

# تحلیل استاتیکی پل های خاکی فولادی تحت اثر بارهای اجرایی

مرتضی اسماعیلی\* (استادیار)

جبارعلی ذاکری (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

پریسا حاجی عبدالرزاق (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف  
دوره‌ی ۲-۱۳۹۰، شماره‌ی ۲، ص. ۱۱۷-۱۲۶، (پادداشت فنی)

پل های خاکی - فولادی با ترکیب صفحات فولادی موج دار و خاک، سیستم جدیدی را برای پل سازی ارائه کرده اند. در تحلیل این نوع پل ها عموماً تنش ها و تغییر شکل های ایجاد شده در لایه های خاک و دیواره ی سازه تحت اثر بارهای اجرایی و بهره برداری مورد توجه قرار می گیرد. در این نوشتار، پس از طراحی یک نمونه پل خاکی فولادی مطابق آئین نامه ی کانادا با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS، بارهای اجرایی بر پل مورد نظر اعمال شده و نتایج باربری با پروفیل پیشنهادی آئین نامه یی مقایسه شده اند. این مقایسه نشان می دهد که کنترل تنش و تغییر شکل مذکور با پروفیل پیشنهادی آئین نامه یی جوابگوی تمامی ضوابط طراحی است، ولیکن دقت در بارگذاری و تحلیل گام به گام، استفاده از مدل های رفتاری غیرخطی، و در نظر گرفتن لغزش بین پوشش خاکی و جداره می تواند منجر به انتخاب پروفیل اقتصادی تری در مقایسه با آئین نامه های طراحی مبتنی بر روش های کسسان شود.

واژگان کلیدی: پل های خاکی فولادی، تحلیل استاتیکی، روش اجزاء محدود، بارگذاری کامیون.

m.esmaeili@iust.ac.ir  
zakeri@iust.ac.ir  
p.abdulrazagh@ut.ac.ir

## ۱. مقدمه

پل ها در کشورهای مختلفی همچون: کانادا، برزیل، انگلیس، آفریقای جنوبی، و کره ی جنوبی متداول و براساس استانداردهای ASTM، AASHTO، AISI، CHBDC، BD، CALTRANS، ARTC، AREMA و تولید، طراحی، و اجرا شود. در این نوشتار، در ابتدا با روش پیشنهادی آئین نامه ی CHBDC<sup>[۱]</sup> و با توجه به میزان سربار خاکی اعمالی، تحلیل و طراحی اولیه ی پروفیل فولادی انجام شده است. از آنجا که در عمل اجرای چنین سازه یی به صورت مرحله به مرحله صورت می پذیرد و این مسئله به طور مشخص در آئین نامه ی مذکور مدنظر قرار گرفته است، لذا در ادامه با به کارگیری ابزار عددی اجزاء محدود و نرم افزار PLAXIS، مدل سازی گام به گام سازه ی 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 غیرخطی با نرم افزار PLAXIS، این مسئله نیز به صورت جنبی مدنظر بوده و نهایتاً نتایج حاصل از تحلیل عددی با روش پیشنهادی آئین نامه مقایسه و صحت نتایج ارزیابی شده است.

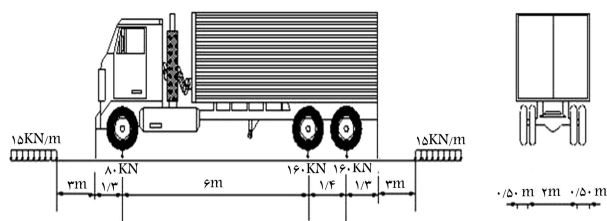
## ۲. مشخصات هندسی سازه ی مورد مطالعه

سازه ی خاکی فولادی مورد نظر متشکل از صفحات فولادی موجدار به شکل نعل اسبی است که بر روی پی نصب شده است و امکان عبور راه آهن یک خطه از زیر

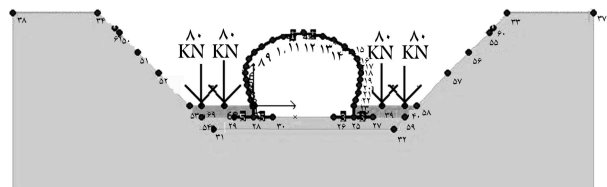
سازه های خاکی فولادی، سازه هایی هستند که از دو جزء اصلی صفحات فولادی موجدار و خاک تشکیل شده اند. صفحات فولادی موجدار به صورت حلقه به یکدیگر متصل شده اند و به منزه ای اسکلت سازه عمل می کنند. اندرکنش خاک و حلقه های فولادی باعث پایداری و توزیع مناسب بارها می شود. در سازه های خاکی فولادی، جزء خاکی نقش عمده ی باربری را دارد و حلقه های فولادی باعث توزیع مناسب بارهای وارده به صورت شعاعی می شوند. حلقه ی فولادی تحت بارگذاری تمایل به تغییر شکل در جهت عرضی دارد، لذا نیروهای جانبی خاک فعال و باعث جلوگیری از تغییر شکل حلقه ی فولادی می شوند. در نتیجه، مجموعه در برابر بارهای قائم مقاومت می کند.<sup>[۲]</sup> از آنجا که در یک طول معین صفحات موجدار نسبت به صفحات تخت، سطح مقطع و ممان اینرسی بزرگ تری دارند؛ لذا تنش فشاری یا کششی کوچک تری در آن ها ایجاد می شود.<sup>[۳]</sup> پروفیل های صفحات فولادی موجدار مطابق آئین نامه های AASHTO و CHBDC استاندارد شده اند و نورد کردن و مشخصات مربوط مطابق آئین نامه های ASTM، AASHTO، و CSA صورت می گیرد. پل های خاکی فولادی، به دلیل انعطاف پذیر بودن صفحات و قابلیت نورد کردن آن ها به شکل های مختلف در انواع شکل ها و ابعاد کاربرد دارند. سهولت و سرعت بالای اجرای پل های خاکی فولادی در شکل ها و ابعاد مختلف موجب شده است که احداث این

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۰/۸/۲۵، پذیرش ۱۳۹۰/۹/۲۶.



شکل ۲. نوع اول بارگذاری استاندارد ایران (کامیون ۴۰۰ کیلو نیوتنی). [۷]



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

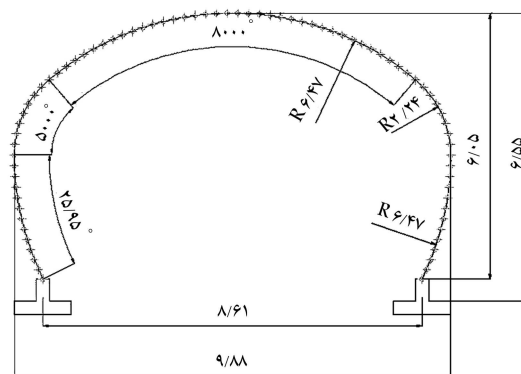
#### ۴. بارگذاری

در مرحله‌ی 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. [۵] لذا کنترل برای بار محور عقب که برابر با ۱۶۰ کیلو نیوتن (هر چرخ ۸۰ کیلو نیوتن) است، صورت می‌گیرد (شکل ۳). پس از خاکریزی تاج سازه، ماشین‌آلات اجرایی می‌توانند در جهت عمود بر محور طولی سازه حرکت کنند، اما کمینه‌ی پوشش لازم سازه در زمان اجرا به طوری که عبور و مرور ماشین‌آلات اجرایی به سازه آسیب نرساند، طبق محاسبات و طراحی آیین‌نامه‌ی برابر ۴۰ سانتی متر است. بنابراین در این مرحله‌ی اجرایی، سازه تحت بار کامیون 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.

