

### شبیه سازی عددی سه بعدی تونل های کم عمق تحت بار دینامیکی قطار و تعیین روش احداث - بررسی موردی: تونل خط ۳ متروی تهران

مرتضی نصیری وند آقباقر<sup>۱\*</sup>؛ فرهاد صمیمی نمین<sup>۲</sup>؛ کورش شهریار<sup>۲</sup>؛ رضا تاکی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۴- معاونت فنی ایستگاه متروی آزادگان و تونل اتصال به پایانه جنوبی خط ۳ مترو، شرکت جهاد توسعه منابع آب

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.4344.1269

واژگان کلیدی	چکیده
بارگذاری دینامیکی بار دینامیکی قطار مدل سازی عددی روش پوش و کند تونل خط ۳ متروی تهران	با گسترش روزافزون جمعیت شهری، ساخت و توسعه زیرساخت های شهری بیش از پیش ضرورت می یابد. توسعه ساخت تونل های مترو در محیط های شهری همواره با محدودیت ها و مشکلات جدیدی روبرو بوده است. یکی از مشکلاتی که در این تحقیق به آن پرداخته شده، تقاطع خطوط مترو با خطوط ریلی راه آهن است. هدف از این تحقیق، ارائه روشی مناسب جهت احداث بخشی از تونل خط ۳ متروی تهران در عبور از زیر خطوط راه آهن سراسری تهران-اهواز می باشد. در طراحی اولیه، احداث این بخش از تونل به روش پوش و کند و روش طراحی شده بود که با در نظر گرفتن مزایای فنی در اجرا و کاهش هزینه ها، روش پوش و کند برای اجرای طرح پیشنهاد شد. برای تحلیل پایداری این بخش از تونل، بار دینامیکی حاصل در اثر حرکت قطار شبیه سازی شده و تابع بار دینامیکی این حرکت بدست آمده است. این تابع توسط نرم افزار <i>FLAC 3D</i> بر روی مدل عددی ساخته شده از تونل اعمال شده است. سپس نتایج بدست آمده از مدل سازی با دو روش تحلیلی مقایسه شد تا وضعیت پایداری تونل با استفاده از پارامترهای سرعت حرکت قطار، وزن واگن، تعداد واگن و میرایی محیط در بحرانی ترین شرایط تعیین شود. تحلیل های انجام شده در این مقاله نشان می دهد که پایداری تونل در وضعیت مناسبی قرار دارد.

#### ۱- مقدمه

پایداری تونل نقش اساسی دارد. معمولاً برخورد با مسائل دینامیکی، پیچیده تر و طولانی تر از حل مسائل استاتیکی می باشد. به همین دلیل اغلب تلاش می شود تا در کارهای معمول و متداول با تقریب های مناسبی بارهای دینامیکی را با بارهای معادل استاتیکی جایگزین نمایند و در عوض اثرات آن را با یک ضریب افزایشی به نام ضریب ضربه، افزایش دهند. به این ترتیب در طراحی پروژه ها، مهندسی می توانند از روش های ساده تر به نتایج قابل قبول برسند. این روش همچنان به عنوان روش معمول و متداول در محاسبات مربوط به تاثیر بارهای دینامیکی بر روی پل ها مورد استفاده است. اما

یکی از محدودیت های بوجود آمده در طراحی خط ۳ مترو تهران، گذر این خط از زیر راه آهن سراسری می باشد. در طراحی اولیه، این بخش از تونل به روش پوش و کند و روش *Cut and cover (bottom up)* طراحی شده بود. در واقع پس از احداث، بر روی سقف تونل مترو تیرهای پیش ساخته بتنی مانند پلی قرار می گیرد که خطوط راه آهن سراسری از روی آن خواهد گذشت. از این رو بررسی تاثیر بار دینامیکی ناشی از حرکت قطارهای راه آهن بر روی این پل در تعیین

در سال ۲۰۰۲، Liu و همکارانش تحقیقی را برای تعیین ضریب ضربه‌ی دینامیکی برای پل‌های بتنی پیش تنیده انجام دادند. در این تحقیق تمرکز اصلی بر ناصافی سطح جاده و اثر آن بر اندرکنش بار متحرک و پل و در نهایت مقایسه پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی پل تحت بار متحرک بوده است. بر مبنای این تحقیق ضریب ضربه برای لنگر با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌ی AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) مطابقت خوبی دارد ولی با افزایش ناصافی‌ها، افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که ناصافی‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق نسبتاً زیاد می‌باشد که در عمل کمتر چنین شرایطی پیش می‌آید. در عین حال این تحقیق اهمیت نگهداری صحیح و مرمت دوره‌ای روسازی پل‌ها را بیشتر نمایان می‌کند (Liu C., 2002). در سال ۲۰۰۲، Cheng ارتعاش پل‌های راه‌آهن را با در نظر گرفتن شرایط ریل‌ها مورد بررسی قرار داد. او نشان داد که شرایط ریل‌ها تاثیر زیادی بر ارتعاش پل‌ها ندارد. همچنین در این تحقیق ضریب ضربه‌های دینامیکی برای شرایط مختلف ریل و بستر راه بررسی گردیده است (Cheng Y.S., 2001).

در سال ۲۰۰۳، Lin به مسئله رزونانس در پاسخ دینامیکی پل‌های راه‌آهن به حرکت قطار پرداخت و نشان داد که فرکانس‌های ارتعاشی پل باید حتی المقدور متفاوت از فرکانس قطارها باشد (Ju, 2002).

Lou در سال ۲۰۰۴ اندرکنش پل راه‌آهن و قطار را با مدل المان محدود مورد ارزیابی قرار داد و اثر صافی ریل‌ها را بر کاهش پاسخ دینامیکی پل بررسی نمود. در این تحقیق قطار، ریل و پل به صورت یک سیستم به هم پیوسته مدل شده است تا اندرکنش پل و قطار مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد شرایط ریل بر جابجایی و شتاب قائم قطار اثر جدی دارد ولی بر چرخش بدنه قطار و جابجایی و شتاب قائم پل چندان تاثیر گذار نیست. بنابراین برای راحتی و آرامش مسافران صافی ریل‌ها اهمیت دارد (Lou P., 2005).

در این تحقیق با در نظر گرفتن پارامترهایی چون سرعت حرکت، وزن قطار، فاصله‌ی محورهای قطار و میرایی محیط، بار دینامیکی حاصل از حرکت قطار مدل سازی شده و با استفاده از دو روش تحلیلی و مدل سازی رایانه‌ای در

آنچه مسلم است، یافتن روابط مناسب برای ضریب ضربه که جمیع جوانب مسئله و اثر پارامترهای مختلف را در خود داشته باشد، نیاز به تحقیقات فراوان دارد و همچنین پاسخ انواع پل‌ها از لحاظ هندسه، وضعیت تکیه گاه‌ها و غیره به بارهای دینامیکی یکسان نخواهد بود در عین حال که بارهای دینامیکی نیز بسته به نوع بار، سرعت حرکت وسیله نقلیه، تعداد خطوط بارگذاری و امکان هم‌زمانی آن و غیره، اثرات متفاوتی بر سازه ایجاد خواهد کرد.

