

## تأثیر فضاهای خالی بالاستی روی پاسخ‌های دینامیکی تراورس‌های بتنی

رضا مؤیدفر\*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

علی منصورخاکی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

ارسلان صالحی کلام، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

حامد معتمدی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۱۲ - پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۰۵

### چکیده

تراورس‌های بتنی در مسیر ریلی روی بالاست و بستر اجرا می‌شوند تا بارهای عبوری چرخ را از ریل‌ها به زمین انتقال دهند. در بسیاری از موارد، بار ضربه‌ای چرخ قطار به علت نامتقارنی سطح تماس باعث ایجاد فضاهای خالی در سطح تماس مشترک بین تراورس و بالاست، در نتیجه کاهش سختی تکیه‌گاه بالاستی می‌شوند. فضاهای خالی بالاستی می‌توانند بر پاسخ‌های ارتعاشی تراورس در محل تأثیر بگذارند. این مقاله تأثیر فضاهای خالی بالاستی بر پاسخ‌های ارتعاشی به دو صورت عددی و مدل‌سازی اجزا المان اریبه می‌دهد تا بررسی اثر الگوهای ضربه‌ای مختلف بین تراورس و بالاست بتواند راهنمایی‌هایی به طراحان خطوط بالاستی در زمینه ترک خوردن تراورس در ارتعاش نزدیک به فرکانس تشدید و عمر و مد شکست تراورس اریبه دهد.

واژه‌های کلیدی: فضاهای خالی بالاستی، ارتعاش آزاد، مدل‌سازی اجزای المان

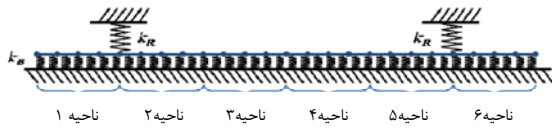
### ۱- مقدمه

تحت اثر الگوهای مختلف سطح تماس بالاست و تراورس در محل مهم می‌کند.

مدل تحلیلی نیلسون و دالبرگ<sup>۱</sup> (Dahlberg and Nielsen, 1991)، توانایی آنالیز کردن رفتار دینامیکی تراورس‌های بتنی را در هر دو وضعیت آزاد-آزاد و در محل را دارد.

گراسی و کاکس<sup>۲</sup> (Grassie and Cox, 1985; Grassie, 1995)، تراورس‌های جزئی تکیه داده شده را به صورت تراورس‌های کاملاً آویخته به ریلی متصل در نظر گرفتند و با یک مدل ریاضی پاسخ‌های دینامیکی تراورس مسیر ریلی را بررسی و پی بردند که تراورس‌های معلق، کرنش‌های دینامیکی بیشتری را نسبت به تراورس‌های کاملاً تکیه داده شده در فرکانس تشدید

مسیر ریلی بالاستی یکی از رایج‌ترین سازه‌های مسیر ریلی می‌باشد که مزیت‌هایی چون توزیع مناسب نیرو، شرایط زهکشی مناسب، کم بودن هزینه ساخت در مقایسه با هزینه‌های تعمیر و نگهداری را دارد (Esveld, 2001). عبور بارهای متناوب غیریکنواخت سنگین، مصالح بالاستی مسیر را تخریب و باعث تشکیل حباب‌ها و فضاهای خالی در سطح تماس تراورس و بالاست در نتیجه کاهش سختی بالاستی می‌شود. نوسانات تشدید نه تنها خود تراورس بلکه نیروهای تماس ریل-چرخ را تحت اثر قرار می‌دهند (Clark et al., 1982; Knothe and Grassie, 1993). در نتیجه تخریب شدن تراورس در ارتعاش نزدیک به فرکانس تشدید، بررسی ارتعاشات طبیعی تراورس را



شکل ۱. مدل سیستم ریل-بالاست

لامپ مطابق فرمول ۱ با استفاده کردن از ماتریس سختی krenk (Krenk, 2001) و ماتریس جرمی (Paz and Leigh, 2003) paz مطابق فرمول ۲ فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مد تراورس را محاسبه کرد.