#### ۵. فرضیات تحلیل

تحلیل سازه‌ی 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 به طور عمده عبارتند از:

۱. مدل‌سازی به صورت دو بعدی در شرایط کرنش مسطح صورت گرفته است.



شکل ۱. جزئیات هندسی بخش فازی سازه‌ی خاکی فولادی.

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 ۱٫۳۲، ۰٫۷۵ متر است. کمینه‌ی ارتفاع خاکریز لازم برای بهره‌برداری ۱٫۵ متر است. این مشخصات در شکل ۱ نشان داده شده است.

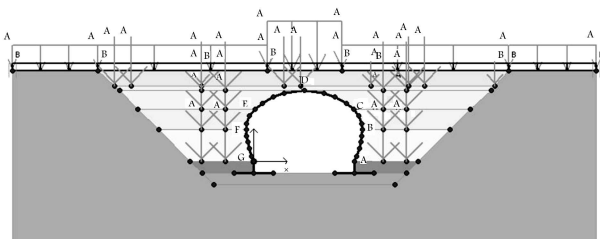
#### ۳. مشخصات مصالح

با توجه به طراحی سازه به روش پیشنهادی CHBDC برای بارگذاری استاندارد راه‌آهن با بار محوری ۲۵ تن، نوع پروفیل ۳۸۱ mm × ۱۴۰ mm × ۴۰ mm و ضخامت آن ۷٫۱۱ 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، EA و EI 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 ماسه‌یی با وزن مخصوص ۲۲ کیلو نیوتن بر مترمکعب است. با توجه به افزایش عمق روباره برای لایه‌های زیرین خاک کوبیده شده، مشخصات کشسانی این مصالح از بالا به پایین بین  $(\text{kN/m}^2) \times 10^5$  تا  $(\text{kN/m}^2) \times 10^5$  به صورت افزایشی تعریف شده است. پایین‌ترین لایه به نام «لایه ۱» است که بیشترین مدول کشسانی را داراست. 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	وزن مخصوص ( $\text{kN/m}^3$ )	EI ( $\text{kN.m}^2/\text{m}$ )	EA ( $\text{kN/m}$ )	ضخامت (mm)	نوع پروفیل	مدل رفتاری اجزاء	صفحات فولادی
۰٫۳	-	۴۲۸۹٫۱۸۰	$۱٫۷۴ \times ۱۰^۶$	۷٫۱۱	۳۸۱ mm × ۱۴۰ mm	کشسان	موجدار
ضریب	وزن مخصوص ( $\text{kN/m}^3$ )	EI ( $\text{kN.m}^2/\text{m}$ )	EA ( $\text{kN/m}$ )	$f_c$ ( $\text{kN/m}^2$ )		مدل رفتاری اجزاء	
۰٫۲۵	۲۵	$۲٫۳۲ \times ۱۰^۵$	$۲٫۸۰ \times ۱۰^۶$	۳۵۰۰۰		کشسان	دیواره‌ی پی
۰٫۲۵	۲۵	$۳٫۲۸ \times ۱۰^۵$	$۶٫۹۷ \times ۱۰^۶$	۳۵۰۰۰		کشسان	پی



شکل ۴. نقاط مورد نظر جهت کنترل نتایج.

سازه (از رابطه  $\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$ ) نباید در دیواره‌ها و تاج به ترتیب از ۲۱۶/۱۵ و ۱۷۰/۵۹ مگاپاسکال تجاوز کند. مقادیر مجاز تنش فشاری صفحات با توجه مشخصات مقطع صفحات فولادی موجدار استخراج شده است.

نتایج تحلیل برای نقاط مشخص شده در شکل ۴ در هر مرحله از بارگذاری استخراج شده است. مطابق این شکل، نقاط A و G در محل اتصال صفحات به دیواره‌ی پی‌ها، نقاط B و F در محل پیشینه‌ی دهانه، نقاط C و E در محل اتصال صفحات تاج به صفحات دیواره، و نقطه‌ی D در تاج واقع هستند.

### ۱.۷. 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 ۰/۸ فرض شده است. [۹۳] تغییر شکل نقطه‌ی A تا G پس از خاکریزی لایه‌ی اول (مرحله‌ی ۴) در هر دو حالت محاسبه شده است. از آنجا که پدیده‌ی لغزش، یک پدیده‌ی غیرخطی 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.

### ۲.۷. کنترل صحت فرض کشسان بودن پوشش خاکی

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

### ۳.۷. اثر اختلاف خاکریز در دو طرف سازه

براساس استانداردها و ضوابط اجرای سازه‌های خاکی فولادی، اختلاف خاکریز دو طرف سازه به ۴۰ سانتی‌متر محدود شده است. [۵۲] 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 مجازند.

### ۴.۷. اثر عدم تقارن بار در حین اجرا

براساس ضوابط اجرایی سازه‌های خاکی فولادی، ماشین‌آلات اجرایی در حین اجرا باید به موازات سازه و به فاصله‌ی ۱/۸ متر از محل دهانه‌ی پیشینه‌ی 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 مرحله‌ی خاکریزی، بارگذاری دو طرف سازه هم‌زمان انجام نمی‌شود. به عبارت

۲. از آنجا که خاک ریخته‌شده در اطراف سازه دارای تراکم مناسب است؛ رفتار آن کشسان خطی فرض شده است و مدول کشسانی آن با عمق افزایش می‌یابد. صحت فرض کشسان بودن خاک در زمان تحلیل تأیید شده است.

۳. شیب ترانشه ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است که پایداری آن در زمان اجرای برنامه نشان داده شده است.

