



کد مقاله: ۱-۱۰۷

تحلیل استاتیکی پل‌های خاکی فولادی تحت اثر بارهای اجرایی

حسن ساقی^۱، محسن مرتضی زاده^۲

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه حکیم سبزواری، h.saghi@hsu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ساخت، دانشگاه حکیم سبزواری

چکیده

پل‌های خاکی - فولادی با ترکیب صفحات فولادی موج‌دار و خاک، سیستم جدیدی را برای پل‌سازی ارائه کردند. در تحلیلی این نوع پل‌ها عموماً تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در لایه‌های خاک و دیواره‌های سازه تحت اثر بارهای اجرایی و بهره‌برداری مورد توجه قرار می‌گیرد. در این نوشتار، پس از طراحی یک نمونه پل خاکی فولادی مطابق آیین‌نامه‌ی کانادا با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود PLAXIS، بارهای اجرایی بر پل مورد نظر اعمال شده و نتایج باربری با پروفیل پیشنهادی آئین‌نامه‌ی مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد که کنترل تنش و تغییر شکل مذکور با پروفیل پیشنهادی آئین‌نامه‌ی جوابگوی تمامی ضوابط طراحی است، و لیکن دقت در بارگذاری و تحلیل گام به گام، استفاده از مدل‌های رفتاری غیر خطی، و در نظر گرفتن بین پوشش خاکی و جداره می‌تواند منجر به انتخاب پروفیل اقتصادی‌تری در مقایسه با آئین‌نامه‌های طراحی مبتنی بر روش‌های کشسانی شود.

کلمات کلیدی: پلهای خاکی فولادی، تحلیل استاتیکی، روش اجزا محدود، بارگذاری کامیون

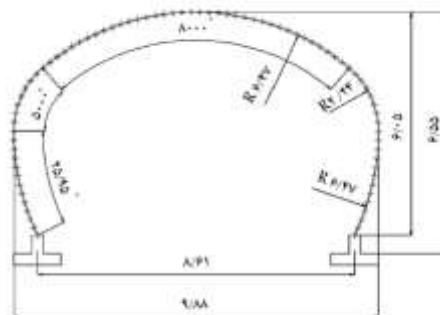
۱- مقدمه

سازه‌های خاکی فولادی، سازه‌هایی هستند که از دو جزء اصلی صفحات فولادی موج‌دار و خاک تشکیل شده‌اند. صفحات فولادی موج‌دار به صورت حلقه به یکدیگر متصل شده‌اند و به منزله‌ی اسکلت سازه عمل می‌کنند. اندرکنش خاک و حلقه‌های فولادی باعث پایداری و توزیع مناسب بارها می‌شود. در سازه‌های خاکی فولادی، جزء خاکی نقش عمده‌ی باربری را دارد و حلقه‌های فولادی باعث توزیع مناسب بارهای وارده به صورت شعاعی می‌شوند. حلقه‌ی فولادی تحت بارگذاری تمایل به تغییر شکل در جهت عرضی دارد، لذا نیروهای جانبی خاک فعال و باعث جلوگیری از تغییر شکل حلقه‌ی فولادی می‌شوند. در نتیجه، مجموعه در برابر بارهای قائم مقاومت می‌کند. از آن‌جا که در یک طول معین صفحات موج‌دار نسبت به صفحات تخت، سطح مقطع و ممان اینرسی بزرگ‌تری دارند؛ لذا تنش فشاری یا کششی کوچک‌تری در آن‌ها ایجاد می‌شود. پروفیل‌های صفحات فولادی موج‌دار مطابق آئین‌نامه‌های *AASHTO*، *CHBDC*، استاندارد شده‌اند و مورد کردن و مشخصات مربوط به مطابق آئین‌نامه‌های *AASHTO*، *ASTM*، *CSA* صورت می‌گیرد. پل‌های خاکی فولادی، به دلیل انعطاف‌پذیر بودن صفحات و قابلیت مورد کردن آن‌ها به شکل‌های مختلف در انواع شکل‌ها و ابعاد کاربرد دارند. سهولت و سرعت بالای اجرای پل‌های خاکی فولادی در شکل‌ها و ابعاد مختلف موجب شده است که احداث این پل‌ها در کشورهای مختلفی همچون، کانادا، برزیل، انگلیس، آفریقای جنوبی، و کره جنوبی متداول و براساس استانداردهای *AREMA*، *ARTC*، *CALTRANS*، *BD*، *CHBDC*، *AISI*، *AASHTO*، *ASTM* تولید، طراحی، و اجرا می‌شود.

در این نوشتار، در ابتدا با روش پیشنهادی آئین‌نامه‌ی CHBDC و با توجه به میزان سربار خاکی اعمالی، تحلیل و طراحی اولیه‌ی پروفایل فولادی انجام شده است. از آنجا که در عمل اجرای چنین سازه‌ای به صورت مرحله به مرحله صورت می‌پذیرد و این مسئله به طور مشخص در آئین‌نامه‌ی مذکور مدنظر قرار گرفته است. لذا در ادامه با به‌کارگیری ابزار عددی اجزاء محدود و نرم‌افزار PLAXIS، مدل‌سازی گام به گام سازه‌ی مذکور منطبق بر شرایط اجرا صورت گرفته است، و تمامی بارهای اجرایی بر آن اعمال شده است. از طرف دیگر با عنایت به توانمندی تحلیل غیر خطی با نرم‌افزار PLAXIS، این مسئله نیز به صورت جنبی مدنظر بوده و نهایتاً نتایج حاصل از تحلیل عددی با روش پیشنهادی آئین‌نامه مقایسه و صحت نتایج ارزیابی شده است.

۲- مشخصات هندسی سازه‌ی مورد مطالعه

سازه‌ی خاکی فولادی مورد نظر متشکل از صفحات فولادی موج‌دار به شکل نعل اسبی است که بر روی پی نصب شده است و امکان عبور راه‌آهن یک خطه از زیر آن نیز وجود دارد. دهانه‌ی آن در پایین ۸/۶۱ متر و بیشینه‌ی دهانه‌ی آن ۹/۸۸ متر است. ارتفاع سازه از پای صفحات تا زیر تاج سازه ۶/۰۵ متر است. ارتفاع دیواره، عرض و ضخامت پی به ترتیب ۱، ۳/۳۲، ۰/۷۵ متر است. کمینه ارتفاع خاک‌ریز لازم برای بهره‌برداری ۱/۵ متر است. است این مشخصات در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- جزئیات هندسی بخش فلزی سازه‌ی خاکی فولادی.