$$k = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12\psi_1 & -6\psi_3L & -12\psi_2 & -6\psi_4L \\ -6\psi_3L & 4\psi_5L^2 & 6\psi_4L & 2\psi_6L^2 \\ -12\psi_2 & 6\psi_4L & 12\psi_1 & 6\psi_3L \\ -6\psi_4L & 2\psi_6L^2 & 6\psi_3L & 4\psi_5L^2 \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$m = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

ضرایب  $\psi$  از ۱ تا ۶ برابرند با:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \frac{1}{3}(\lambda L)^2 \psi [\sinh(\lambda L) \cosh(\lambda L) + \sin(\lambda L) \cos(\lambda L)] \\ \psi_2 &= \frac{1}{3}(\lambda L)^2 \psi [\sin(\lambda L) \cosh(\lambda L) + \sinh(\lambda L) \cos(\lambda L)] \\ \psi_3 &= \frac{1}{3}(\lambda L) \psi [\sinh^2(\lambda L) + \sin^2(\lambda L)] \\ \psi_4 &= \frac{2}{3}(\lambda L) \psi \sin(\lambda L) \sinh(\lambda L) \\ \psi_5 &= \frac{1}{2} \psi [\sinh(\lambda L) \cosh(\lambda L) - \sin(\lambda L) \cos(\lambda L)] \\ \psi_6 &= \psi [\sin(\lambda L) \cosh(\lambda L) - \sinh(\lambda L) \cos(\lambda L)] \\ \lambda &= \left(\frac{K_b}{4EL}\right)^{1/4} \Psi = \frac{\lambda L}{\sinh^2(\lambda L) - \sin^2(\lambda L)} \end{aligned}$$

$\rho$  چگالی جرم،  $A$  مساحت مقطع عرضی،  $E$  مدول الاستیته،  $I$  ممان اینرسی،  $K_b$  سختی الاستیک فنداسیون،  $L$  طول المان،  $K$  ماتریس سختی سیستم.

## ۲-۲- مطالعه تحلیلی لامپ

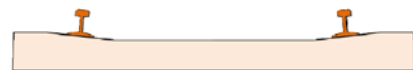
در اندازه‌گیری واقعی، فقط مدهای خمشی اول تا سوم تراورس در محل را با دقت بالا به وسیله آزمایش، چکش ضربه‌ای می‌توان اندازه‌گیری کرد. لامپ با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۱ (Zhai, Wang and Lin, 2004) شکل و فرکانس طبیعی مد اول تا سوم را مطابق شکل ۲ (Lama and Wong, 2011) بررسی کرد.

بحرانی ۷۴۰ هرتز دارند و نیروی تماس دینامیکی چرخ ریل در قسمت فضای خالی شده در حدود ۸۰ درصد بیشتر می‌باشد. پلنج و لامرینگ<sup>۳</sup> (Plenge and Lammering, 2003) تأثیر دو الگوی تماس فضا خالی شده را در یک و دو انتهای تراورس روی پاسخ‌های فرکانسی تراورس و تراورس‌های مجاور بررسی کردند و پی بردند که در تراورس‌های جزئی تکیه داده شده حد مجاز در فرکانس‌های بین ۰ تا ۱۵۰ هرتز افزایش و بیشتر از ۱۵۰ هرتز کاهش می‌یابد. کوماران<sup>۴</sup> (Kumaran, Menon and Vair, 2003)، اثر فضای خالی بالاستی در وسط تراورس را بر روی پاسخ‌های دینامیکی تراورس در محل بررسی و پی برد که لنگر دینامیکی در نشیمنگاه ریلی افزایش و در مرکز تراورس کاهش می‌یابد. گوسلاسون<sup>۵</sup> (Gustavson, 2000) و وینسنت<sup>۶</sup> (Vincent, 2001)، مدل اجزای المان سه بعدی و آزمایش MODAL تراورس‌های بتنی را در وضعیت آزاد-آزاد انجام دادند و مطابقت خوبی بین اطلاعات تجربی و تحلیلی به دست آمد. اطلاعات بسیار اندکی در رابطه با رفتار تراورس در محل تحت تأثیر کاهش سختی تکیه‌گاهی بالاستی در الگوهای تماس مختلف وجود دارد، در حالی که این مسئله از نظر علمی برای مسیر ریلی بسیار مهم می‌باشد. این مقاله با استفاده از مطالعه تحلیلی و اجزای المان، امکان درک بهتر اثرات دینامیکی الگوهای مختلف سطح تماس بالاست و تراورس را بر روی ارتعاش آزاد تراورس در محل ایجاد می‌کند. مدل‌سازی اجزای المان در نرم‌افزار STRAND7 انجام شده و تغییرشکل‌های برشی و اینرسی چرخشی برای المان‌های مدل استفاده می‌شود.