۴. با تعریف مقاومت المان تماسی برابر با ۰/۸، اثر لغزش بین صفحات فولادی موجدار و خاک در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

## ۶. گام‌های تحلیل

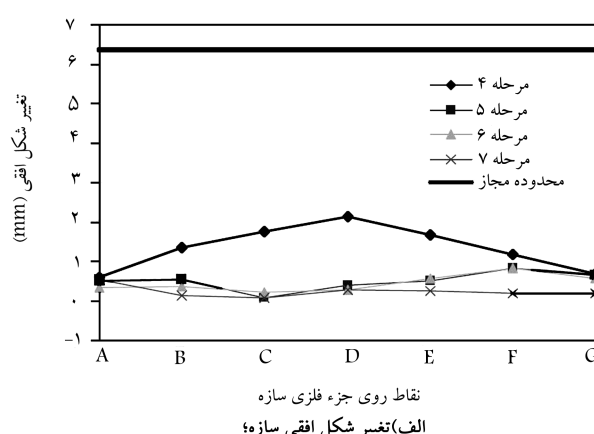
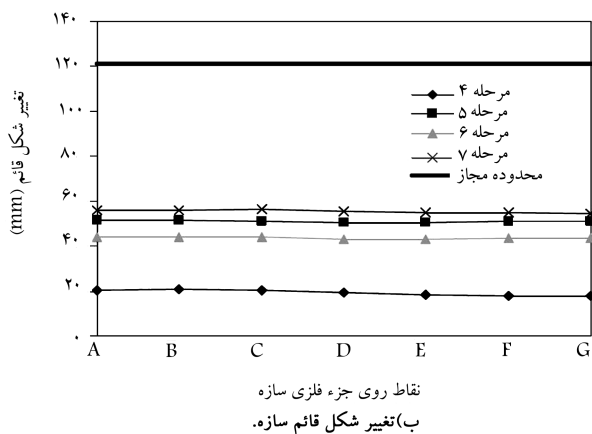
با توجه به آنکه در عمل روند اجرای سازه‌ی خاکی فولادی، مرحله به مرحله، با افزایش ضخامت خاکریز تا رسیدن به تراز نهایی صورت می‌گیرد، در ادامه روند تحلیل مرحله به مرحله ارائه شده است:

۱. ترانشه‌ی طبیعی که تغییر مکان‌های آن به هنگام اجرای سازه‌ی خاکی فولادی صورت گرفته است، لذا کل تغییر مکان‌های اولیه برابر صفر هستند (مرحله‌ی ۱).
  ۲. خاکریزی و تراکم خاک زیر پی (مرحله‌ی ۲).
  ۳. احداث پی و نصب صفحات (مرحله‌ی 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 ۱/۸ متر در دو طرف سازه (مرحله‌ی ۴-۷).
  ۵. خاکریزی و کوبش پوشش خاکی روی تاج و کنترل ضخامت آن برای بار کامیون (مرحله‌ی ۸-۱۰).
  ۶. خاکریزی و کوبش پوشش خاکی سازه جهت تأمین کمینگی پوشش خاکی مورد نیاز برای بهره‌برداری (مرحله‌ی ۱۱).
- علاوه بر کنترل تغییر شکل، نیروی محوری، نیروی برشی، لنگر خمشی و تنش‌ها برای هر یک 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 حالتی که اختلاف خاکریزی دو طرف سازه ۴۰ سانتی‌متر باشد،
  ۵. کنترل اثر عدم تقارن بار حین اجرا.

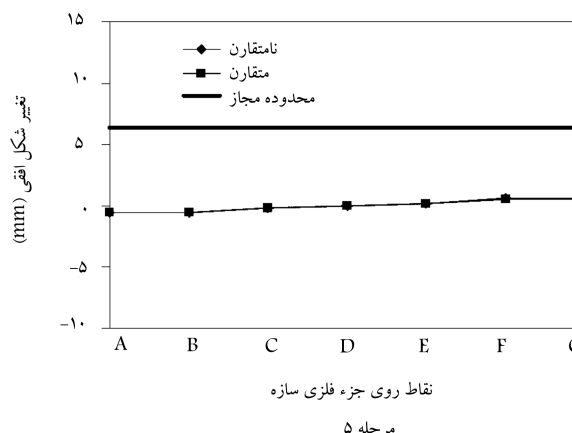
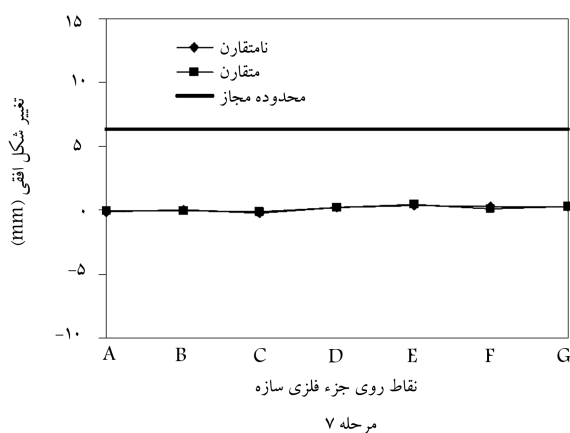
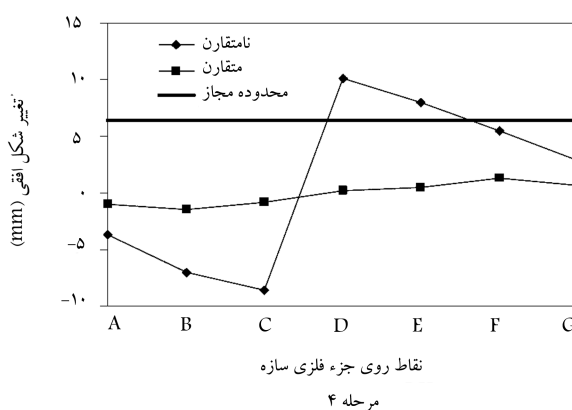
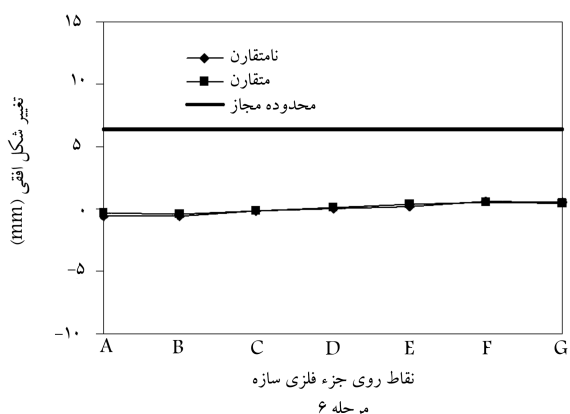
## ۷. نتایج حاصل از تحلیل

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

این پارامترها عبارت‌اند از: ۱. تغییر شکل افقی سازه که مقدار مجاز آن ۶/۳۵ میلی‌متر است، [۳] ۲. تغییر شکل قائم که نباید از ۲٪ ارتفاع سازه یعنی ۱۲۱/۲۰ mm تجاوز کند، [۵] ۳. نیروی محوری، ۴. نیروی برشی، ۵. لنگر خمشی، ۶. تنش فشاری



شکل ۵. اثر اختلاف خاکریزی در تغییرشکل افقی و قائم سازه.