معمولاً در تحقیقات صورت گرفته برای معادل سازی بار دینامیکی ناشی از حرکت قطار به صورت استاتیکی، صرفاً روابط به صورت تابعی از طول دهانه‌ی پل است و عوامل دیگری چون سرعت حرکت قطار، وزن قطار و فاصله‌ی محورها را مد نظر قرار نمی‌دهند. اگرچه استفاده از روش معادل کردن بار دینامیکی به بار استاتیکی، آسان‌تر بوده و زمان رسیدن به نتایج را کاهش می‌دهد ولی به دلیل در نظر نگرفتن تمام عوامل موثر بر بار ناشی از حرکت وسیله نقلیه، دارای نتایج تقریبی بوده است و این نتایج با واقعیت اندکی تفاوت دارد. همچنین معمولاً تحلیل‌های انجام گرفته توسط آیین‌نامه‌های مختلف دارای نتایج متفاوتی هستند.

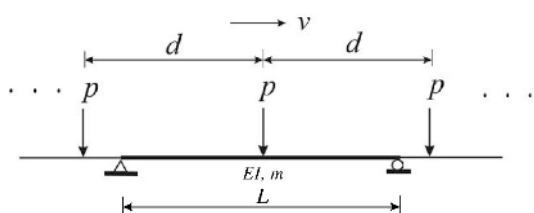
در سال ۲۰۰۰، Fryba به موضوع رزونانس ناشی از حرکت قطار بر روی پل‌ها پرداخت. او دو پارامتر اعمال بارهای متوالی ناشی از محورهای قطار و سرعت بالای قطارهای مدرن را به عنوان عوامل اصلی تشدید در ارتعاش پل معرفی نمود. در این تحقیق نشان داده شده است که بیشترین مقدار ارتعاش پل مربوط به زمانی است که آخرین محور قطار از پل خارج می‌گردد و بر این اساس روابط ساده‌ای برای ضریب ضربه در پل‌های راه‌آهن پیشنهاد شده است (Fryba L., 2001).

در سال ۲۰۰۲، Zhang و همکارانش در جهت تعیین ضریب ضربه برای پل‌های کامپوزیت فولادی-بتنی تحقیقاتی را انجام دادند. آنها ۱۲۰ نمونه پل را که از تغییر پارامترهای مختلف مانند طول دهانه، تعداد شاهتیرها، تعداد خطوط ترافیک و غیره بدست آمده بود در محیط نرم افزاری ABAQUS مورد تحقیق قرار دادند. در این تحقیق برای مدل سازی بار دینامیکی از تعدادی بار متمرکز متحرک استفاده شده و با توجه به نتایج به دست آمده، روابطی برای ضریب ضربه ارائه گردیده است (Zhang X., 2003).

### ۳- اصول و مبانی رفتار دینامیکی پل‌ها تحت

#### بارهای متمرکز متحرک

یکی دیگر از روش‌های بررسی پاسخ دینامیکی پل‌ها تحت حرکت وسیله نقلیه، در نظر گرفتن پل به صورت یک تیر ساده و تحلیل دینامیکی آن تحت حرکت بارهای متمرکز می‌باشد. این روش علاوه بر دقت، نسبتاً ساده بوده و امکان انجام تحلیل‌های فراوان در زمان کم را فراهم می‌آورد. برای بررسی تئوری حاکم بر حرکت قطار بر پل با دهانه‌ی ساده، مطابق شکل ۲ یک تیر با دهانه‌ای به طول  $L$  و مقطع ثابت در نظر گرفته شده است. قطار مورد نظر نیز به صورت مجموعه‌ای از بارهای متمرکز هم فاصله در نظر گرفته می‌شود که با سرعت ثابت  $v$  روی تیر حرکت می‌کنند. فاصله‌ی این بارها  $d$  و مقدار هر بار  $p$  لحاظ شده است (Yang Y.B., et al, 2006).



شکل ۲- نمایی از مدل حرکت قطار بر روی پل به صورت بارهای متمرکز متحرک (Yang Y.B., et al, 2006)

معادله‌ی (۴)، معادله حرکت دینامیکی بارهای متمرکز متحرک بر روی این تیر می‌باشد. در این رابطه  $u'$  مشتق  $u$  نسبت به مختصات  $x$  و  $\dot{u}$  مشتق  $u$  نسبت به زمان را نشان می‌دهد.

$$mu + c\dot{u}'''' + EIu'''' \quad (4)$$

$$= P \sum_{j=1}^N \delta \left( x - v(t - t_j) \right) \cdot \left[ H(t - t_j) - H \left( t - t_j - \frac{L}{v} \right) \right]$$

سایر علائم به قرار زیر است:

$M$ : جرم واحد طول تیر،

$C$ : ماتریس میرایی،

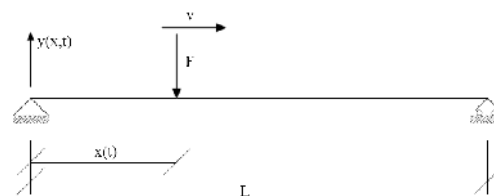
$E$ : مدول الاستیسیته،

شرایط مختلف برای قطار، میزان جابجایی عمودی بر روی سقف تونل خط ۳ متروی تهران بدست آمده است. در انتها، جهت احداث تونل مترو روشی مناسب‌تر از لحاظ فنی و اقتصادی نسبت به روش کند و پوش، پیشنهاد می‌شود.

### ۲- تحلیل دینامیکی پل‌ها تحت حرکت تک بار

#### متحرک

ساده‌ترین روش برای تحلیل دینامیکی پل‌ها، اعمال یک بار متحرک بر روی پل است. در این روش باری مطابق شکل ۱ با سرعت  $v$  به یک تیر ساده به طول  $L$  با مدول الاستیسیته  $E$  و ممان اینرسی  $I$  وارد می‌شود. با استفاده از رابطه‌ی (۱) می‌توان جابجایی هر نقطه از تیر ( $x$ ) را در زمان  $t$  به دست آورد. با ضرب کردن نتایج بدست آمده از این رابطه در تعداد بار مورد نظر برای عبور از روی تیر، میزان جابجایی پس از عبور وسیله نقلیه تعیین می‌شود (Rashid S., 2011). در رابطه‌ی (۱)،  $\omega_i$  فرکانس‌های ویژه متناظر می‌باشد و مقدار آن طبق رابطه‌ی (۲) تعیین می‌شود.  $M$  در رابطه‌ی (۲) جرم واحد طول تیر است. مقدار ضریب  $\alpha$  نیز بر اساس رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.