۳- مشخصات مصالح

با توجه به طراحی سازه به روش پیشنهادی CHBDC برای بارگذاری استاندارد راه‌آهن با بار محوری ۲۵ تن، نوع پروفیل $381\text{mm} \times 40\text{mm}$ و ضخامت آن $7/11\text{mm}$ انتخاب شده است. جنس صفحات از نوع فولاد گالوانیزه است. در نرم‌افزار PLAXIS صفحات فولادی موج‌دار با المان تیر تعریف شده است. جهت تعیین مشخصات المان تیر EI ، EA به کمک جداول استاندارد به نرم‌افزار معرفی می‌شود. مشخصات المان‌های صفحات فولادی موج‌دار و پی‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

خاک مورد استفاده جهت پوشش سازه از نوع خاک ماسه‌ای با وزن مخصوص ۲۲ کیلوتن بر متر مکعب است و با توجه به افزایش عمق روباره برای لایه‌های زیرین خاک کوبیده شده، مشخصات کشسانی این مصالح از بالا به پایین بین $1/00 \times 105(\text{kN/m}^2)$ تا $3/00 \times 105(\text{kN/m}^2)$ به صورت افزایشی تعریف شده است. پایین‌ترین لایه به نام «لایه ۱» است که بیشترین مدول کشسانی را دارا است. خاک ترانشه‌ی محل احداث

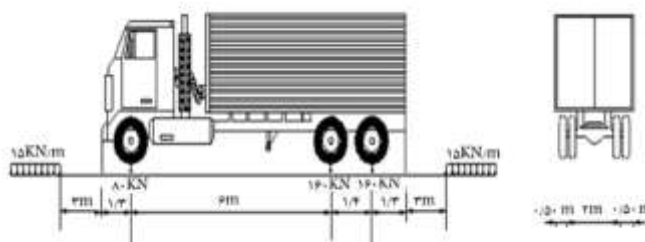
سازه از نوع رسی زهکشی شده و شیب پایدار ترانشه برابر ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. ابعاد هندسی مدل در جهت عرضی از محور تقارن مدل ۲۵ متر و در عمق ۴۰ متر انتخاب شده که مبنای آن حذف تأثیرات ناشی از وجود ترانشه در محل بوده است.

جدول ۱: مشخصات المان‌های معرف صفحات فولادی موج‌دار، دیواره‌ها و پی‌ها

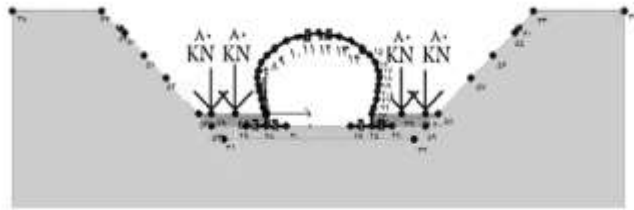
ضریب پواسون	وزن مخصوص (kN/m ³)	EI (kN.m ² /m)	EA (kN/m)	ضخامت (mm)	نوع پروفیل	مدل رفتاری اجزاء	صفحات فولادی موج‌دار
0/3	-	4289/180	1/74×10 ⁶	۷/۱۱	381mm×140mm	کشسان	
وزن مخصوص (kN/m ³)	EI (kN.m ² /m)	EA (kN/m)	ضخامت (mm)	f _c (kN/m ²)	مدل رفتاری اجزاء		
۰/۲۵	۲۵	2/32×10 ⁵	2/80×10 ⁶	۳۵۰۰۰	کشسان		
۰/۲۵	۲۵	3/28×10 ⁵	6/97×10 ⁶	۳۵۰۰۰	کشسان		

۴- بارگذاری و تحلیل

در مرحله خاک‌ریزی و تراکم خاک طرفین سازه، سازه‌ی در حال اجرا برای کامیون ۴۰ تنی استاندارد ایران به عنوان سنگین‌ترین بار اجرایی کنترل شده است (شکل ۲). فرض می‌شود پس از اتمام خاک‌ریزی و تراکم آخرین لایه‌ی کامیون ۴۰ تنی ایران به فاصله‌ی ۱/۸ متر از محل بزرگ‌ترین دهانه‌ی سازه و موازی با آن جهت خاک‌ریزی قرار می‌گیرد. لذا کنترل برای بار محور عقب که برابر ۱۶۰ کیلو نیوتن (هر چرخ ۸۰ کیلو نیوتن) است. صورت می‌گیرد [۴۵] (شکل ۳). پس از خاک‌ریزی تاج سازه، ماشین‌آلات اجرایی می‌توانند در جهت عمود بر محور طولی سازه حرکت کنند، اما کمینگی پوشش لازم سازه در زمان اجرا به‌طوری که عبور و مرور ماشین‌آلات اجرایی به سازه آسیب نرساند، طبق محاسبات و طراحی آیین‌نامه‌ای برای ۴۰ تنی قرار گرفته است، اما کامیون در جهت عمود بر محور طولی سازه و به نحوی که بیشترین اثر را ایجاد کند، حرکت می‌کند.



شکل ۲. نوع اول بارگذاری استاندارد ایران (کامیون ۴۰ کیلو نیوتنی). [۱۷]



شکل ۳. کنترل سازه برای بارهای اجرایی (بار چرخ‌های عقب کامیون استاندارد ایران در دو طرف سازه).

تحلیل سازه خاکی فولادی تحت اثر بارهای اجرایی به روش اجزاء محدود، براساس فرضیات انجام شده توسط استانداردها و آیین‌نامه‌های تحلیل سازه‌های خاکی فولادی صورت گرفته است.^[۶] که به‌طور عمده عبارت‌اند از:

- مدل‌سازی به‌صورت دو بعدی در شرایط کرنش مسطح صورت گرفته است.
- از آنجا که خاک ریخته شده در اطراف سازه دارای تراکم مناسب است؛ رفتار آن کشسان خطی فرض شده است و مدول کشسانی آن با عمق افزایش می‌یابد. صحت فرض کشسانی بودن خاک در زمان تحلیل تأیید شده است.
- شیب ترانشه ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است که پایداری آن در زمان اجرای برنامه نشان داده شده است.
- با تعریف مقاومت المان تماسی برابر با $0/8$ اثر لغزش بین صفحات فولادی موج‌دار و خاک در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

با توجه به آن‌که در عمل روند اجرای سازه‌ی خاکی فولادی، مرحله به مرحله، با افزایش ضخامت خاک‌ریز تا رسیدن به تراز نهایی صورت می‌گیرد، در ادامه روند تحلیل مرحله به مرحله ارائه شده است:

۱- ترانشه‌ی طبیعی که تغییر مکان‌های آن به هنگام اجرای سازه‌ی خاکی فولادی صورت گرفته است، لذا کل تغییر مکان‌های اولیه برابر صفر هستند (مرحله ۱).