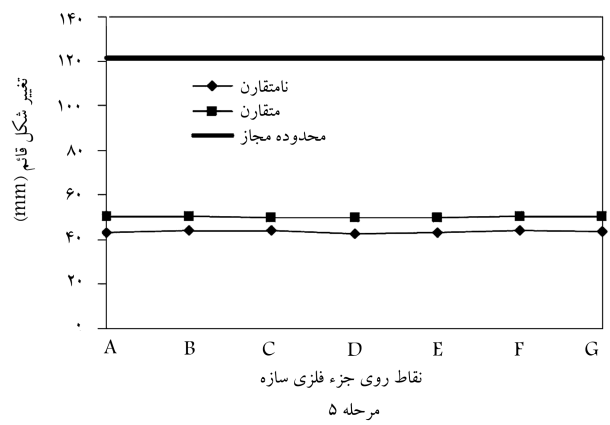
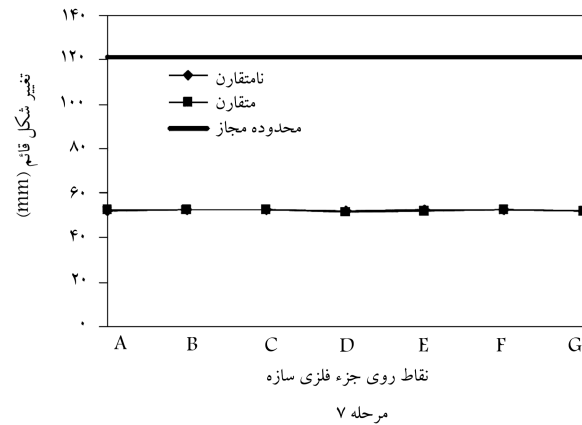
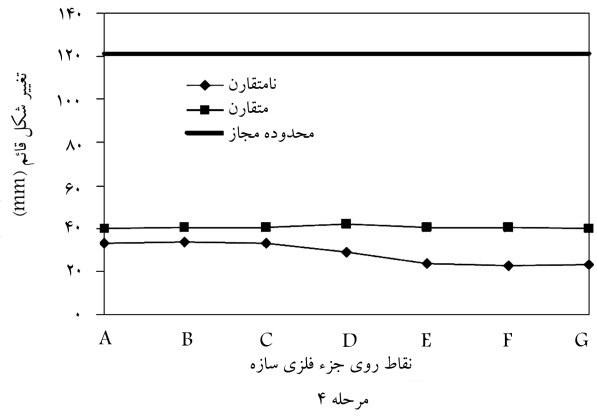
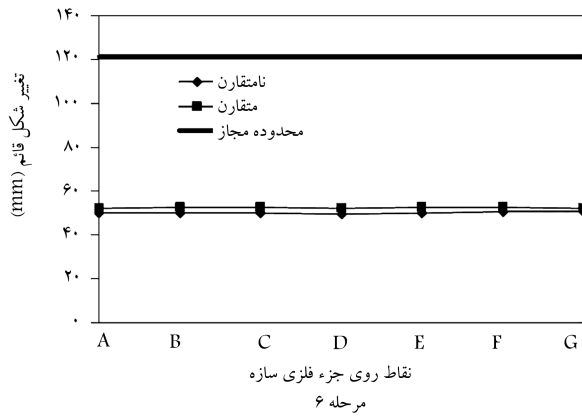
شکل ۶. اثر بارگذاری نامتقارن در تغییرشکل افقی سازه.

سازه تحت بارگذاری نامتقارن در مرحله‌ی اول غیرمجاز است. بنابراین در مراحل اولیه‌ی خاکریزی باید از بارگذاری نامتقارن پرهیز کرد. اگر به دلیل مسائل اجرایی امکان بارگذاری 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 تغییرشکل سازه نباید از حد مجاز تجاوز کند، زیرا ممکن است این امر منجر به ایجاد تغییرشکل دائمی در صفحات شود. مقایسه‌ی نمودارهای بارگذاری نامتقارن در مراحل مختلف و همچنین مقایسه‌ی منحنی‌های بارگذاری متقارن با یکدیگر نشان می‌دهد که با پیشرفت خاکریزی،

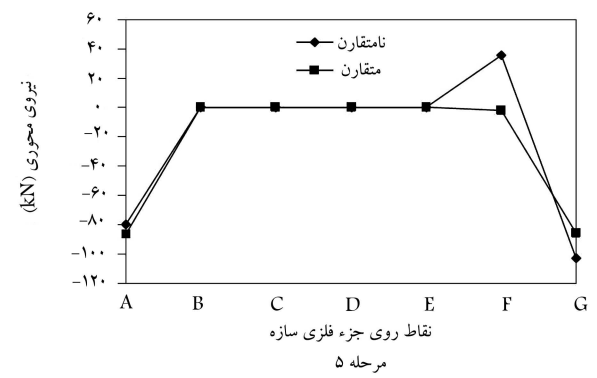
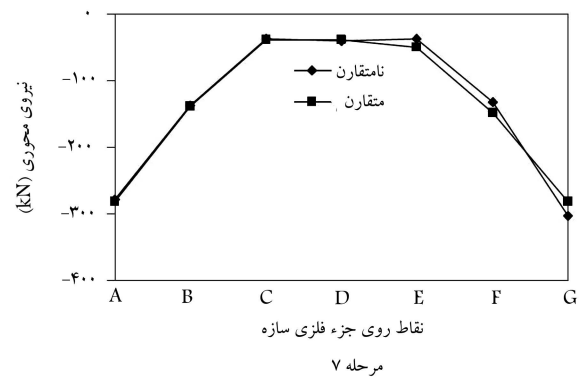
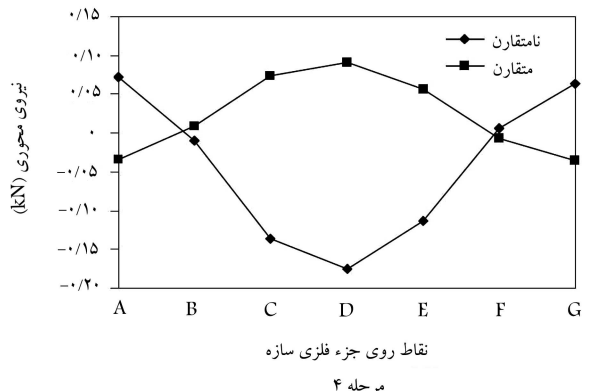
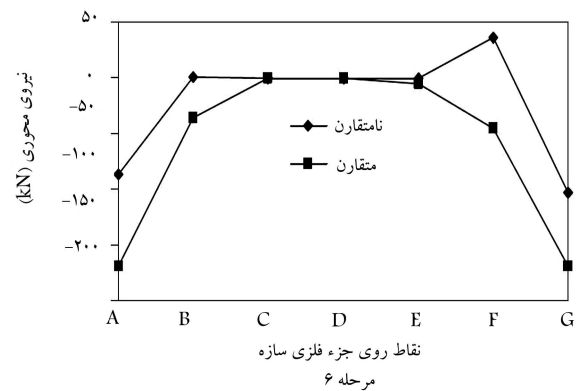
دیگر، در هر مرحله فقط یک طرف سازه تحت اثر بار زنده کامیون واقع می‌شود. اثر بارگذاری نامتقارن در شکل‌های ۶ تا ۱۱ نشان داده شده است.