شکل ۱- تحلیل دینامیکی تیر ساده تحت بار متحرک (Rashid S., 2011)

$$y(x, t) = \frac{96 FL^3}{48 E\pi^4} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^4(1 - \alpha^2/i^2)} \left( \sin \left( \frac{i\pi v}{L} t \right) - \frac{\alpha}{i} \sin(\omega_i t) \right) \sin \left( \frac{i\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

$$\omega_i = \left( \frac{i\pi}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{M}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\pi v}{\omega_1 L} \quad (3)$$

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (12)$$

$$F_n(t) = \frac{2P}{mL} \sum_{j=1}^N \left| \sin \left( \frac{n\pi v(t-t_j)}{L} \right) \right| \cdot H(t-t_j) + (-1)^{n+1} \sin \left( \frac{n\pi v \left( t-t_j - \frac{L}{v} \right)}{L} \right) \cdot H \left( t - t_j - \frac{L}{v} \right) \quad (13)$$

روابط (۱۴) و (۱۵) حل معادله دیفرانسیل (۱۱) با استفاده از روش دوهمامل می‌باشد.

$$q_n(t) = \frac{1}{m\omega_{dn}} \int_0^t F_n(\tau) \cdot e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin(\omega_{dn}(t-\tau)) d\tau \quad (14)$$

$$q_n(t) = \frac{2PL^3}{n^4 EI \pi^4} \sum_{j=1}^N \frac{1}{(1-S_n^2)^2 + 4(\xi S_n)^2} \cdot |A \cdot H(t-t_j) + (-1)^{n+1} B \cdot H \left( t-t_j - \frac{L}{v} \right)| \quad (15)$$

که در آن  $S_n$ ،  $A$  و  $B$  از روابط (۱۶) تا (۱۸) محاسبه

$$S_n = \frac{n\pi v}{\omega_n L} \quad (16)$$

$$A = (1-S_n^2) \sin \frac{n\pi v}{L} (t-t_j) - 2\xi S_n \cos \left( \frac{n\pi v}{L} \right) (t-t_j) + e^{-\xi\omega_n(t-t_j)} \cdot \left[ 2\xi S_n \cos \omega_{dn}(t-t_j) + \frac{S_n}{\sqrt{1-\xi^2}} (2\xi^2 + S_n^2 - 1) \sin \omega_{dn}(t-t_j) \right] \quad (17)$$

$t_j = (j-1)d/v$ : زمان رسیدن بار  $j$ ام روی تیر،

$u(x,t)$ : جابجایی قائم تیر،

$t$ : زمان عبور کل بارها،

$I$ : ممان اینرسی مقطع،

$N$ : تعداد بارهای متحرک

$\delta$ : تابع دلتای دیراک که به صورت رابطه‌ی (۵) بیان می‌شود.

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases}; \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (5)$$

$H(t)$ : تابع گام واحد که به صورت رابطه‌ی (۶) تعریف

می‌شود.

$$H(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

روابط (۷) و (۸) شرایط مرزی معادله‌ی (۴) را نشان می‌دهند.

$$u(0,t) = u(L,t) = 0 \quad (7)$$

$$EIu''(0,t) = EIu''(L,t) = 0 \quad (8)$$

با فرض این که پل در حال سکون است شرایط اولیه نیز با رابطه‌ی (۹) مشخص شده است.

$$u(x,0) = u(x,0) = 0 \quad (9)$$

افت قائم پل با معادله‌ی (۱۰) قابل بیان است.

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \cdot \sin \left( \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (10)$$

در رابطه‌ی (۱۰)،  $q_n$  مختصات تعمیم یافته مود  $n$ ام و  $\sin(n\pi x/L)$  تابع شکل آن می‌باشد. با جایگذاری این رابطه به جای  $u$  در معادله دیفرانسیل ارتعاش پل و ضرب طرفین رابطه در  $\sin(n\pi x/L)$  و انتگرال گیری روی طول پل رابطه‌ی (۱۱) حاصل می‌شود. در این رابطه، مقادیر  $\omega_n$  و  $F_n(t)$  به ترتیب از روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌گردند. همچنین  $\xi$ ، میرایی پل می‌باشد.

$$q_n + 2\xi\omega_n q_n + \omega_n^2 q_n = F_n(t) \quad (11)$$

رابطه‌ی (۱۰) جایجایی هر نقطه از تیر در فاصله  $x=0$  تا  $x=L$  و در زمان  $t$  قابل محاسبه می‌باشد (Yang Y.B., et al., 2006).

#### ۴- شبیه‌سازی بار دینامیکی قطار

برای اعمال بار دینامیکی قطار به مدل، ابتدا باید تابع بار دینامیکی آن با استفاده از سه پارامتر فاصله‌ی محور چرخ‌ها، نیروی هر محور قطار (که با استفاده از وزن هر واگن بدست می‌آید) و سرعت قطار تعیین شود. اگر ابعاد واگن‌های قطار، جهت حرکت آن و فاصله‌ی محورهای هر چرخ از واگن‌های قطار نسبت به یکدیگر مطابق شکل ۳-الف در نظر گرفته شود، با داشتن سرعت حرکت قطار و وزن هر واگن می‌توان نمودار مربوط به نیروی اعمال شده توسط چرخ واگن‌ها نسبت به زمان را برای یک نقطه‌ی خاص روی ریل ترسیم کرد.

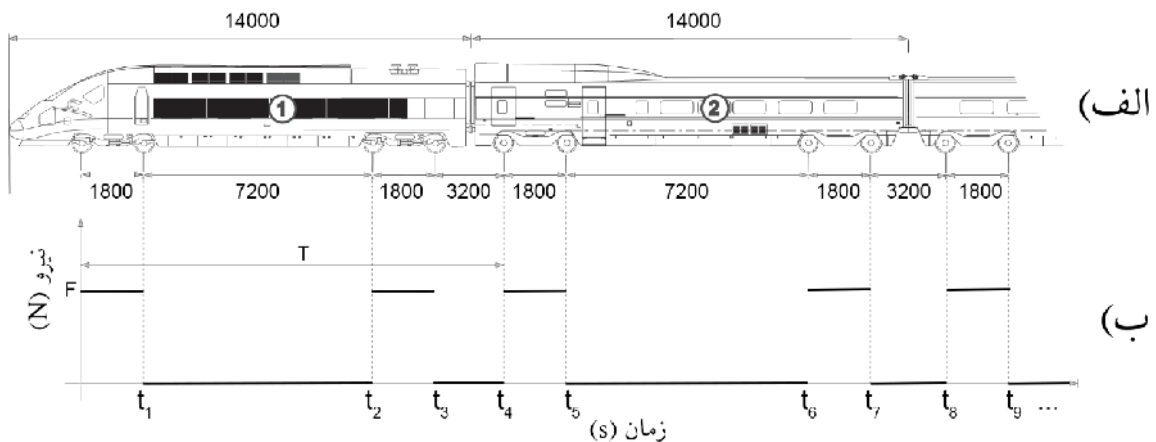
$$B \quad (18)$$

$$= (1 - S_n^2) \sin \frac{n\pi v}{L} \left( t - t_j - \frac{L}{v} \right) - 2\xi S_n \cos \left( \frac{n\pi v}{L} \right) \left( t - t_j - \frac{L}{v} \right) + e^{-\xi \omega_n \left( t - t_j - \frac{L}{v} \right)} \left[ 2\xi S_n \cos \omega_{dn} \left( t - t_j - \frac{L}{v} \right) + \frac{S_n}{\sqrt{1 - \xi^2}} (2\xi^2 + S_n^2 - 1) \sin \omega_{dn} \left( t - t_j - \frac{L}{v} \right) \right]$$

در روابط (۱۷) و (۱۸) پارامتر  $\omega_{dn}$  فرکانس میرا شده‌ی ارتعاش تیر می‌باشد و مقدار آن از رابطه‌ی (۱۹) به دست می‌آید.