۲- خاک‌ریز و تراکم خاک زیر پی (مرحله ۲).

۳- احداث پی و نصب صفحات (مرحله ۳).

۴- خاک‌ریزی و تراکم خاک در دو طرف سازه به‌طور هم‌زمان تا رسیدن به تاج سازه و در نظر گرفتن بار محور عقب کامیون معادل با ۱۶۰ کیلو نیوتن به موازات و به فاصله‌ی $1/8$ متر در دو طرف سازه (مرحله ۴-۷).

۵- خاک‌ریزی و کوبش پوشش خاکی روی تاج و کنترل ضخامت آن برای بار کامیون (مرحله ۸-۱۰).

۶- خاک‌ریزی و کوبش پوشش خاکی سازه جهت تأمین کمینه‌ی پوشش خاکی مورد نیاز برای بهره‌برداری (مرحله ۱۱).

علاوه بر کنترل تغییر شکل، نیروی محوری، نیروی برشی، لنگر خمشی و تنش‌ها برای هریک از مراحل فوق، نکات ذیل نیز بررسی شده است:

۱- پایداری ترانشه قبل از اجرای سازه.

۲- تأثیر لغزش بین صفحات فولادی موج‌دار و خاک در نتایج.

۳- کنترل صحت فرض کشسان بودن پوشش خاکی.

۴- کنترل پایداری سازه در حالی که اختلاف خاک‌ریزی دو طرف سازه ۴۰ سانتی‌متر باشد.

۵- کنترل اثر عدم تقارن بار حین اجرا.

۵- نتایج تحلیل

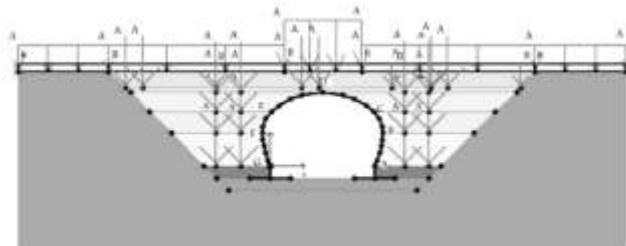
جهت بررسی رفتار جزء فلزی سازه، نیاز به محاسبه و کنترل پارامترهای زیر است. البته با توجه به مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای، لازم است مقایسه بین پارامترهای تغییر شکل و تنش و مقادیر مجاز صورت گیرد. این پارامترها عبارتند از:

- تغییر شکل افقی سازه که مقدار مجاز آن $6/35$ میلی‌متر است.
- تغییر شکل قائم نباید از 2% ارتفاع سازه یعنی $121/20$ mm تجاوز کند.
- نیروی محوری
- نیروی برشی
- لنگر خمشی

تنش فشاری سازه (از رابطه $\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$) نباید در دیواره‌ها و تاج به ترتیب از $216/15$ و $170/59$ مگاپاسکال تجاوز کند. مقادیر مجاز تنش فشاری صفحات با توجه به مشخصات مقطع صفحات فولادی موج‌دار استخراج شده است. نتایج تحلیلی برای نقاط مشخص شده در شکل ۴ در هر مرحله از بارگذاری استخراج شده است. مطابق این شکل، نقاط A, G در محل اتصال صفحات به دیواره‌ی پی‌ها، نقاط B, F در محل بیشینه‌ی دهانه، نقاط C, E در محل اتصال صفحات تاج به صفحات دیواره، و نقطه‌ی D در تاج واقع هستند.

۵-۱- اثر لغزش بین صفحات فولادی موج‌دار و خاک

در حالتی که هیچ‌گونه لغزش بین صفحات و خاک وجود ندارد، ضریب تماسی برابر ۱ و در صورت وجود لغزش برابر با $0/8$ فرض شده است. [۸ و ۹] تغییر شکل نقطه‌ی A تا G پس از خاک‌ریزی لایه اول (مرحله ۴) در هر دو حالت محاسبه شده است. از آنجا که پدیده‌ی لغزش، یک پدیده‌ی غیر خطی است و روند تحلیل حفظ رفتار کشسان را در خاک اطراف سازه نشان می‌دهد؛ لذا در نظر گرفتن این اثر، تأثیری بر نتایج خروجی نشان نداده است.



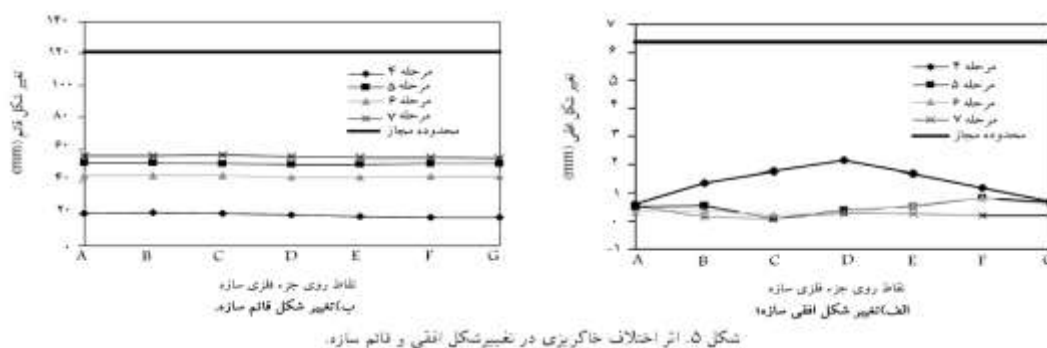
شکل ۴. نقاط مورد نظر جهت کنترل نتایج.

۲-۵- کنترل صحت فرض کشسان بودن پوشش خاکی

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل، نقاط خمیری در پوشش خاکی مشاهده نشد، لذا در هیچ یک از مراحل اجرا و بهره‌برداری، پوشش خاکی به حد خمیری نرسیده است.