#### ۱.۴.۷. اثر عدم تقارن بار بر تغییرشکل افقی سازه

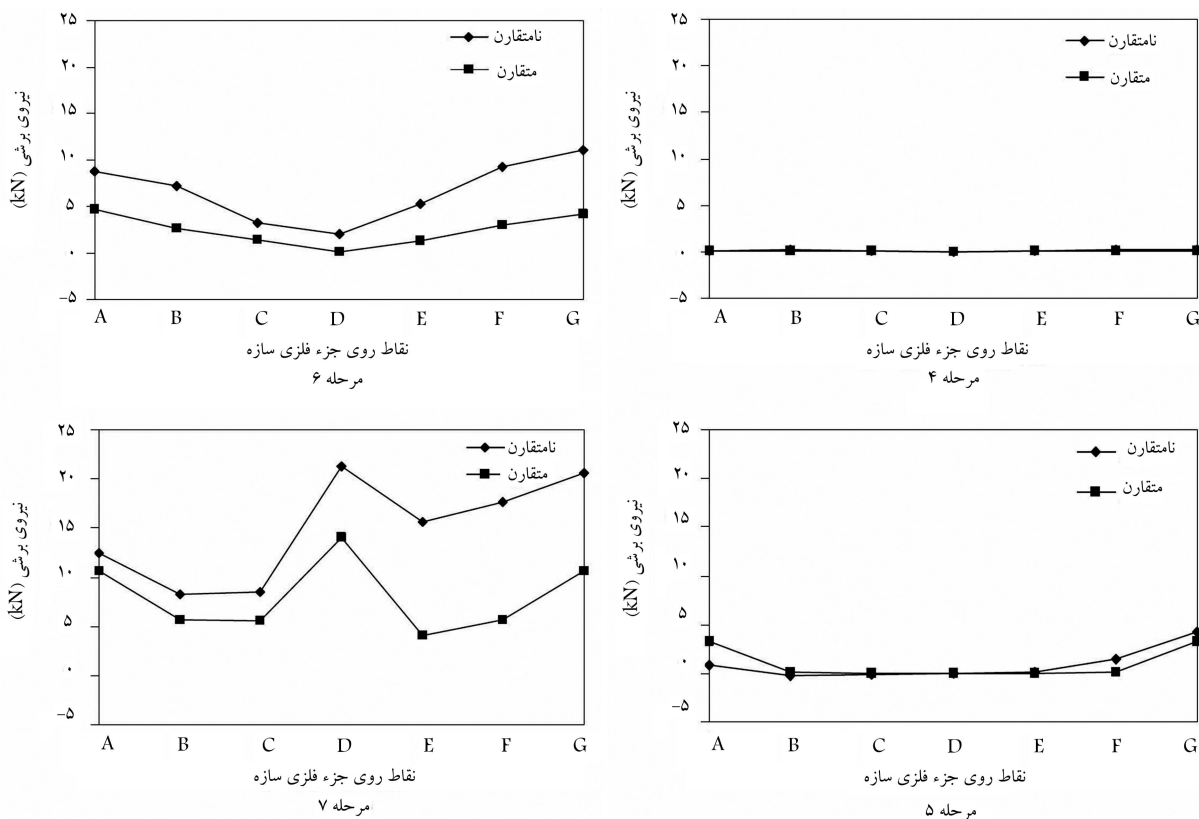
نمودارهای شکل ۶ اثر بار نامتقارن را در مراحل مختلف اجرا نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که سازه در مرحله‌ی اول خاکریزی روی پی‌ها (مرحله‌ی ۴) نسبت به بار نامتقارن بسیار حساس بوده و ۱۰ برابر بیش از تغییرشکل افقی بارگذاری متقارن است. اما در مراحل بعدی خاکریزی، نمودار تغییرشکل افقی بارگذاری نامتقارن تقریباً بر نمودار بارگذاری متقارن منطبق است. تغییرشکل افقی



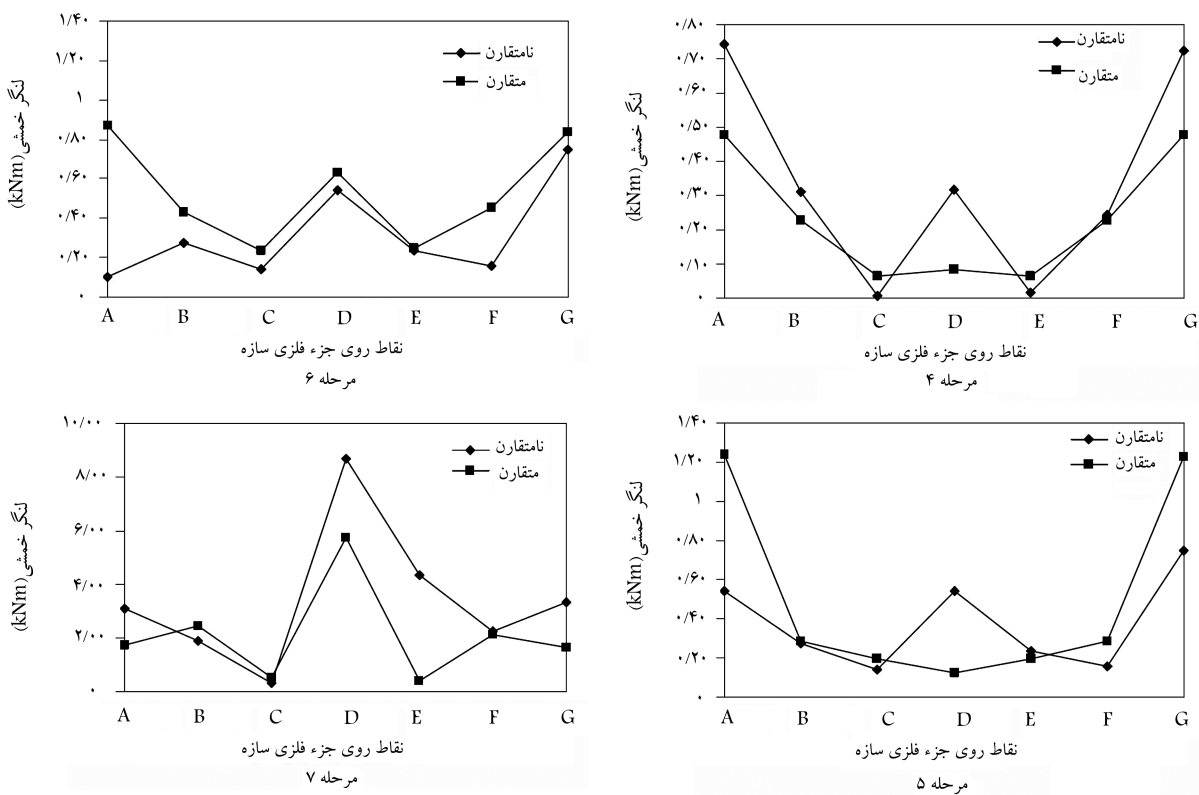
شکل ۷. اثر بارگذاری نامتقارن در تغییر شکل قائم سازه.