$$\omega_{dn} = \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2} \quad (19)$$

با محاسبه  $q_n(t)$  از رابطه‌ی ۱۵ و جایگذاری آن در



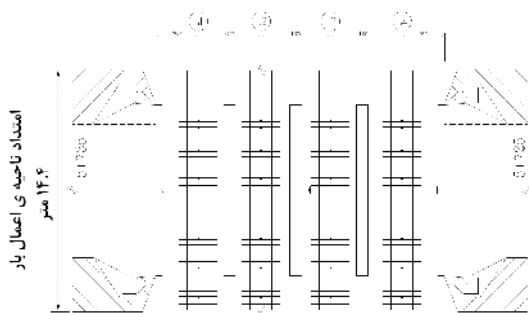
شکل ۳- الف) ابعاد واگن‌های قطار، ب) نیروی اعمال شده توسط چرخ واگن‌ها نسبت به زمان (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

$t_2$  که در واقع لحظه اعمال نیروی دو چرخ مجاور بعدی واگن اولیه است، مقدار نیروی اعمالی صفر است. لحظه‌ی  $t_2$  نیز مانند حالت اول، زمان شروع اعمال نیرو توسط دو چرخ بعدی واگن اولیه است. مدت زمان اعمال این نیرو نیز از زمان  $t_2$  تا  $t_3$  است. از لحظه‌ی  $t_3$  مجدداً اعمال نیرو توسط چرخ‌ها، قطع شده و تا زمان  $t_4$  نیرویی وجود نخواهد داشت. در واقع زمان  $t_4$  مدت زمان یک دوره‌ی کامل نیرو توسط چرخ واگن‌ها خواهد بود که بعد از این زمان، مجدداً چرخه اعمال نیرو، به گونه‌ای که در بالا بیان شد، ادامه می‌یابد (Nejati H.R.,

با فرض اینکه در لحظه‌ی  $t = 0$  (مبدا محورهای مختصات فرضی) نیروی  $F$  از طریق اولین چرخ اولین واگن، روی ریل اعمال می‌شود و به دلیل کوچک بودن فاصله‌ی زمانی بین نیروهای اعمالی توسط دو چرخ مجاور می‌توان این نیروها را به عنوان یک نیروی خطی پیوسته ثابت و با اندازه  $F$  فرض کرد، یعنی این نیروی خطی ثابت در مدت زمان  $t_1$  اعمال می‌شود. بعد از گذشت زمان  $t_1$ ، نیروی اعمالی توسط چرخ‌های اولیه، قطع شده و تا زمان

صرف نظر شده است.

بحرانی‌ترین شرایط برای عبور قطار بر روی این بخش از تونل هنگامی است که دو قطار در جهت‌های مخالف از کنار هم دیگر عبور کنند (Islamic republic of Iran management and planning organization, 2001). از این روی در این طرح نیز دو قطار در نظر گرفته شده است که بر روی ریل‌های  $L1$  و  $L4$  در جهت مخالف یکدیگر در حرکت اند و بار دینامیکی آنها بر روی این دو ریل اعمال شده است (شکل ۴).



شکل ۴- ناحیه‌ی اعمال بار دینامیکی قطارها

همان طور که پیشتر اشاره شد، بار دینامیکی بدست آمده از این روش شبیه سازی را می‌توان فقط به یک نقطه از مدل اعمال کرد. در نتیجه این روش برای مسائل دو بعدی قابل اجرا است و استفاده از آن در این تحقیق که طرح در حالت سه بعدی بررسی می‌شود، امکان پذیر نمی‌باشد. برای رفع این مشکل، طول ناحیه‌ی مورد نظر برای اعمال بار قطار به چند بخش مساوی تقسیم شده است و با توجه به زمان ورود اولین چرخ از قطار به هر بخش، بار دینامیکی بر روی این بخش‌ها اعمال می‌شود. این زمان با استفاده از اندازه‌ی طول این بخش‌ها و سرعت حرکت قطار، طبق رابطه‌ی  $t = \frac{x}{v}$  بدست می‌آید. بار دینامیکی به ترتیب به هر قسمت اعمال می‌شود تا به آخرین بخش برسد. هنگام عبور آخرین چرخ از روی این نواحی، بار دینامیکی در این قسمت‌ها حذف می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان با تقریب خوبی، حرکت قطار را در حالت سه بعدی شبیه سازی کرد. در شکل ۵ نحوه‌ی تقسیم بندی و اندازه‌ی هر یک از این بخش‌ها نشان داده شده است.

2009). این نوع روند اعمال نیرو در شکل ۳-ب نشان داده شده است. بنابراین تابع نیروی اعمالی بر حسب زمان در بازه‌ی زمانی صفر تا  $t_4$  به صورت رابطه‌ی (۲۰) ارائه می‌شود.

$$f(t) = \begin{cases} F, & 0 \leq t < t_1 \\ 0, & t_1 \leq t < t_2 \\ F, & t_2 \leq t < t_3 \\ 0, & t_3 \leq t < t_4 \end{cases} \quad (20)$$

همان طور که اشاره شد تابع ارائه شده در رابطه‌ی ۲۰ تابع تناوبی با دوره‌ی تناوب  $T = t_4$  است. اگر تابع تناوبی مانند  $f(t)$  با دوره تناوب  $T$  موجود باشد، این تابع را می‌توان با استفاده از فرمول سری فوریه به صورت تابعی پیوسته و بر اساس توابع سینوسی و کسینوسی به صورت رابطه‌ی ۲۱ نمایش داد. که در آن  $a_0$ ،  $a_n$  و  $b_n$  ضرایب سری فوریه هستند و بر اساس روابط ۲۲ تا ۲۴ محاسبه می‌شوند.

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad (21)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^{t_4} f(t) dt \quad (22)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{t_4} f(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt \quad (23)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{t_4} f(t) \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt \quad (24)$$

به این ترتیب تابع بار ناشی از حرکت قطار برحسب نیروی اعمال شده توسط چرخ واگن‌ها، قابل محاسبه است (Nejati H.R., 2009).

## ۵- نحوه‌ی اعمال بار قطار به مدل

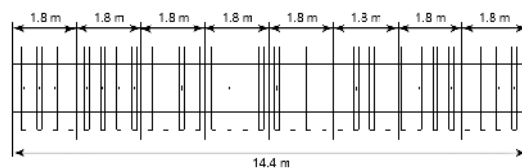
در این تحقیق بار دینامیکی بدست آمده فقط روی تیر پیش ساخته قرار گرفته بر روی سقف تونل، اعمال شده است و از اعمال بار در بخش قبل و بعد از آن صرف نظر شده است. زیرا در نظر گرفتن این ناحیه برای تاثیر بار قطار، باعث افزایش بسیار زیاد زمان محاسبات در نرم افزار شده و عملاً رسیدن به نتیجه، غیر ممکن می‌شود. همچنین تاثیر عبور قطار در این ناحیه بر روی گذرگاه بسیار ناچیز است و می‌توان از آن چشم پوشی کرد. در شکل ۴ این ناحیه مشخص شده است. همچنین قطار به صورت مجزا از سیستم ریل-خاک در نظر گرفته شده و از اثرات دینامیکی بر هم کنش قطار با ریل،

## ۶- مقایسه‌ی نتایج

پس از مدل‌سازی در نرم‌افزار *FLAC 3D*، نتایج حاصل از بارگذاری دینامیکی بر روی مدل در شرایط مختلفی از حرکت قطار بررسی شده است. بدین منظور پارامترهای سرعت حرکت قطار، وزن واگن، تعداد واگن‌ها و میزان میرایی محیط در چند مقدار مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است، تا تاثیر این پارامترها بر میزان جابجایی وسط دهانه‌ی پل تعیین شود. سپس نتایج به دست آمده توسط تحلیل مدل در نرم‌افزار با نتایج به دست آمده از روش‌های تحلیل دینامیکی پل تحت حرکت تک بار متحرک و بارهای متمرکز متحرک، مقایسه شده است. این مقایسه‌ها در شرایط یکسان برای هر سه روش، انجام شده است. در این بررسی‌ها فاصله‌ی محور چرخ‌های قطار مطابق شکل ۳-الف در نظر گرفته شده است.