## ۲- آنالیز عددی تراورس بتنی در محل

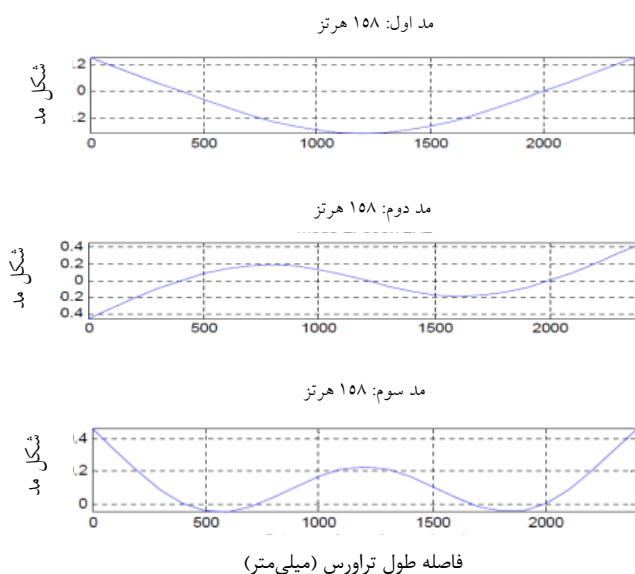
### ۲-۱- مدل کردن سیستم بالاستی تراورس ریلی

لامپ مطابق شکل ۱ (Lama and Wong, 2011) تراورس را به تیر اوپلر با ۲۴ المان مساوی و خرابی ناحیه تماس زیر بالاست را به ۶ ناحیه تقسیم و هر دو ریل را به صورت دو فنر الاستیک با ضریب سختی مدل کرد  $K_f$  و اثر بالاست را با فنداسیون الاستیک با ضریب سختی  $kb$  مدل‌سازی کرد.



جدول ۱. پارامترهای مدل

مقادیر	پارامترهای مدل	مقادیر	پارامترهای مدل
$10^7 \times 7/840$	سختی بالاست $(\frac{N}{M^2})$	۲۴۲۰	طول معادل تراورس، L (میلی متر)
$10^{11} \times 2/059$	سختی ریل $(\frac{N}{M})$	۲۱۰	ارتفاع معادل تراورس، H (میلی متر)
۲۷۵۰	چگالی $\rho$ $(\frac{kg}{m^3})$	۲۸۰	عرض معادل تراورس، B (میلی متر)
		$10^1 \times 4$	مدول الاستیسیته $(\frac{N}{M^2})$



شکل ۲. شکل‌های مد و فرکانس طبیعی پیش‌بینی شده مدل

مطابق با جدول ۳ (Lama and Wong, 2011) خرابی بالاست باعث کاهش فرکانس‌های طبیعی می‌شوند و مدهای مختلف حساسیت‌های مختلفی نسبت به خرابی بالاستی دارند. مطابق شکل ۳ (Lama and Wong, 2011) مدهای محاسبه شده اول تا سوم در هر ۵ حالت خرابی، مد یک حساس‌ترین مد نسبت به خرابی بالاستی می‌باشد.