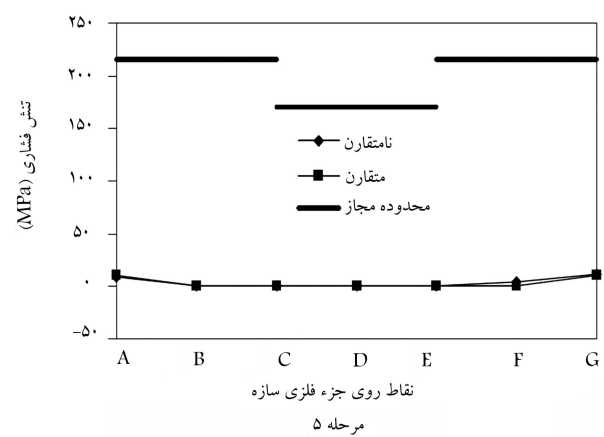
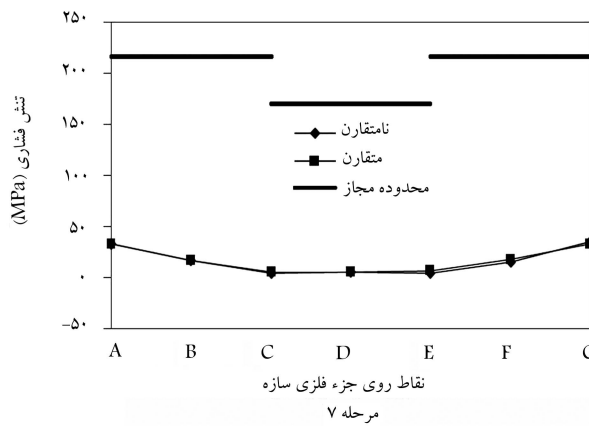
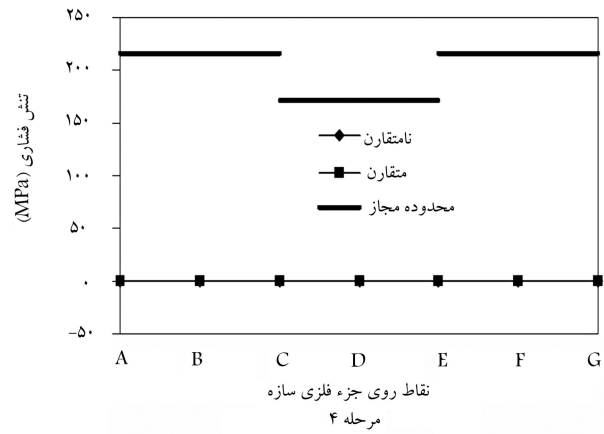
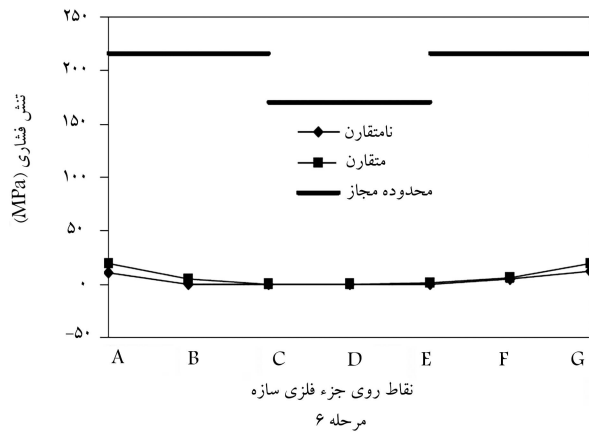
شکل ۸. اثر بارگذاری نامتقارن بر نیروی محوری.



شکل ۹. اثر بارگذاری نامستقران بر نیروی برشی.



شکل ۱۰. اثر بارگذاری نامستقران بر لنگر خمشی.



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

#### ۴.۴.۷. اثر عدم تقارن بار بر نیروی برشی

مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۹ نشان می‌دهد که با پیشرفت خاکریزی، نیروی برشی در سازه افزایش می‌یابد. نیروی برشی در نقاط تکیه‌گاهی A و G بیش از سایر نقاط است. نیروی برشی نقطه‌ی D (مرکز دهانه) تا زمانی که پوشش خاکی به صفحات تاج نرسیده، برابر صفر است؛ اما هنگامی که خاکریزی کنار صفحات تاج انجام می‌شود (مرحله ۷)، نیروی برشی در نقطه‌ی D به ۱۳/۹۸ کیلونیوتن می‌رسد. مقایسه‌ی نیروی برشی خاکریزی روی پی‌ها (مرحله ۴) در حالت بارگذاری متقارن و نامتقارن نشان می‌دهد که قدم‌مطلق نیروی برشی نقاط تکیه‌گاهی A و G در بارگذاری نامتقارن تقریباً دو برابر حالت متقارن است.

#### ۵.۴.۷. اثر عدم تقارن بار بر لنگر خمشی

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

#### ۶.۴.۷. اثر عدم تقارن بار بر تنش فشاری سازه

تنش فشاری مجاز سازه با استفاده از روابط آیین‌نامه‌ی برای دیواره‌ها و تاج جداگانه محاسبه می‌شود. تنش فشاری مجاز تاج (نقاط C، D و E) دارای محدودیت بیشتری است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تنش فشاری دیواره‌ها و تاج در

تغییرشکل افقی سازه کاهش می‌یابد و منحنی تغییرشکل 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 و F (محل پیشینه‌ی دهانه)، تغییرشکل افقی پیشینه است. بنابراین در مرحله‌ی خاکریزی دیواره‌های سازه، کنترل این دو نقطه بیش از سایر نقاط ضروری است.

#### ۲.۴.۷. اثر عدم تقارن بار بر تغییرشکل قائم سازه

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

#### ۳.۴.۷. 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 همه‌ی مراحل به استثنای مرحله ۴، برای نقاط A و G (نقاط اتصال صفحات به پی) بیش از سایر نقاط است. در مرحله‌ی اول خاکریزی (مرحله ۴) قدم‌مطلق 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 دیواره‌ها (مرحله ۷) این اختلاف حدوداً به صفر می‌رسد.

تمامی مراحل خاکریزی در حد مجاز است. با پیشرفت خاکریزی، تنش فشاری در کلبه‌ی نقاط افزایش می‌یابد. این اثر در نقاط تکیه‌گاهی بیشتر است. تنش فشاری در حالت بارگذاری متقارن و نامتقارن تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند.

### ۵.۷. اثر اجرای پوشش خاکی تاج

منظور از اجرای پوشش خاکی تاج، اجرای کمیته‌ی پوشش خاکی لازم جهت عبور و مرور ماشین‌آلات اجرایی از روی تاج سازه است، که با توجه به توصیه‌های آیین‌نامه‌ی CHBDC برابر ۴۰ سانتی‌متر به دست 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 هم‌سطح کردن پوشش خاکی سازه تا بستر راه یا راه‌آهن است.

### ۱.۵.۷. اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر تغییرشکل افقی سازه

تغییرشکل 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 تغییرشکل افقی مرکز سازه بیش از سایر نقاط است. همچنین تغییرشکل افقی سمت چپ سازه شامل نقاط E، F و G نسبت به طرف راست سازه حدود ۸٪ بیشتر است. در مرحله ۹، برآیند بار کامیون ۴۰ تنی در مرکز دهانه واقع است. لذا مرکز دهانه بیشترین تغییرشکل افقی را داراست. در مرحله ۱۰ محور جلوی کامیون در فصل مشترک دیواره‌ی راست ترانشه و پوشش خاکی واقع است. به‌طور کلی مقایسه‌ی منحنی‌های مراحل ۸ تا ۱۰ نشان می‌دهد که قدرمطلق تغییرشکل افقی این سه مرحله نسبت به حرکت کامیون حساس نیست.