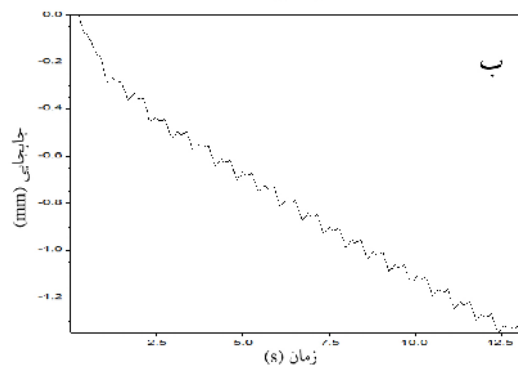
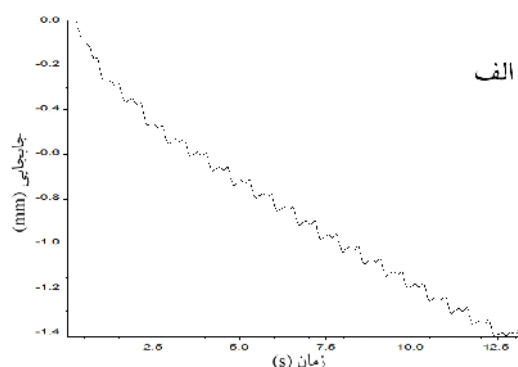
در ابتدا قطاری با ۲۰ واگن که وزن هر یک ۱۰۰ تن می‌باشد با میرایی ۱ درصد برای محیط، در پنج سرعت حرکت ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. شکل ۷ نتایج این سه تحلیل را برای سرعت‌های مختلف حرکت قطار نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت حرکت قطار، میزان افت در وسط دهانه‌ی پل کاهش می‌یابد. دلیل این امر، زمان کوتاه‌تر بارگذاری روی مدل در سرعت‌های بالاتر است. انتخاب ضریب ۱ درصد برای میرایی محیط با توجه به نتایج تجربی بدست آمده توسط *Clough* و تعیین شده است. در این تحقیق میرایی سازه پل معمولاً بین ۱ تا ۳ درصد بدست آمده است (*Clough RW, 1996*).

شکل ۸ نتایج بررسی بر روی سه قطار مختلف با وزن‌های ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ تن برای هر واگن را نشان می‌دهد. در این بررسی سرعت حرکت قطارها ۴۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است و همچنین تعداد واگن‌ها ۲۰ عدد و میرایی محیط ۱ درصد فرض شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش وزن واگن‌ها، تغییر شکل بر روی گذرگاه نیز افزایش می‌یابد.



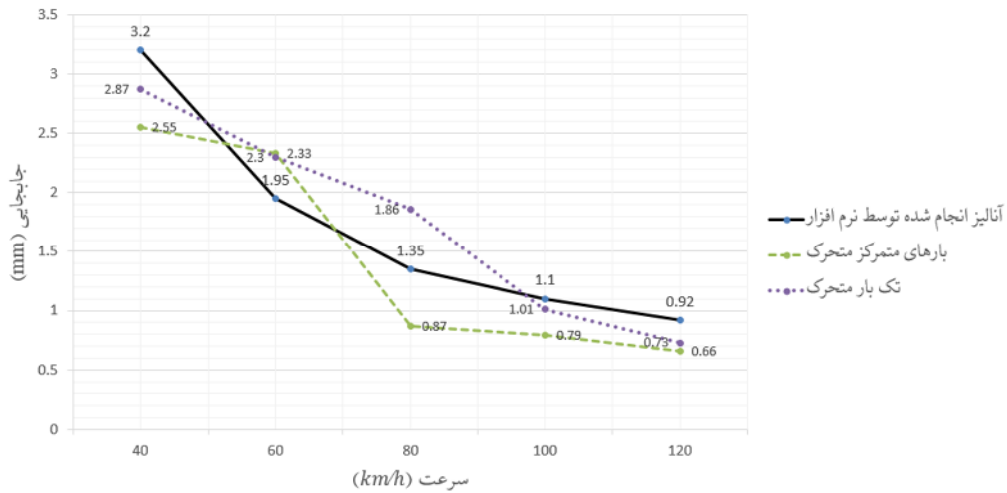
شکل ۵- نحوه‌ی تقسیم بندی ناحیه‌ی در نظر گرفته شده برای عبور قطار و اندازه‌ی هر بخش

با مدل‌سازی چند باره و تغییر این فواصل، نتایج نشان داد که طول این بخش‌ها، تاثیر قابل توجهی در نتایج بدست آمده ندارد. شکل ۶ میزان جابجایی به دست آمده در وسط دهانه‌ی پل، هنگام عبور قطاری با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت را برای دو حالت ۸ بخش ۱۸۰ سانتی‌متری و ۱۶ بخش ۹۰ سانتی‌متری، نشان می‌دهد. تفاوت نتایج به دست آمده در این دو حالت فقط ۰/۰۵ میلی‌متر است.

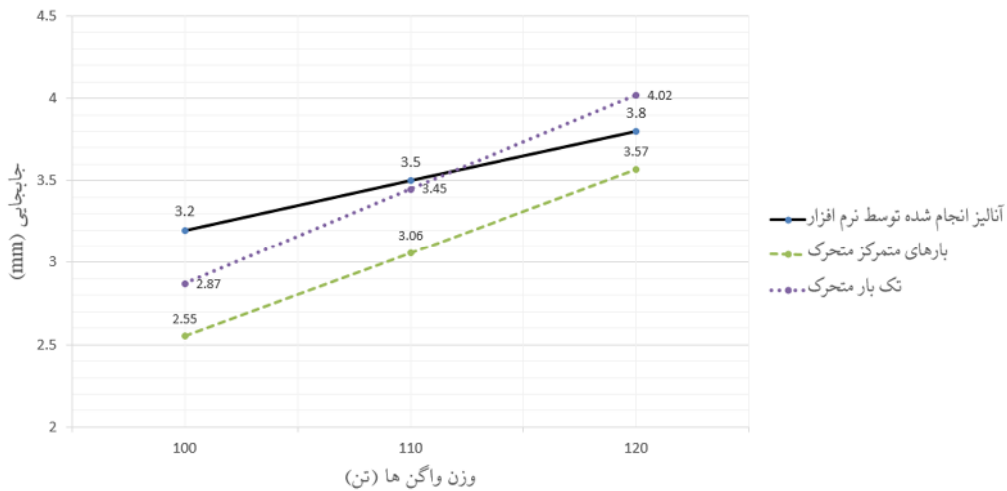


شکل ۶- جابجایی بدست آمده در دو حالت، الف) ۱۶ بخش ۹۰ سانتی‌متری، ب) ۸ بخش ۱۸۰ سانتی‌متری