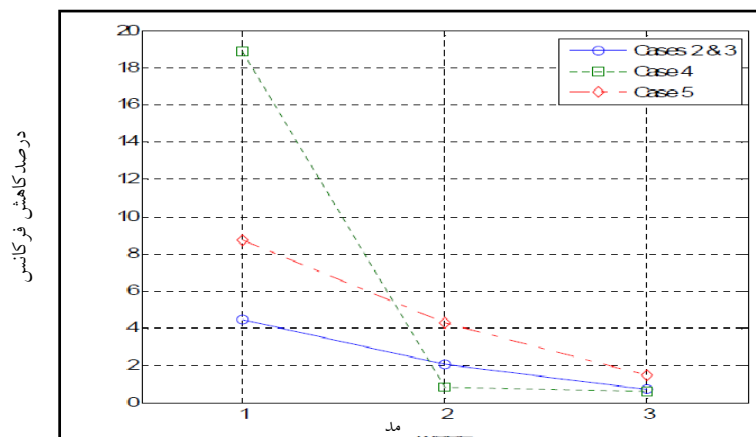
۲-۳- اثرات خرابی بالاست روی تراورس‌ها در محل در مطالعه تحلیلی لامپ مطابق با جدول ۲ (Lama and Wong, 2011)، اثر آسیب بالاست تا ۹۰ درصد کاهش در ضریب سختی در ۵ حالت خرابی بر روی پاسخ‌های تراورس بررسی و میزان کاهش فرکانس‌های طبیعی را برای ۵ حالت مختلف مطابق جدول ۳ (Lama and Wong, 2011) به‌دست آورد.

جدول ۵.۲. حالت خرابی تراورس

کاهش درصد در سختی						محل خرابی	حالت
ناحیه ۶	ناحیه ۵	ناحیه ۴	ناحیه ۳	ناحیه ۲	ناحیه ۱		
۰	۰	۰	۰	۰	۰	بدون خرابی	۱
۰	۰	۰	۰	٪۹۰	٪۹۰	در انتهای راست تراورس	۲
٪۹۰	٪۹۰	۰	۰	۰	۰	در انتهای چپ تراورس	۳
۰	۰	٪۹۰	٪۹۰	۰	۰	در وسط تراورس	۴
٪۹۰	٪۹۰	۰	۰	٪۹۰	۹۰	در دو انتهای تراورس	۵

جدول ۳. فرکانس طبیعی مد اول تا سوم ۵ حالت

مد سوم	مد دوم	مد اول	حالت
۵۱۷/۱۱	۳۳۸/۷۲	۱۵۸/۸۲	۱
(درصد ۰/۷۳) ۵۱۳/۳۱	(درصد ۲/۱) ۳۳۱/۵۹	(درصد ۴/۴۵) ۱۵۱/۷۶	۲
(درصد ۰/۷۳) ۵۱۳/۳۱	(درصد ۲/۱) ۳۳۱/۵۹	(درصد ۴/۴۵) ۱۵۱/۷۶	۳
(درصد ۰/۶۴) ۵۱۳/۸۱	(درصد ۰/۸۶) ۳۳۵/۸۱	(درصد ۱۸/۸۴) ۱۲۸/۹	۴
(درصد ۱/۵) ۵۰۹/۳۴	(درصد ۴/۲۷) ۳۲۴/۲۶	(درصد ۸/۷۲) ۱۴۴/۹۷	۵