۳-۵- اثر اختلاف خاکریز در دو طرف سازه

بر اساس استانداردها و ضوابط اجرای سازه خاکی فولادی، اختلاف خاکریز دو طرف سازه به ۴۰ سانتی‌متر محدود شده است. [۲۵] جهت بررسی اثر اختلاف خاکریز در دو طرف سازه، فرض شده است در هر مرحله از خاکریزی، خاکریز یک طرف سازه ۴۰ سانتی‌متر بیش از طرف مقابل باشد. سپس تغییر شکل افقی و قائم نقاط A تا G در هر مرحله ترسیم و با حدود مجاز مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تغییر شکل‌ها در حد مجازاند.



۴-۵- اثر عدم تقارن بار حین اجرا

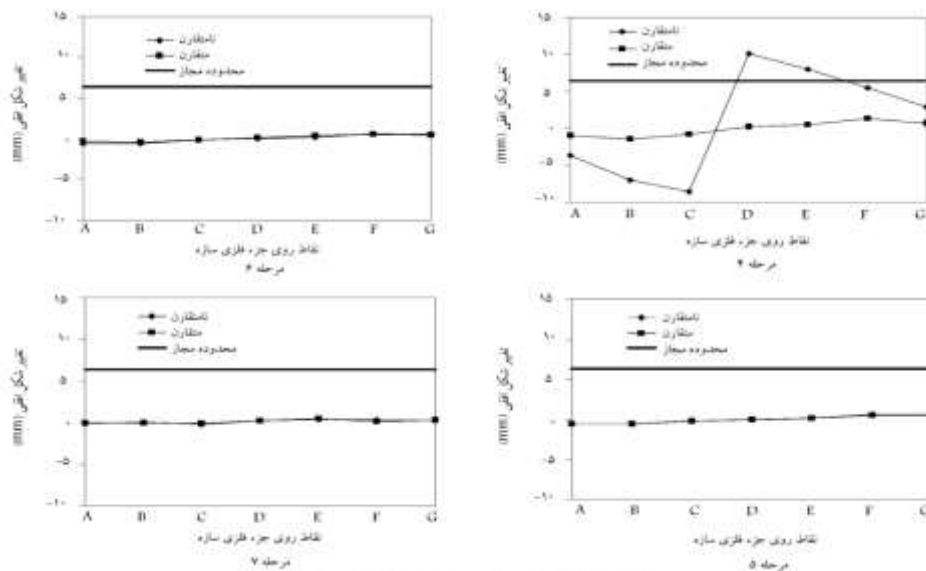
بر اساس ضوابط اجرایی سازه‌های خاکی فولادی، ماشین‌آلات اجرایی در حین اجرا باید به موازات سازه و به فاصله‌ی ۱/۸ متر از محل دهانه‌ی بیشینه‌ی سازه حرکت کنند. جهت کنترل اثر بار ماشین‌آلات اجرایی بر سازه که در این تحلیل با عنوان نمونه‌ی کامیون ۴۰ تنی ایران انتخاب شده است، دو حالت متقارن و نامتقارن در نظر گرفته شده است. در حالت متقارن، در همه‌ی مراحل خاکریزی تا قبل از رسیدن به تاج، دو کامیون هم‌زمان به فاصله‌ی ۱/۸ متر از سازه قرار دارند. در حالت نامتقارن در هر مرحله خاکریزی، بارگذاری دو طرف سازه هم‌زمان انجام نمی‌شود. به عبارت دیگر، در هر مرحله فقط یک طرف سازه تحت اثر بار زنده کامیون واقع می‌شود. اثر بارگذاری نامتقارن در شکل‌های ۶ تا ۱۱ نشان داده شده است.

۴-۵-۱- اثر عدم تقارن بار بر تغییر شکل افقی سازه

نمودارهای شکل ۶ اثر بار نامتقارن را در مراحل مختلف اجرا نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که سازه در مرحله‌ی اول خاکریزی روی پی‌ها (مرحله ۴) نسبت به بار نامتقارن بسیار حساس بوده و ۱۰ برابر بیش از تغییر شکل افقی بارگذاری متقارن است. اما در مراحل بعدی خاکریزی، نمودار تغییر شکل افقی بارگذاری نامتقارن تقریباً بر نمودار بارگذاری متقارن منطبق است. تغییر شکل افقی سازه تحت بارگذاری نامتقارن در مرحله‌ی اول غیر مجاز است. بنابراین رد مراحل اولیه‌ی خاکریزی متقارن وجود نداشته باشد، باید در سمت مقابل از

داربست استفاده کرد و یا با خاکریزی بیشتر، انحراف سازه از شکل اولیه اصلاح شود. این تذکر لازم است که هیچ‌گاه تغییر شکل سازه نباید از حد مجاز تجاوز کند، زیرا ممکن است این امر منجر به ایجاد تغییر شکل دائمی در صفحات شود.

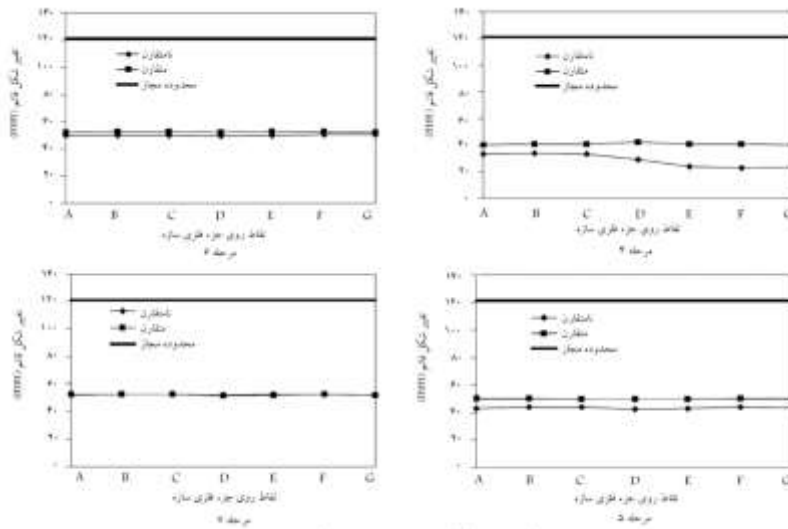
مقایسه نمودارهای بارگذاری نامتقارن در مراحل مختلف و همچنین مقایسه‌ی منحنی‌های بارگذاری متقارن با یکدیگر نشان می‌دهد که با پیشرفت خاکریزی، تغییر شکل افقی سازه کاهش می‌یابد و منحنی تغییر شکل افقی هموارتر می‌شود. منحنی‌ها نشان می‌دهند که در حالت بارگذاری متقارن برای تمامی مراحل و در حالت بارگذاری نامتقارن به استثنای مرحله‌ی اول خاکریزی (مرحله ۴) نقاط B, F (محل بیشینه‌ی دهانه)، تغییر شکل افقی بیشینه است. بنابراین در مرحله‌ی خاکریزی دیواره‌های سازه، کنترل این دو نقطه بیش از سایر نقاط ضروری است.