شبیه سازی عددی سه بعدی تونل‌های کم عمق تحت بار دینامیکی قطار و تعیین روش احداث: ص ۴۹-۶۱



شکل ۷- مقایسه‌ی سه روش تحلیل در سرعت‌های مختلف

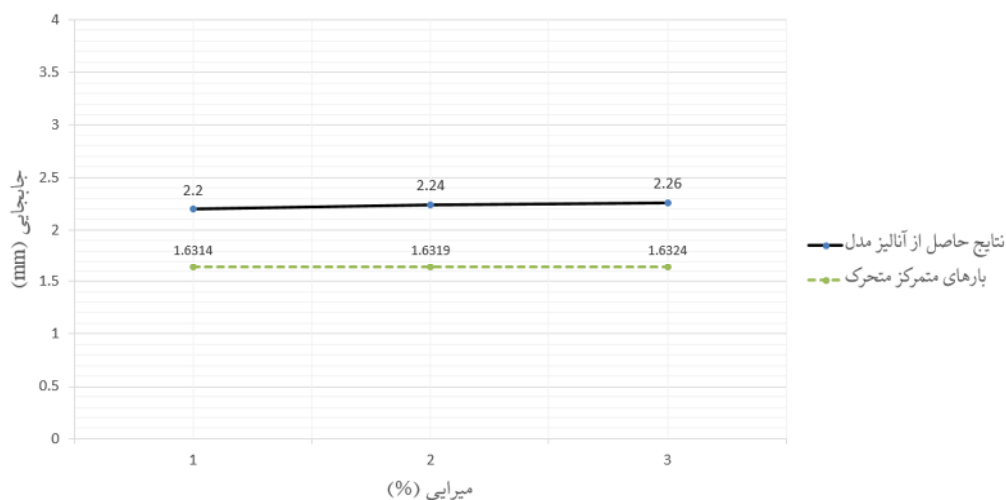


شکل ۸- مقایسه‌ی سه روش تحلیل در وزن‌های مختلف برای واگن

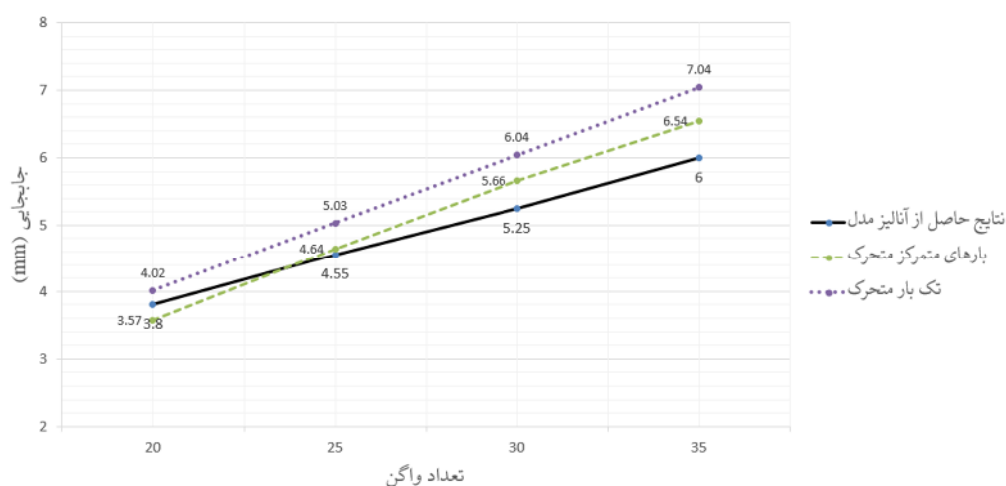
معمولا قطارهای باری دارای حداکثر ۳۵ واگن هستند. از این رو برای بررسی تاثیر تعداد واگن‌ها بر میزان افت پل، قطار در چهار حالت ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ واگنی مدل شده است. با توجه به بیشترین میزان افت به دست آمده در بخش‌های پیشین، سرعت حرکت قطار ۴۰ کیلومتر بر ساعت و وزن واگن‌ها ۱۲۰ تن و همچنین میرایی محیط ۱ درصد در نظر گرفته شده است. شکل ۱۰ نتایج بدست آمده از این تحلیل‌ها را نشان می‌دهد.

از آن جایی که معمولا در مدل سازی‌های دینامیکی، میرایی مدل بین ۱ تا ۳ درصد انتخاب می‌شود، در این بررسی نیز میرایی مدل در سه وضعیت ۱، ۲ و ۳ درصد و از ۱۰ عدد واگن ۱۲۰ تنی با سرعت حرکت ۴۰ کیلومتر بر ساعت مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج این بررسی در شکل ۹ نشان داده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که میرایی محیط تاثیر ناچیزی بر تغییر شکل مدل دارد و با افزایش میرایی، جابجایی عمودی روی وسط دهانه‌ی پل به مقدار اندکی افزایش پیدا می‌کند.





شکل ۹- مقایسه‌ی دو روش تحلیل در میرایی‌های مختلف



شکل ۱۰- مقایسه‌ی سه روش تحلیل برای تعداد واگن‌های مختلف

(Islamic republic of Iran management and planning organization, 2001). در این طرح طول دهانه‌ی پل ۹ متر می‌باشد که بر اساس این آیین‌نامه حداکثر جابجایی برای طرح ۱۴ میلی‌متر تعیین می‌شود. با توجه به رابطه‌ی (۲۵) می‌توان ضریب ایمنی را تعیین کرد.

$$F. S = \frac{\text{تغییر شکل مجاز}}{\text{تغییر شکل بدست آمده از تحلیل‌ها}} \quad (25)$$

بررسی نمودارهای بدست آمده از نتایج تحلیل‌های مختلف تطابق خوبی را با یکدیگر نشان می‌دهند که می‌توان از صحت نتایج بدست آمده از تحلیل‌های مدل اطمینان حاصل

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تعداد واگن‌ها تاثیر زیادی بر میزان جابجایی عمودی وسط دهانه‌ی پل دارد. به دلیل افزایش مدت زمان و تعداد چرخه‌های بارگذاری با افزایش تعداد واگن‌ها، میزان جابجایی بر روی پل نیز افزایش می‌یابد. برای تعیین ضریب ایمنی، باید میزان جابجایی‌های بدست آمده از تحلیل‌ها با حداکثر جابجایی مجاز تعیین شده در آیین‌نامه، مقایسه شود. بر طبق نشریه‌ی شماره‌ی ۱۳۹ آیین‌نامه‌ی بارگذاری پل‌ها، حداکثر تغییر شکل ناشی از بارهای بهره برداری بر روی پل‌های بتنی، یک هزارم طول دهانه‌ی پل به علاوه‌ی ۰/۵ سانتی‌متر است

