هستند، افزایش می‌یابند. در پل‌های مجزا با توجه به وجود یک بالشتک الاستومر در رأس کوله و انعطاف‌پذیری افقی و قائم آن، تا حدودی امکان حرکت افقی در رأس کوله وجود دارد. بنابراین رفتار کوله‌ی این پل‌ها، شبیه به رفتار دیوار حائل است. اما در پل‌های یکسره اتصال کوله به عرشه‌گیردار بوده و در واقع کوله در محل اتصال به عرشه مهار شده است و رفتار خاکریز پشت آن نیز بیشتر تحت تأثیر رفتار کرنشی خاک است. به منظور انجام یک بررسی جامع‌تر، اثر درصد تراکم‌های مختلف در رانش خاک، در سیکل‌های مختلف بارگذاری بررسی شده است. به این منظور رانش سیکی وارد بر کوله‌ی یکسره در ۳ حالت تراکمی خاک پشت مشتمل بر حالت سست، با تراکم متوسط و حالت متراکم پس از ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سیکل بارگذاری به‌دست آمده است. مدل رفتاری خاک در تحلیل‌های انجام‌شده، مدل موهر - کولمب است. بررسی روند



شکل ۱۲. تغییرات کرنش حجمی خاکریز تحت سربار سیکی، پس از ۱۰۰ سیکل.

تغییرات کرنش حجمی خاکریز در طول ۱۰۰ سیکل بارگذاری (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که دامنه‌ی کرنش‌ها در محدوده‌ی کوچکی باقی می‌ماند و بعد از ۱۰۰ سیکل بارگذاری افزایش قابل توجهی نمی‌یابد. این مطلب بیان‌گر رفتار کشسان خاک است.

شکل ۱۳، روند تغییرات بیشینه‌ی رانش بیشینه‌ی پشت کوله‌ی پل‌های یکسره را در درصد‌های مختلف تراکم و برای سیکل‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش

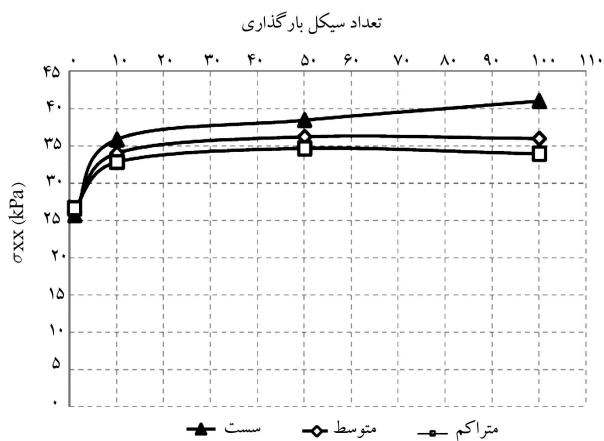
۵. خلاصه و نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل عددی یک دیوار حائل و خاکریز پشت آن با شرایطی مشابه یک مدل آزمایشگاهی بررسی و کالیبره شده است. سپس با توسعه‌ی مدل دیوار حائل، مدل کامل پل یکسره و پل مجزا ساخته شده و تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی انجام شده است. طی یک مطالعه‌ی پارامتریک اثر درصد تراکم در رفتار خاک پشت کوله‌ی پل‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته و این نتایج به‌دست آمده است:

- میزان رانش استاتیکی پشت کوله‌ی پل یکسره که به سربار نزدیک‌تراست، در تمامی عمق‌ها بیشتر از رانش استاتیکی پشت کوله‌ی مشابه در پل مجراست. در این حالت محل اثر نیروی برآیند در کوله‌ی پل یکسره نسبت به کوله‌ی پل مجزا در ارتفاع بالاتری نسبت به کف کوله قرار می‌گیرد.
- میزان رانش سیکلی وارد بر کوله‌ی پل‌های یکسره بر خلاف رانش استاتیکی، کمتر از رانش سیکلی وارد بر کوله‌ی پل‌های مجراست.
- شکل توزیع رانش کل سیکلی وارد بر کوله‌ی پل یکسره و پل مجزا متفاوت است. در پل یکسره، نقطه‌ی برآیند رانش در فاصله‌ی زیادی از پای کوله و در نزدیکی نقطه‌ی اتصال عرشه و کوله اتفاق می‌افتد، اما در پل‌های مجزا بیشینه‌ی رانش در نزدیکی پای کوله اتفاق می‌افتد.
- با افزایش درصد تراکم خاکریز، میزان رانش سیکلی پشت کوله پل مجزا افزایش می‌یابد. این رفتار مشابه رفتار دیوارهای حائل است.
- با افزایش درصد تراکم خاکریز، میزان رانش سیکلی وارد بر کوله‌ی پل یکسره کاهش می‌یابد. این رفتار عکس رفتار مشاهده‌شده در دیوارهای حائل است.
- با افزایش تعداد سیکل‌ها از ۱ تا ۱۰۰، در محدوده‌ی بسامدی مورد بررسی در این پژوهش مشاهده می‌شود که در خاکریز سست، مقدار بیشینه‌ی رانش سیکلی بیشینه‌ی پشت کوله‌ی پل یکسره روند افزایشی دارد، اما در خاکریز متوسط و متراکم تا ۵۰ سیکل روند افزایشی داشته و در فاصله‌ی ۵۰ و ۱۰۰ سیکل، تقریباً ثابت است.