شکل ۶. اثر بارگذاری نامتقارن در تغییرشکل افقی سازه.

۵-۴-۲- اثر عدم تقارن بار بر تغییر شکل قائم سازه

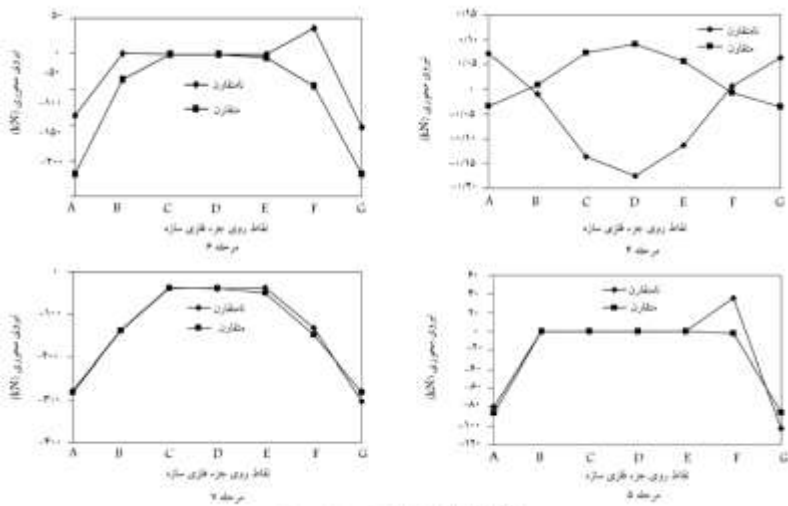
با توجه به شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که اثر بارگذاری نامتقارن بر تغییر شکل قائم سازه کمتر از تغییر شکل افقی است و مقادیر تغییر شکل در حد مجاز باقی می‌مانند. تغییر شکل قائم ناشی از بارگذاری نامتقارن کمتر از بارگذاری متقارن است و با پیشرفت خاکریزی، اختلاف منحنی تغییر شکل قائم در حالت بارگذاری متقارن و نامتقارن کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه‌ی منحنی‌ها بیانگر آن است که تغییر شکل قائم در تمام نقاط سازه، در هر مرحله با هم برابرند.



شکل ۷. اثر بارگذاری نامتقارن بر تغییرات شکل قائم سازه.

۵-۴-۳- اثر عدم تقارن بار بر نیروی محوری

مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۸ نشان می‌دهد که با پیشرفت خاک‌ریزی، نیروی محوری در سازه افزایش می‌یابد. نیروی محوری در تمامی مراحل به استثنای مرحله ۴، برای نقاط A, G (نقاط اتصال صفحات به پی) بیش از سایر نقاط است. در مرحله‌ی اول خاک‌ریزی (مرحله ۴) قدر مطلق نیروی محوری ناشی از بار نامتقارن دو برابر بارگذاری متقارن است، اما با پیشرفت خاک‌ریزی این اختلاف کاهش می‌یابد. و در مرحله‌ی آخر خاک‌ریزی پشت دیوارها (مرحله ۷) این اختلاف حدوداً به صفر می‌رسد.

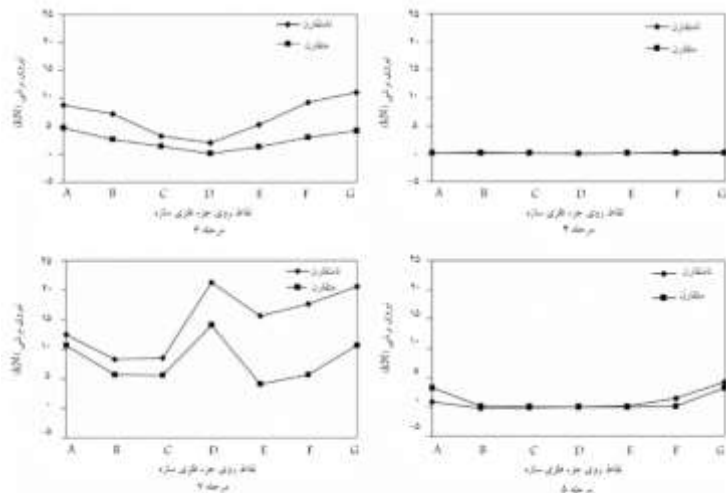


شکل ۸. اثر بارگذاری نامتقارن بر نیروی محوری.

۵-۴-۴- اثر عدم تقارن بار بر نیروی برشی

مقایسه نمودارهای شکل ۹ نشان می‌دهد که با پیشرفت خاک‌ریزی، نیروی برشی در سازه افزایش می‌یابد. نیروی برشی در نقاط تکیه‌گاهی G, A بیش از سایر نقاط است. نیروی برشی نقطه G (مرکز دهانه) تا زمانی که پوشش خاکی به صفحات تاج نرسیده است؛ اما هنگامی که خاک‌ریزی

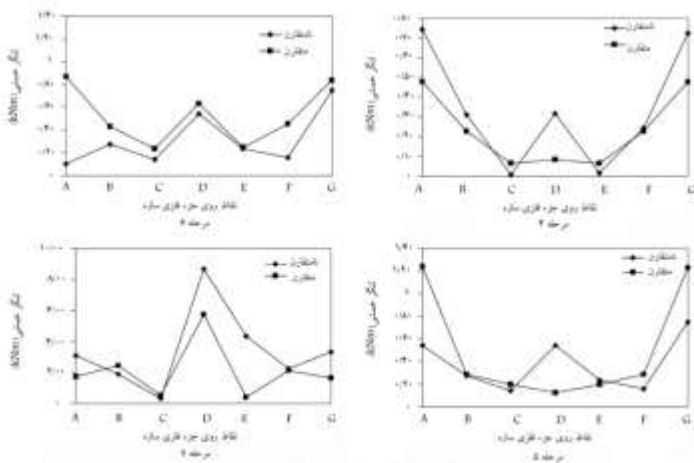
کنار صفحات تاج انجام می‌شود (مرحله ۷)، نیروی برشی در نقطه D به ۱۳/۹۸ کیلو نیوتن می‌رسد. مقایسه‌ی نیروی برشی خاک‌ریزی روی پی‌ها (مرحله ۴) در حالت بارگذاری متقارن و نامتقارن نشان می‌دهد که قدر مطلق نیروی برشی نقاط تکیه‌گاهی A, G در بارگذاری نامتقارن تقریباً دو برابر حالت متقارن است.