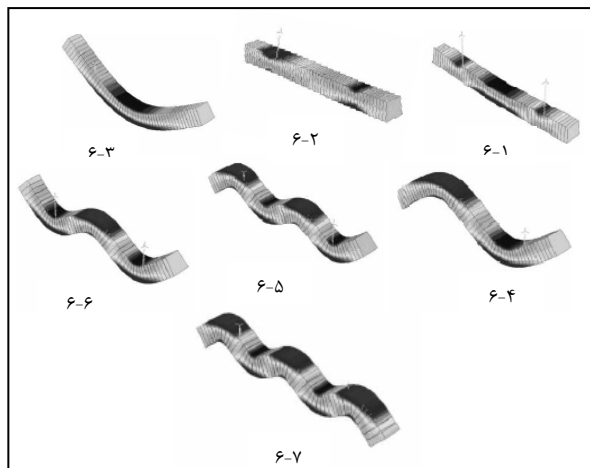
شکل ۳. درصد کاهش فرکانس طبیعی الگوهای خرابی

2000; Vincent, 2001; Lama and Wong, 2011; Krenk, 2001; Paz and Leigh, 2003; Zhai, Wang and Lin, 2004; G+D Computing, 2002)

فرکانس‌های طبیعی تراورس مطابق شکل ۴ در دو حالت آزاد-آزاد و در محل در مقایسه با حل‌های تحلیلی بررسی شده است (Dahlberg and Nielsen, 1991; Grassie and Cox, 1985; Grassie, 1995; Plenge and Lammering, 2003;

### ۳- مدل‌سازی اجزای المان

کاوونرون و رمینیکو<sup>۷</sup> تراورس را با ۵۰ المان تیر تیموشینکو با سطح مقطع دوزنقه‌ای و تکیه‌گاه‌های بالاستی و بالشتک پلاستیکی و ریل به صورت المان‌های فنر در نرم‌افزار STRAND7 مدل‌سازی کردند (Grassie, 1995; Plenge and Lammering, 2003; Kumaran, Menon and Nair, 2003; Gustavson,



شکل ۶. شکل‌های مد تراورس بدون خرابی در محل:

۱-۶: جابه‌جایی، ۲-۶: پیچشی، ۳-۶: نخستین مد، ۴-۶: دومین مد، ۵-۶: سومین مد، ۶-۶: چهارمین مد، ۷-۶: پنجمین مد

۳-۱- فرمول‌نویسی تحلیلی

طراحی تیرها روی بستر ارتجاعی در چندین کتاب بررسی شده است (Hetenyi, 1976; Iyengar, 1979) معادلات حرکت برای نوسان آزاد تراورس در محل را می‌توان به صورت زیر نوشت (Cai, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} KAG \left[ (\psi(x, t)) - \frac{\partial z(x, t)}{\partial x} \right] + m_s \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2} + c_b \frac{\partial z(x, t)}{\partial x^2} + k_b z(x, t) = \vec{F}(x, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} EI \left( \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} \right) - KAG \left[ (\psi(x, t)) - \frac{\partial z(x, t)}{\partial x} \right] - M_S R_S^2 \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{F}(x, t) = \sum_{i=1}^2 \{ K_{pt} [w(x_t, t) - z(x_t, t)] + C_{pi} [\dot{w}(x_t, t) - \dot{z}(x_t, t)] \} \quad (3)$$

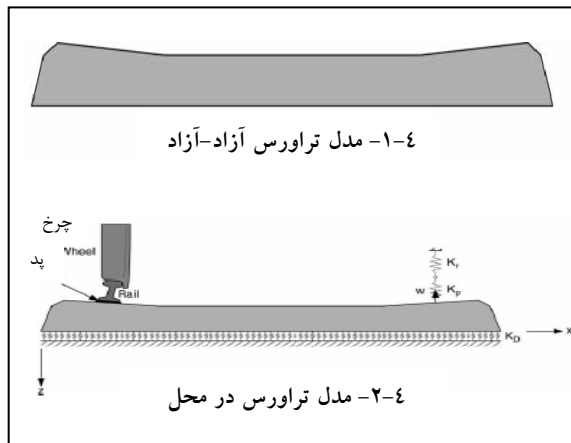
$$K_e = \frac{K_r K_p}{K_r + K_p} \quad (4)$$