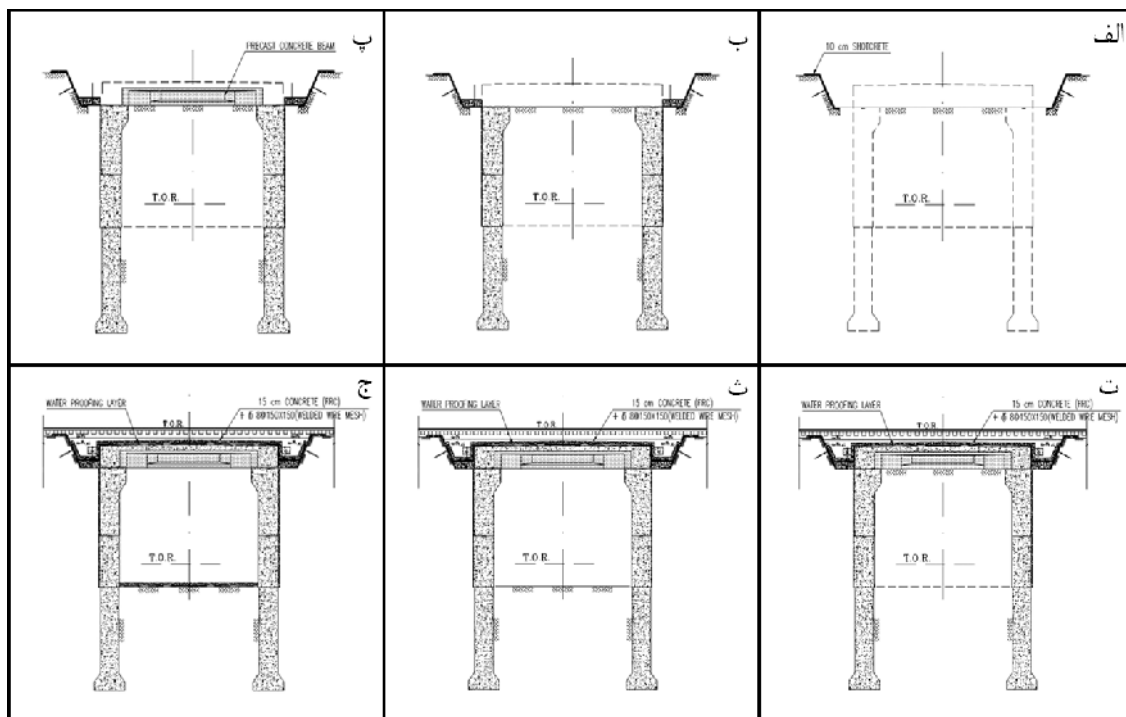
می‌شود و بعد از قرار دادن تیرهای پیش ساخته عرضی و تکمیل قاب‌های سازه‌ای خاکبرداری داخل تونل انجام می‌شود. روش اجرای تونل در این حالت به ترتیب شامل مراحل زیر است:

- ۱- خاکبرداری سطح زمین تا تراز سر شمع‌ها و اجرای پوشش شاتکریت و مش همراه با میلگردکوبی در دیواره و لبه‌ی برم (شکل ۱۱-الف)
- ۲- اجرای شمع‌های کناری و سر شمع‌ها (محل نشیمن تیرهای پیش ساخته) (شکل ۱۱-ب)
- ۳- نصب تیرهای پیش ساخته (شکل ۱۱-پ)
- ۴- بتن ریزی و عایق بندی سقف تونل، اجرای لایه‌ی زهکشی، زیرسازی راه‌آهن و برقراری خطوط راه‌آهن (شکل ۱۱-ت)
- ۵- خاکبرداری داخل تونل (شکل ۱۱-ث)
- ۶- تکمیل دیواره نهایی با قالب‌بندی و بتن‌ریزی به همراه آرماتوربندی و بتن‌ریزی در کف تونل (شکل ۱۱-ج)

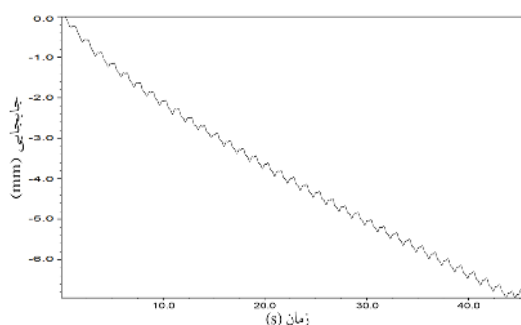
کرد. همچنین در حالتی که برای قطار ۳۵ واگن در نظر گرفته شد، ضریب ایمنی طرح ۲/۳۴ به دست آمد که نشان می‌دهد پایداری طرح در وضعیت مناسبی قرار دارد.

## ۷- روش پیشنهادی ساخت تونل

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته در این تحقیق، روش ارائه شده برای ساخت تونل، ایمنی و پایداری لازم برای اجرای طرح را دارد. اما با توجه به لزوم تسریع در برقراری مجدد خطوط ریلی، نیاز به روشی که از لحاظ فنی و اقتصادی مناسب‌تر باشد احساس می‌شود. برای این منظور روش پوش و کند (*Cover and cut (top down)*) به منظور اجرای طرح پیشنهاد می‌شود. همان گونه که از نام این روش پیداست به طور کلی می‌بایست ابتدا اجرای سقف و پوشاندن آن به طور کامل انجام شود و پس از برگرداندن زمین به حالت اولیه و برقراری ترافیک، اقدام به حفاری زیر سقف گردد (*Ghannad M. H., 2011*) در این روش ابتدا تا تراز سر شمع‌ها حفاری شده سپس شمع‌ها به صورت درجا اجرا



شکل ۱۱- مراحل حفاری تونل در مقطع عرضی به روش پوش و کند



شکل ۱۲- حداکثر تغییر شکل وسط دهانه‌ی پل در تحلیل روش پوش و کند

### ۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با شبیه‌سازی حرکت قطار، به بررسی تاثیر بار دینامیکی بوجود آمده از این حرکت بر روی بخشی از تونل خط ۳ متروی تهران که در تقاطع با خطوط راه‌آهن سراسری تهران-اهواز است، پرداخته شد. نتایج بدست آمده از مدل سازی رایانه‌ای با دو روش تحلیلی مقایسه شدند تا میزان جابجایی عمودی در این بخش از سقف تونل خط ۳ متروی تهران مشخص شود و در نهایت، روشی جهت احداث این بخش از تونل ارائه گردید. با توجه به مطالب بیان شده و تحلیل‌های صورت گرفته، نتایج حاصل از این تحلیل‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

- با افزایش سرعت حرکت وسیله نقلیه، به دلیل کاهش مدت زمان بارگذاری بر روی پل، حداکثر جابجایی وسط دهانه‌ی پل کاهش می‌یابد.

- افزایش وزن واگن‌های قطار، میزان جابجایی وسط دهانه‌ی پل را افزایش می‌دهد.