شکل ۹. اثر بارگذاری نامتقارن بر نیروی برشی.

۵-۴-۵- اثر عدم تقارن بار بر لنگر خمشی

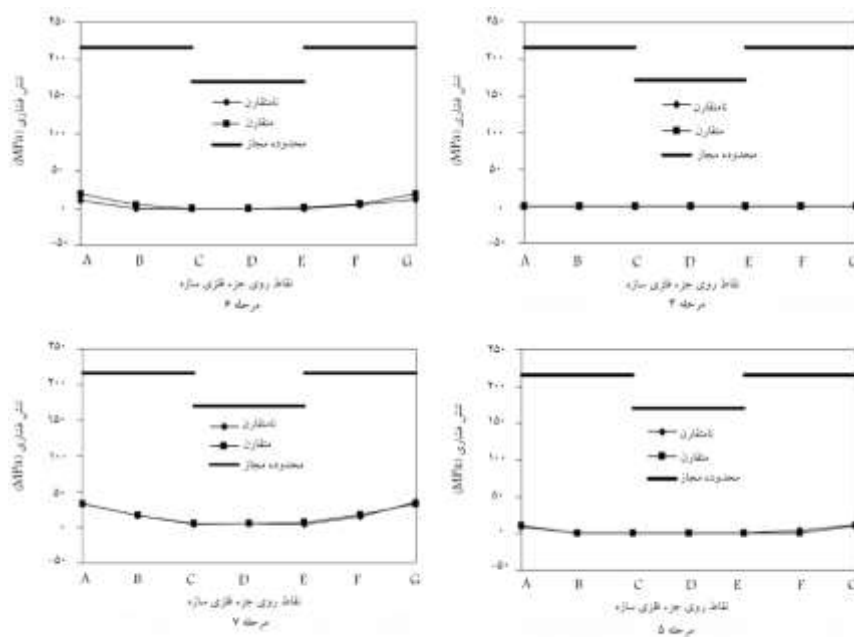
مقایسه نمودارهای شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با پیشرفت مراحل خاک‌ریزی، لنگر خمشی افزایش می‌یابد. خاک‌ریزی کنار صفحات تاج باعث ۹ برابر شده، لنگر خمشی تاج، ۸ برابر شدن لنگر خمشی نقاط تکیه‌گاهی و ۶ برابر شدن لنگر خمشی نقاط بیشینه‌ی دهانه نسبت به مرحله‌ی قبل می‌شود. عدم تقارن بار باعث ۴ برابر شدن لنگر خمشی تاج در مراحل اول و دوم خاک‌ریزی (مرحله ۴ و ۵) و ۱/۵ برابر شدن لنگر خمشی در مرحله خاک‌ریزی کنار صفحات تاج می‌شود.



شکل ۱۰. اثر بارگذاری نامتقارن بر لنگر خمشی.

۵-۶- اثر عدم تقارن بار بر تنش فشاری سازه

تنش فشاری مجاز سازه از روابط آیین‌نامه‌ای برای دیواره‌ها و تاج جداگانه محاسبه می‌شود. تنش فشاری مجاز تاج (نقاط C, D, E) دارای محدودیت بیشتری است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تنش فشاری دیواره‌ها و تاج در تمامی مراحل خاک‌ریزی در حد مجاز است. با پیشرفت خاک‌ریزی، تنش فشاری در کلیه نقاط افزایش می‌یابد. این اثر در نقاط تکیه‌گاهی بیشتر است. تنش فشاری در حالت بارگذاری متقارن و نامتقارن تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی تنش فشاری سازه تحت بار متقارن و نامتقارن.

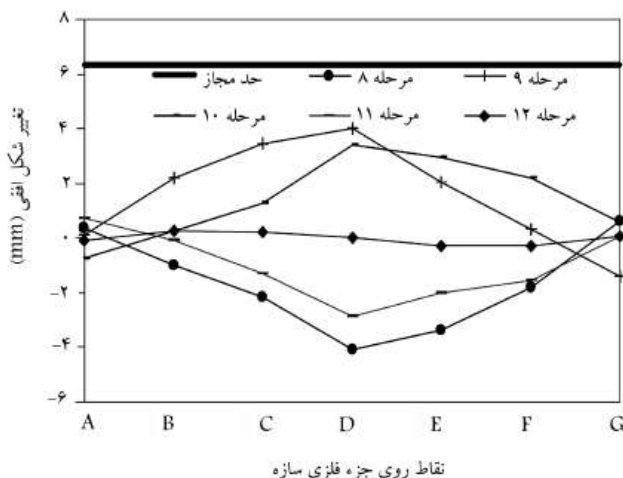
۵-۵- اثر اجرای پوشش خاکی تاج

منظور از اجرای پوشش خاکی تاج، اجرای کمینده‌ی پوشش خاکی لازم جهت عبور و مرور ماشین‌آلات اجرایی از روی تاج سازه است، که با توجه به توصیه‌های آیین‌نامه‌ی CHBDC برابر ۴۰ سانتی‌متر به‌دست آمده است. جهت تحلیل استاتیکی سازه تحت اثر حرکت ماشین‌آلات اجرایی، کامیون ۴۰ تنی ایران در سه نقطه‌ی مختلف حرکت داده شده است (مراحل ۸ تا ۱۰). مراحل بعدی شامل هم سطح کردن پوشش خاکی سازه تا بستر راه یا راه‌آهن است.