اثر اجرای پوشش خاکی نهایی سازه بر تغییرشکل افقی سازه: منظور از پوشش خاکی نهایی، اجرای خاکریزی جهت تأمین کمیته‌ی ارتفاع پوشش خاکی مورد نیاز جهت عبور قطار است (مرحله ۱۱). تکمیل پوشش خاکی باعث کاهش ۳۰ درصدی تغییرشکل افقی سازه می‌شود.

### ۲.۵.۷. اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر تغییرشکل قائم سازه

-تغییرشکل قائم سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر: قدرمطلق تغییرشکل قائم مرحله ۸ و مرحله ۱۰ با یکدیگر برابرند. تغییرشکل قائم سازه در

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

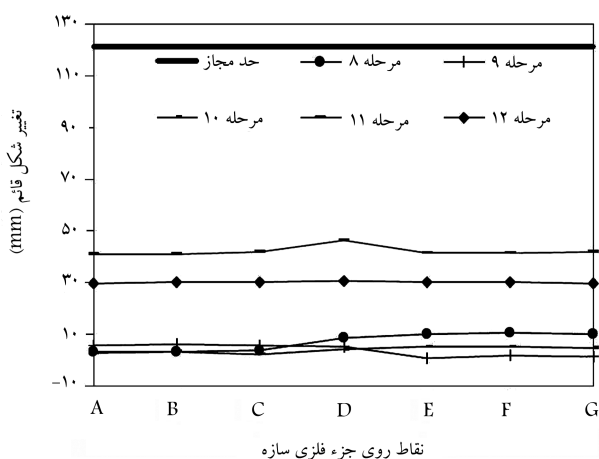
### ۳.۵.۷. اثر اجرای پوشش خاکی تاج بر نیروی محوری

نیروی محوری سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر: نیروی محوری در مراحل ۸ و ۱۰ به یکدیگر نزدیک‌اند و فقط ۱۶ کیلونیوتن تفاوت دارند. نیروی محوری در نقاط تکیه‌گاهی بیش از سایر نقاط سازه و برابر ۳۲۷ کیلونیوتن 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.

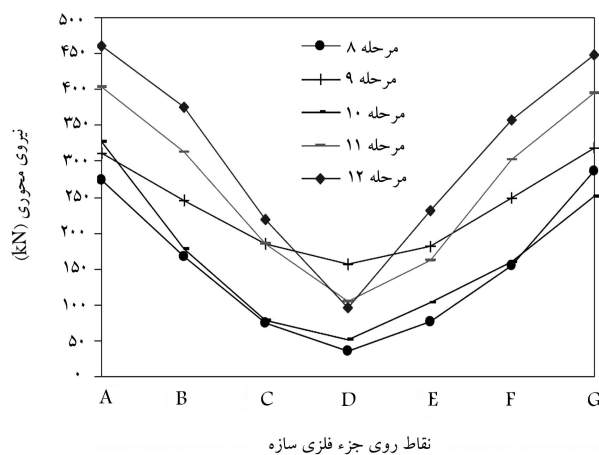
اثر اجرای پوشش خاکی نهایی سازه بر نیروی محوری سازه: نیروی محوری این مرحله در مرکز تاج ۲۳٪ کمتر از مرحله ۹ و در تکیه‌گاه‌ها ۲۴٪ بیشتر است (شکل ۱۴).

### ۴.۵.۷. اثر اجرای پوشش خاکی تاج و احداث خط آهن بر نیروی برشی

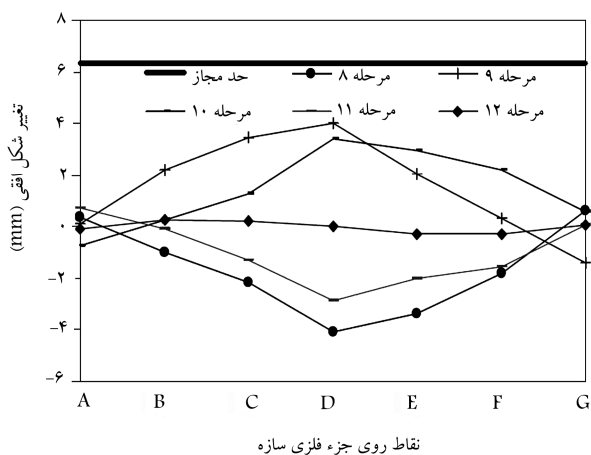
نیروی برشی سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر: نیروی برشی مراحل ۸ تا ۱۰ در تکیه‌گاه‌ها بین ۰/۴ تا ۲۳ کیلونیوتن تغییر می‌کند. بیشینه‌ی نیروی برشی ناشی از اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متری برابر ۱۱۷/۵۱ کیلونیوتن است و



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



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



شکل ۱۵. اثر اجرای پوشش خاکی تاج در تغییرشکل افقی.



خاکی مرحله‌ی ۹ کمتر از پوشش خاکی مرحله‌های ۱۱ و ۱۲ است، و درعین حال کامیون ۴۰ تنی در مرکز دهانه واقع است، لنگر خمشی آن بیش از حالتی است که پوشش خاکی تکمیل و خط راه‌آهن اجرا شده باشد. بنابراین پوشش خاکی سهم عمده‌ی در کاهش لنگرخمشی سازه را به عهده دارد.

اثر اجرای پوشش خاکی نهایی سازه بر لنگرخمشی سازه: تکمیل پوشش خاکی باعث کاهش ۶۶ درصدی لنگرخمشی تاج سازه می‌شود (شکل ۱۶).

#### ۶.۵.۷. 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 (مرحله‌های 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 کلیه نقاط سازه می‌شود. تنش فشاری در هیچ‌یک از مراحل فوق از تنش فشاری مجاز تجاوز نمی‌کند. تنش فشاری مجاز سازه با استفاده از روابط آیین‌نامه‌ی برای دیواره‌ها و تاج جداگانه محاسبه می‌شود، لذا به شکل نمودار پله‌ی است (شکل ۱۷).

### ۸. نتیجه‌گیری

هدف از ارائه‌ی 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. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که ضوابط طراحی استاندارد CHBDC برای بار کامیون ۴۰ تنی به‌منزله‌ی سنگین‌ترین بار اجرایی پاسخگو است و تغییرشکل افقی، تغییرشکل قائم، و تنش فشاری در حدود مجاز قرار دارد. به‌طورکلی از مقایسه‌ی نمودارها می‌توان این نتایج را استنباط کرد:

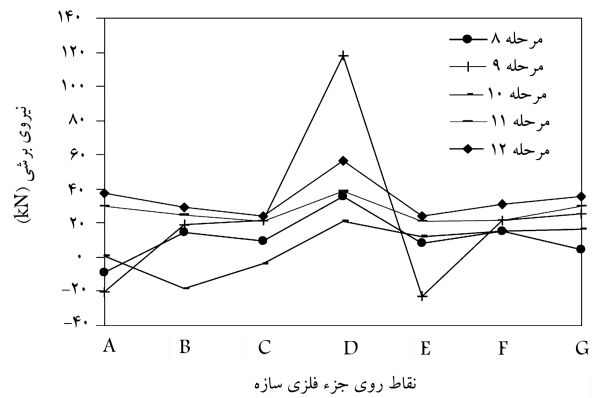
-- پس از بررسی اثر در نظرگیری لغزش بین صفحات فولادی موجود در خاک، نتایج نشان دادند که در حوزه‌ی مورد مطالعه در نظر گرفتن لغزش در محل تماس صفحات و خاک تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج ندارند و در تحلیل‌های بعدی می‌توان از این ساده‌سازی استفاده کرد.