- با افزایش تعداد واگن‌های عبوری از روی پل، تعداد چرخه‌های بارگذاری و همچنین مدت زمان بارگذاری افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه میزان افت وسط دهانه‌ی پل نیز افزایش می‌یابد.

- به دلیل سرعت کم بارگذاری نسبت به مسائل مربوط به انفجار و زلزله، مقدار میرایی تاثیر چندانی بر میزان افت وسط دهانه‌ی پل ندارد.

- با در نظر گرفتن بحرانی‌ترین شرایط برای قطارهای موجود در خطوط ریلی تهران-اهواز، میزان افت وسط دهانه‌ی پل ۶ میلی متر بدست آمده است و با توجه به آیین‌نامه‌ی

از مزایای این طرح می‌توان به تسریع در برقراری مجدد خطوط راه‌آهن به دلیل اجرای سقف تونل در مراحل ابتدای ساخت اشاره کرد (Brinckerhoff, 2007). به دلیل امکان دسترسی به فضای آزاد در قسمت ابتدای این بخش از تونل، می‌توان مواد خاکبرداری شده از داخل تونل را از این بخش منتقل کرد. همچنین این دسترسی، باعث می‌شود که هنگام حفاری تونل مشکلی از نظر تهویه و تامین روشنایی برای تونل ایجاد نشود. طرح پیشنهادی از لحاظ اقتصادی نیز دارای مزایایی می‌باشد. در این روش نیازی به حفاری مرحله‌ای تونل نیست که باعث عدم نیاز به ساخت شمع‌های موقت جهت نگهداری جبهه کار تونل می‌شود و همچنین در این روش نیاز به اجرای شاتکریت دیواره‌ها، جهت نگهداری موقت دیواره تونل نمی‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده، این پیشنهاد دارای مزایای دیگری نیز می‌باشد که عبارت‌اند از:

- سهولت و سرعت بالا در اجرا
- هزینه پایین
- وقفه‌ی ایجاد شده برای برقراری مجدد ترافیک بر روی سقف تونل تنها در زمان حفاری زمین، نصب سقف و بازسازی سطح جاده اتفاق می‌افتد.
- حفاری تونل بدون وقفه برای نصب سیستم نگهداری انجام می‌شود.
- دیواره‌های بتنی تا حدی از ورود آب به تونل جلوگیری می‌کنند.
- جابجایی افقی قابل توجهی در سازه و شمع‌ها رخ نمی‌دهد. پس از مدل سازی این روش ساخت در نرم افزار و اعمال بار دینامیکی قطاری با ۳۵ واگن به وزن ۱۲۰ تن و با سرعت حرکت ۴۰ کیلومتر بر ساعت بر روی آن، حداکثر جابجایی عمودی در سقف تونل اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۲ نتیجه‌ی این اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. این مقدار تغییر شکل ۶/۹۵ میلی‌متر بدست آمده است که در مقایسه با نتایج بدست آمده از تحلیل مدل قبل (روش کند و پوش) تنها ۰/۹۵ میلی‌متر بیشتر به دست آمده است. با مقایسه‌ی جابجایی به دست آمده و مقدار جابجایی مجاز، میزان ضریب ایمنی برای این طرح ۲/۰۱ حاصل می‌شود که موید پایداری طرح می‌باشد.

شبییه سازی عددی سه بعدی تونل‌های کم عمق تحت بار دینامیکی قطار و تعیین روش احداث: ص ۴۹-۶۱

کند که دارای مزایای فنی و اقتصادی می‌باشد استفاده شود.

### ۹- فهرست نمادها

فهرست نمادها در جدول ۱ آورده شده است.

پل‌های راه‌آهن ضریب ایمنی ۲/۳۴ تعیین می‌شود که این

ضریب ایمنی، پایداری طرح مورد نظر را تایید می‌کند.

- جهت تسریع در برقراری خطوط ریلی راه‌آهن بر روی

تونل پیشنهاد می‌شود برای اجرای این طرح از روش پوش و

جدول ۱- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
سرعت	$m/s$	$v$
طول تیر	$m$	$L$
مدول الاستیسیته	$Pa$	$E$
ممان اینرسی	$m^4$	$I$
زمان	$s$	$t$
فرکانس ویژه متناظر	$Hz$	$\omega_i$
جرم واحد طول	$kg/m$	$M$
فاصله‌ی هر محور بارگذاری از یکدیگر	$m$	$d$
جابجایی قائم تیر در نقطه‌ی $x$ در زمان $t$	$m$	$u(x,t)$
مشتق $u$ نسبت به مختصات $x$	-	$u'$
مشتق $u$ نسبت به زمان	-	$\dot{u}$
میرایی	%	$\xi$
ماتریس میرایی	-	$C$
تابع دلتای دیراک	-	$\delta$
تابع گام واحد	-	$H(t)$
مختصات تعمیم یافته مود $n$ ام	-	$q_n$
فرکانس میرا شده‌ی	$Hz$	$\omega_{dn}$
نیرو	$N$	$F$ و $P$
دوره‌ی تناوب	$s$	$T$

### ۱۰- مراجع

- Fryba L.(2001), «A rough assessment of railway bridges for high speed trains» Engineering Structures 23, 548-556
- Zhang X. (2003), «Evaluation of impact factors for composite concrete–steel cellular straight bridges», Engineering Structures 25, 313-321

- Liu C. (2002), «Analytical dynamic impact study based on correlated road roughness» Computers and Structures 80, 1639-1650
- Cheng Y.S. & Cheng Y.K.(2001), «Vibration of railway bridges under a moving train by using bridge-track- vehicle element» Engineering Structures 23, 1597-1606
- Ju & Lin(2002), «Resonance characteristics of high-speed trains passing simply supported bridges» Journal of Sound and Vibration 267, 1127-1141
- Lou P.(2005), «A vehicle-track-bridge interaction element considering vehicle's pitching effect» Finite Elements in Analysis and Design 41, 397-427
- Rashid S. (2011), «Parametric study of bridge response to high speed trains», Department of civil and architectural engineering, KTH Royal institute of technology, Stockholm, Sweden
- Yang Y. B., Yau J. D. & Wu Y. S. (2006) «Vehicle-Bridge Interaction Dynamics- With Application to High-Speed Railways», World Scientific
- Nejati H.R. (2009), «Dynamic analysis of railway tunnels based on in-situ and laboratory test data», A thesis submitted for the degree of master, Tarbiat Modares University
- Islamic republic of Iran management and planning organization, (2001), Standard load for bridges
- Clough RW, Penzien J. «Dynamics of structures». second ed. New York, NY: McGraw-Hill Book Co.; 1996.
- Ghannad. M. H, Geranmayeh. V. R & Zare. S (2011), «Construction of Cover and Cut Tunnels in Urban Areas Case Study: Tehran-Tabriz Railway Tunnel», first asian and 9th iranian NNELLING symposium
- Brinckerhoff P. (2007), «Tunnels and Underground Stations Technical Memorandum Honolulu High-Capacity Transit Corridor Project» City and County of Honolulu and Federal Transit Administration
- Greifeneder E. (2003), «Comparison of Cut-and-Cover Tunneling Method vs. New Austrian Tunneling Method (NATM) for Urban Tunnels with Shallow Overburden», Technical University of Vienna Faculty of Civil Engineering, Master's Thesis