$$KGA = \sqrt{(KGA_r)(KGA_c)} \quad (5)$$

$$EI = \sqrt{(EI_r)(EI_c)} \quad (6)$$

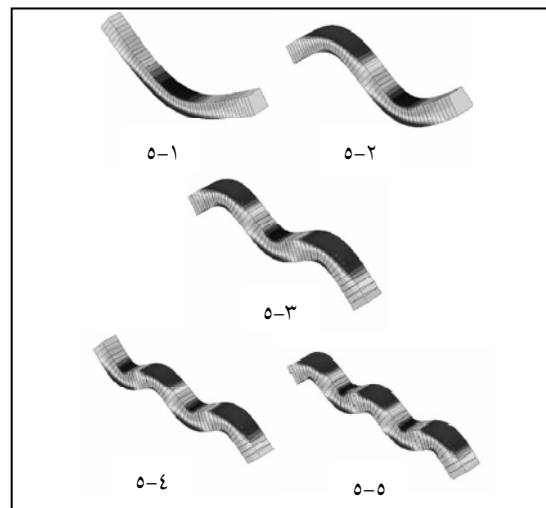
$k_b$ : سختی تکیه‌گاه بالاستی،  $c_b$ : میرایی تکیه‌گاه بالاستی،  $K_p$ : سختی بالشتک پلاستیکی،  $C_p$ : میرایی بالشتک پلاستیکی،  $z(x, t)$ : تغییر شکل عمودی تراورس،  $\psi(x, t)$ : زاویه پیچشی تراورس،  $EI$ : صلبیت خمشی،  $KAG$ : صلبیت پیچش برشی،  $M_S$ : جرم تراورس در واحد طول،  $R_S$ : شعاع زیراسیون مقطع عرضی

Kumaran, Menon and Nair, 2003; Gustavson, 2000; Vincent, 2001; Lama and Wong, 2011; Krenk, 2001; Paz and Leigh, 2003; Zhai, Wang and Lin, 2004; G+D Computing, 2002; Kaewunruen and Remennikov, 2006)



شکل ۴. انواع مدل‌سازی فرکانس‌های طبیعی تراورس

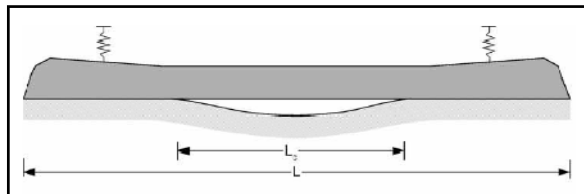
شکل ۵ و ۶ (Kaewunruen and Remennikov, 2007) نشان می‌دهد: ارتعاشی تراورس بدون خرابی را دو حالت آزاد-آزاد و در محل



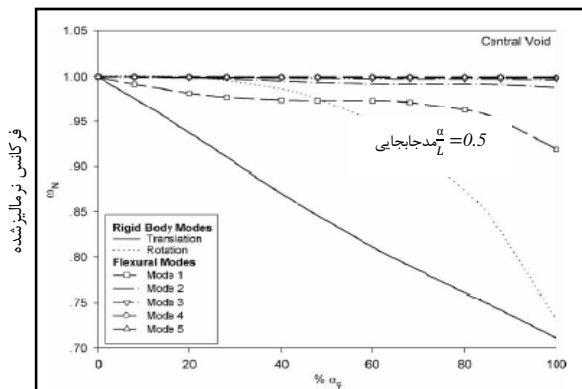
شکل ۵. شکل‌های مد تراورس آزاد-آزاد:

۱-۵: نخستین مد، ۲-۵: دومین مد، ۳-۵: سومین مد، ۴-۵: چهارمین مد، ۵-۵: پنجمین مد

جابه‌جایی تا ۴۲ درصد افزایش فرکانس و سپس کاهش فرکانس در این نقطه اتفاق می‌افتد.