۵-۵-۱- اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر تغییر شکل افقی سازه

تغییر شکل افقی سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر؛ منحنی‌های مراحل ۸ تا ۱۰ در شکل ۱۲، حرکت کامیون ۴۰ تنی را بر روی سازه نشان می‌دهند. در مرحله ۸، محور عقب کامیون ۴۰ تنی در سمت چپ سازه و در محل فصل مشترک دیواره‌ی ترانشه و پوشش خاکی قرار دارد. در این حالت تغییر شکل افقی مرکز سازه بیش از سایر نقاط است. همچنین تغییر شکل افقی سمت چپ سازه شامل نقاط E, F, G نسبت به طرف راست سازه حدود ۸۰٪ بیشتر است. در مرحله ۹، برآیند بار کامیون ۴۰ تنی در مرکز دهانه واقع است. لذا مرکز دهانه بیشترین تغییر شکل

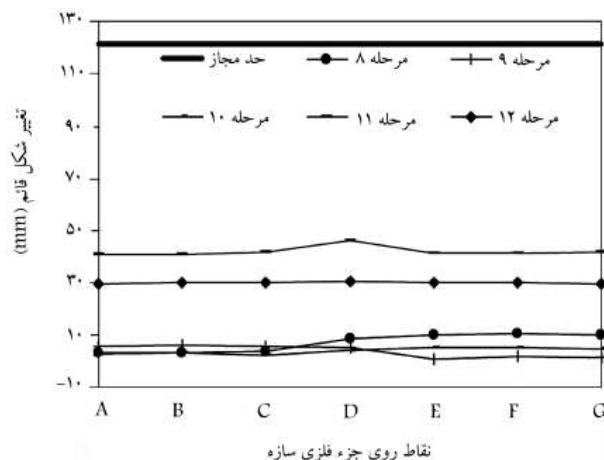
افقی را داراست. در مرحله ۱۰ محوری جلوی کامیون در فصل مشترک دیواره‌ی راست ترانشه و پوشش خاکی واقع است. به‌طور کلی مقایسه‌ی منحنی‌های مراحل ۸ تا ۱۰ نشان می‌دهد که قدر مطلق تغییر شکل افقی این سه مرحله نسبت به حرکت کامیون حساس نیست. اثر اجرای پوشش خاکی نهایی سازه بر تغییر شکل افقی سازه، منظور از پوشش خاکی نهایی، اجرای خاک‌ریزی جهت تأمین کمینگی ارتفاع پوشش خاکی مورد نیاز جهت عبور قطار است (مرحله ۱۱). تکمیل پوشش خاکی باعث کاهش ۳۰ درصدی تغییر شکل افقی سازه می‌شود.



شکل ۱۲. اثر اجرای پوشش خاکی تاج در تغییر شکل افقی.

۵-۵-۲- اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر تغییر شکل قائم سازه

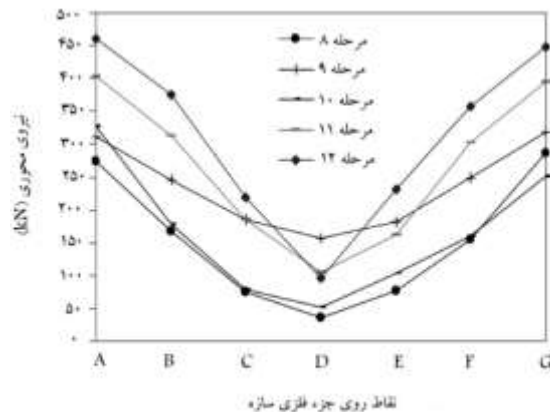
تغییر شکل قائم سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر: قدر مطلق تغییر شکل قائم مرحله ۸ و مرحله ۱۰ با یکدیگر برابرند. تغییر شکل قائم سازه در مرحله ۹ کمتر از ۰/۱ تغییر شکل قائم مرحله ۸ و مرحله ۱۰ است. اثر اجرای پوشش خاکی نهایی سازه بر تغییر شکل قائم سازه: تغییر شکل بیشینه‌ی قائم سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی نهایی در نقاط E, F برابر ۴۸/۶۱ میلی‌متر است که با توجه به تغییر شکل مجاز سازه برابر ۱۲۱/۲۰mm، در کلیه‌ی مراحل فوق در حد مجاز قرار دارد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. اثر اجرای پوشش خاکی تاج در تغییر شکل قائم.

۵-۵-۳- اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر نیروی محوری

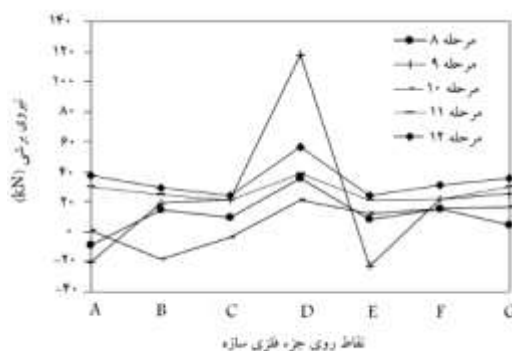
نیروی محوری سازه تحت اثر اجرای خاکی ۴۰ سانتی‌متر: نیروی محوری در مراحل ۸ و ۱۰ به یکدیگر نزدیک‌اند و فقط ۱۶ کیلو نیوتن تفاوت دارند. نیروی محوری در نقاط تکیه‌گاهی بیش از سایر نقاط سازه و برابر ۳۲۷ کیلو نیوتن است. نیروی محوری مرحله ۹ در تاج سازه ۱/۵ برابر مرحله ۸ و مرحله ۱۰ و در نقاط تکیه‌گاهی با مراحل ماقبل و بعد برابر است. اثر اجرایی پوشش خاکی نهایی سازه بر نیروی محوری سازه: نیروی محوری این مرحله در مرکز تاج ۳۳٪ کمتر از مرحله ۹ و در تکیه‌گاه‌ها ۲۴٪ بیشتر است (شکل ۱۴).



شکل ۱۴. اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر نیروی محوری.

۵-۵-۴- اثر اجرایی پوشش خاکی تاج و احداث خط آهن بر نیروی برشی

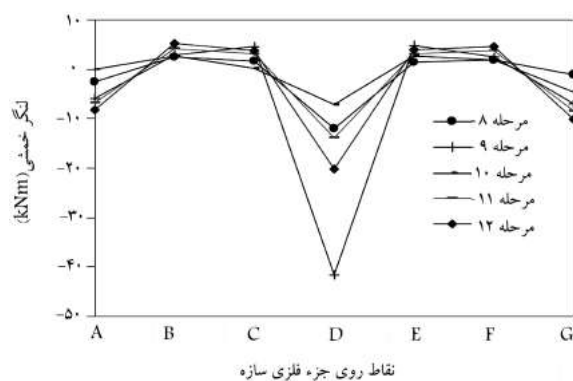
نیروی برشی سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر: نیروی برشی مراحل ۸ تا ۱۰ در تکیه‌گاه‌ها بین ۰/۴ تا ۲۳ کیلو نیوتن تغییر می‌کند. بیشینه نیروی برشی ناشی از اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متری برابر ۱۱۷/۵۱ کیلو نیوتن است و هنگامی روی می‌دهد که کامیون ۴۰ تنی در جهت عمود بر محور سازه و برآیند بار کامیون به فاصله ۰/۳۲ m از محور پل قرار دارد (مرحله ۹). نیروی برشی تاج سازه در این مرحله بیش از ۳ برابر نیروی برشی نسبت به حالتی است که کامیون بر روی خاکریز واقع است (مرحله ۸ و ۱۰ در شکل ۱۵). اثر اجرای پوشش خاکی نهایی سازه بر نیروی برشی سازه: نیروی برشی در این مرحله در تاج سازه بیشینه و برابر با ۴۰ کیلو نیوتن است. نیروی برشی در تکیه‌گاه با تکمیل پوشش خاکی ۷ برابر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵. اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر نیروی برشی.