-- بررسی اثر اختلاف خاکریز در دو طرف سازه نشان داد، در صورتی که اختلاف ارتفاع از ۴۰ سانتی‌متر تجاوز نکند، تغییرشکل‌ها در حد مجاز آیین‌نامه‌ی باقی می‌مانند.

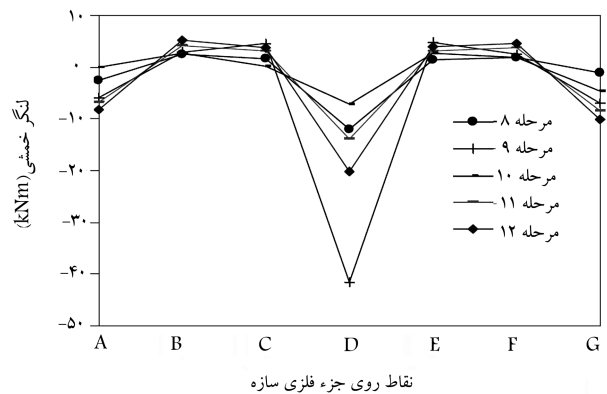
-- بررسی اثر عدم تقارن بار اجرایی بر روی سازه نشان داد که تغییرشکل افقی، نیروی محوری، و نیروی برشی به ویژه در مراحل اولیه‌ی خاکریزی بعضاً به دو برابر افزایش می‌یابند و باید از اجرای نامتقارن سازه اجتناب کرد.

-- بررسی اثر اجرای پوشش خاکی نشان داد که با تکمیل مراحل خاکریزی، تغییرشکل‌های افقی و قائم سازه کاهش می‌یابند.

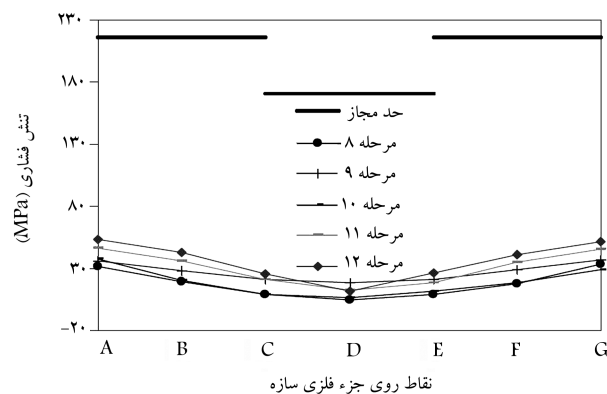
-- مقایسه‌ی تنش فشاری با مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ی نشان می‌دهد که مقادیر تنش مجاز حدود ۵ برابر تنش فشاری حاصل از تحلیل است و به جای پروفیل با ضخامت ۷/۱۱ mm می‌توان از پروفیل ۶/۳۲ mm استفاده کرد. به عبارت دیگر، با تحلیل گام به گام و استفاده از مدل‌های رفتاری غیرخطی می‌توان پروفیل اقتصادی‌تری را در مقایسه با آیین‌نامه‌های طراحی مبتنی بر روش‌های کشسان انتخاب کرد.



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



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



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

هنگامی روی می‌دهد که کامیون ۴۰ تنی در جهت عمود بر محور سازه و برآیند بار کامیون به فاصله‌ی ۳۲ m / ۰ متر از محور پل قرار دارد (مرحله‌ی 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 (مرحله‌های 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 تکیه‌گاه‌ها با تکمیل پوشش خاکی ۷ برابر افزایش می‌یابد.

#### ۵.۵.۷. اثر اجرای پوشش خاکی تاج و احداث خط آهن بر لنگر خمشی

لنگرخمشی سازه تحت اثر اجرای پوشش خاکی ۴۰ سانتی‌متر: به دلیل آنکه پوشش

**(References) منابع**

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/CSA-S6-00, 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).
9. Brinkgreve, R.B.J., *PLAXIS 2D Manual*, Version8, A.A. Balkema Publishers, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Netherlands (2002).

## STATIC ANALYSIS OF SOIL-STEEL BRIDGES UNDER CONSTRUCTION LOADS

**M. Esmaeili**(corresponding author)  
m\_esmaeili@iust.ac.ir

**J.A. Zakeri**  
zakeri@iust.ac.ir

**School of Railway Engineering**  
**Iran University of Science and Technology**

**P. Haji Abdulrazagh**  
p.abdulrazagh@ut

**School of Civil Engineering**  
**University of Tehran**

Sharif Civil Engineering Journal  
Volume 29, Issue 2, Page 117-126, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 19 April 2011; received in revised form 16 November 2011; accepted 17 December 2011.

### Abstract

Soil-steel structures are composite structures made by steel rings and a soil envelope, which are constructed in spans of, maximum, thirty meters. Soil-steel interaction causes flexible steel plates to interact with the surrounding backfill for suitable distribution of external loads in a radial direction. Internal forces and deflections are of the most concern in analytical study of soil-steel structures. But, only precise modeling makes results reliable. The current methods of analyzing these types of structures are principally based on the elasticity theory, in which nonlinear interaction of soil-structure and stage construction of local effects are not taken into account. These are the main concerns of the present research. In this paper, introducing soil-steel structures for bridge construction, the behavior of such structures is investigated under stage construction loads. As a case study, a single span soil-steel bridge has been analyzed and designed, based on the Canadian highway bridge design code (CHBDC) and results are compared with the PLAXIS finite element code. Stage construction consists of 1) the initial phase where a natural trench has been idealized; 2) filling and compaction of soil under foundations; 3) construction of foundation and installation of plates; 4) backfilling and compaction of both sides of the steel structure up to crown level; 5) backfilling the soil cover up to a minimum height of cover for construction loads; 6) backfilling and compaction of soil cover up to the final level for performance loads. In addition

to investigate the deformations, axial and shear forces, bending moments and stresses in each of the above construction stages, the stability of the natural trench before construction, the interface between corrugated steel plates and the soil, the assumption of the elastic behavior of backfilling, the effect of unbalanced backfilling, and the effect of the asymmetry of construction loads, have also been studied. The comparison indicates that horizontal and vertical displacements and the compressive stresses obtained from FE stage construction are 64, 43 and 56 percent, respectively, greater under standard limitations. Therefore, a more optimum and economic design, in comparison to elasticity based analysis methods, can be achieved by accounting for stage construction and the nonlinear behavior of soil-steel bridges.

**Key Words:** Soil-steel bridges, static analysis, Finite Element method, truck load.