منابع (References)

1. Clayton, C.R.I., Xu, M. and Bloodworth, A. "A laboratory study of the development of earth pressure behind integral bridge abutments", School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton, So17, 1Bj, U.K. (2005).
2. Xu, M., Clayton, C.R.I. and Bloodworth, A.G. "The earth pressure behind full-height frame integral abutments supporting granular fill", School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton, So17, 1Bj, U.K. (2006).
3. Xu, M., Bloodworth, A.G. and Clayton, C.R.I. "Behavior of a stiff clay behind embedded integral abutments", *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering*, **133**(6), pp. 721-730 (2007).
4. Brena, S.F., Bonczar, C.H., Civjan, S.A., Dejong, J.T. and Crovo, D.S. "Evaluation of seasonal and yearly



شکل ۱۳. تغییرات بیشینه‌ی رانش بیشینه‌ی پشت کوله‌ی پل یکسره با افزایش تعداد سیکل‌ها در درصد‌های مختلف تراکم.

تعداد سیکل بار، ماسه‌ی سست نسبت به ماسه‌ی با تراکم متوسط و متراکم، افزایش بیشتری در مقدار بیشینه‌ی رانش نشان داده است. با افزایش تعداد سیکل بار و در اثر لغزش و حرکت ذرات خاک، به تدریج فضاهای خالی خاک پر شده‌اند. این امر دلیل افزایش رانش‌ها با افزایش تعداد سیکل بوده و بدیهی است در ماسه‌ی متوسط و متراکم این روند افزایشی کندتر بوده و در فاصله‌ی ۵۰ تا ۱۰۰ سیکل افزایشی مشاهده نشده است.

لازم به تذکر است که خاکریز مورد بررسی در اینجا بستر لازم برای دال دسترسی پل را فراهم می‌کند. لذا لازم است که رفتار خاک در طول عمر بهره‌برداری در محدوده‌ی کشسان باقی بماند. در غیر این صورت با شکل‌گیری کرنش‌های خمیری و افزایش تجمعی آنها در طول زمان، سطح جاده دچار تغییر شکل‌هایی بزرگ‌تر از حد مجاز خواهد شد. بنابراین، نتایج بررسی تغییر بیشینه‌ی رانش بر حسب تعداد سیکل با استفاده از مدل موهر-کولمب فقط در حوزه‌ی رفتار کشسان خاک معتبر است و بررسی کامل‌تر این موضوع نیاز به استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر خاک دارد.

behavior of an integral abutment bridge", *Journal of Bridge Engineering*, **12**(3), pp. 296-305 (2007).

5. Erhan, S. and Dicleli, M. "Live load distribution equations for integral bridge substructures", *Journal of Engineering Structures*, **31**(5), pp. 1-15 (2009).
6. Kargar, M. "Investigation of at rest earth pressure under dynamic surcharges", Thesis for Master of Science Degree, Civil and Environmental Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology (2005).
7. Mir Mohammad Hosseini, S.M. and Amini, A. "Investigation of at rest earth pressure under cyclic loads", *Journal of Sharif*, **33**, pp. 23-29 (2006).
8. Nikkhah, M. and Mir Mohammad Hosseini, S.M. "A new physical model to study the earth pressure under monotonic and cyclic surcharges", *Journal of Engineering Faculty, Tehran University, Tehran-Iran*, **37**, pp. 47-62 (2005).
9. AASHTO LRFD, Bridge Design Specifications, 3rd Edition, Interim Revision (2005).