۵-۵-۵- اثر اجرای پوشش خاکی تاج و احداث خط آهن بر لنگر خمشی

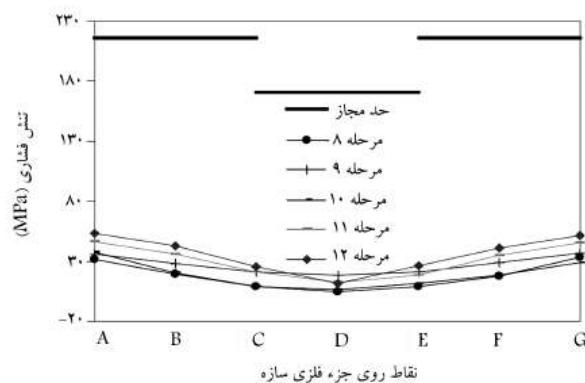
لنگر خمشی سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر: به دلیل آن که پوشش خاکی مرحله ۹ کمتر از پوشش خاکی مرحله ۱۱ و ۱۲ است و در عین حال کامیون ۴۰ تنی در مرکز دهانه واقع است، لنگر خمشی آن بیش از حالتی است که پوشش خاکی تکمیل و خط آهن اجرا شده باشد. بنابراین پوشش خاکی سهم عمده‌ای در کاهش لنگر خمشی سازه را برعهده دارد. اثر اجرای پوشش خاکی نهایی سازه بر لنگر خمشی سازه: تکمیل پوشش خاکی باعث کاهش ۶۶ درصدی لنگر خمشی تاج سازه می‌شود (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر لنگر خمشی.

۵-۵-۶- اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر تنش فشاری

تنش فشاری سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر: منحنی تنش فشاری سازه در حالتی که کامیون ۴۰ تنی روی پوشش خاکی واقع است (مرحله ۸ و ۱۰) تقریباً بر هم منطبق هستند. هنگامی که کامیون در مرکز دهانه واقع است، تنش فشاری در نقاط تکیه‌گاهی ۲۴٪ افزایش دارد و در مرکز دهانه ۳ برابر می‌شود. اثر اجرای پوشش خاکی نهایی سازه بر تنش فشاری سازه: تکمیل پوشش خاکی باعث افزایش ۲۴ درصدی تنش در کلیه‌ی نقاط سازه می‌شود. تنش فشاری در هیچ‌یک از مراحل فوق از تنش فشاری مجاز تجاوز نمی‌کند. تنش فشاری مجاز سازه با استفاده از روابط آیین‌نامه‌ای برای دیواره‌ها و تاج جداگانه محاسبه می‌شود، لذا به شکل نمودار پله‌ای است (شکل ۱۷).



شکل ۱۷. اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر تنش فشاری.

۶- نتیجه گیری

هدف از ارائه این نوشتار، تشریح نحوه‌ی تحلیل استاتیکی سازه‌های خاکی فولادی تحت اثر بارهای اجرایی بوده است. در این نوشتار رفتار یک نمونه‌ی سازه‌ی خاکی فولادی که براساس استاندارد کانادا CHBDC طراحی شده است، تحت اثر بارهای اجرایی کامیون ۴۰ تنی بررسی شده است و نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که ضوابط طراحی استاندارد CHBDC برای بار کامیون ۴۰ تنی به منزله‌ی سنگین‌ترین بار اجرایی پاسخگو است و تغییر شکل افقی، تغییر شکل قائم، و تنش فشاری در حدود مجاز قرار دارد. به‌طور کلی از مقایسه‌ی نمودارها می‌توان این نتایج را استنباط کرد:

- پس از بررسی اثر در نظرگیری لغزش بین صفحات فولادی موج‌دار و خاک، نتایج نشان دادند که در حوزه‌ی مورد مطالعه در نظر گرفتن لغزش در محل تماس صفحات و خاک تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد و در تحلیل‌های بعدی می‌توان از این ساده‌سازی استفاده کرد.
- بررسی اثر اختلاف خاک‌ریز در دو طرف سازه نشان داد، در صورتی که اختلاف ارتفاع از ۴۰ سانتی متر تجاوز نکند، تغییر شکل‌ها در حد مجاز آیین نامه بی باقی می‌مانند.
- بررسی اثر عدم تقارن بار اجرایی بر روی سازه نشان داد که تغییر شکل افقی نیروی محوری، و نیروی برشی به‌ویژه در مراحل اولیه‌ی خاک‌ریزی بعضاً به دو برابر افزایش می‌یابند و باید از اجرای نامتقارن سازه اجتناب کرد.
- بررسی اثر اجرای پوشش خاکی نشان داد که با تکمیل مراحل خاک‌ریزی، تغییر شکل‌ها افقی و قائم سازه کاهش می‌یابند.

مراجع

- [1] Abdel-Sayed, G. and Bakht, B., Soil-Steel Bridges, Design and Construction, Chapter 4, McGraw-Hill Pub. Co., New York (1993).
- [2] Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products, 2nd Ed., Corrugated steel Pipe Institute & American Iron and Steel Institute (2002).
- [3] AASHTO Highway Bridges, 2nd Ed., American Association of states Highway and Transportation Officials (2000).
- [4] Commentary on CAN/CSA-S6-00, Canadian Highway Bridge Design Code, S6.1-00, Canadian Standards Association, Ontario, Canada (2001).
- [5] Canadian Highway Bridge Design Code, CAN/CSAS6-00, National Standard of Canada, CSA International (2001).

- [6] Abdulrazagh, P.H. \Static analysis of soil-steel structures under train displacement", Research project, Iran University of Science and Technology, Tehran (2007).
- [7] Bridge loading Standard, Code 139, Planning and Budget Organization, Tehran, Iran (1995).
- [8] Lee, J. \The performance of soil-steel bridges with shallow soil cover under vehicle load", Proc., 3rd Int. Conf of Bridges, Seoul, Korea (2006).