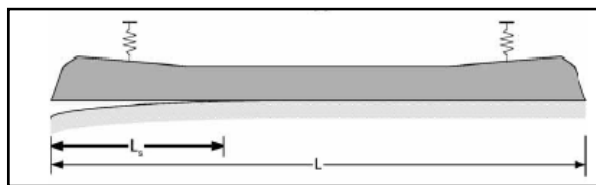


شکل ۷-۱. تماس خرابی حفره مرکزی

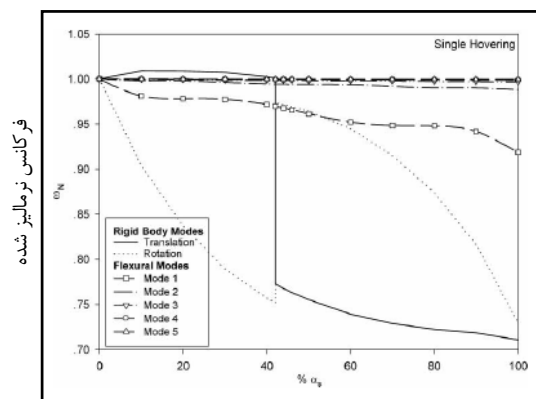


درصد افزایش حفره ها

شکل ۷-۲. اثر حفره‌های مرکزی در فرکانس‌های طبیعی



شکل ۸-۱. الگوی تماس خرابی آویختگی منفرد



درصد افزایش حفره ها

شکل ۸-۲. اثر حفره‌های آویختگی منفرد در فرکانس‌های طبیعی

افزایش جرم آویزان گوشه تراورس، وضعیت استاتیکی ناپایدار جدیدی شکل می‌گیرد. مطابق شکل ۹ (Kaewunruen

تراورس،  $EI_c$ : صلبیت خمشی تراورس در مرکز،  $EI_r$ : صلبیت خمشی تراورس در نشیمنگاه ریلی،  $KGA_c$ : صلبیت پیچش برشی در مرکز،  $KGA_r$ : صلبیت پیچش برشی در نشیمنگاه ریلی،  $K_e$ : سختی مؤثر.

### ۳-۲- الگوهای تماسی بالاست دیده و تراورس

اثر خرابی بالاست بر روی پاسخ‌های دینامیکی تراورس را در ۵ الگوی خرابی تماس بین بالاست و تراورس می‌توان بررسی کرد و در تمام حالات جهت بررسی رفتار دینامیکی تراورس‌ها، فرکانس نرمالیز شده  $W_N = \frac{W_{Voided}}{W_{Ideal}}$  را به صورت فرکانس تراورس در تماس خرابی بالاست به تماس ایده‌آل بررسی شد.

### ۳-۲-۱- الگوی تماس خرابی حفره مرکزی

مطابق شکل ۷-۱ (Kaewunrnen and Remennikov, 2007) حفره‌ای در مرکز تراورس به صورت متقارن شکل می‌گیرد. اثر پارامتر بدون بعد  $\alpha_c = \frac{L_c}{L}$  که نسبت طول حفره مرکزی به طول تراورس می‌باشد را بر فرکانس‌های تمام مدها بررسی و مطابق شکل ۷-۲ (Kaewunrnen and Remennikov, 2007) با افزایش حفره‌ها، ۲۵ تا ۳۰ درصد کاهش فرکانس برای جابه‌جایی و چرخش و سایر مدهای خمشی تغییر ناچیزی دارند. در حفره‌های بین ۰ تا ۳۰ درصد به دلیل این است که اینرسی چرخشی نمی‌تواند به صورت مؤثری رفتار تراورس را تحت تأثیر قرار دهد. در فرکانس‌های چرخش تغییر چندانی به وجود نمی‌آید.

### ۳-۲-۲- الگوی تماس خرابی آویختگی منفرد

مطابق شکل ۸-۱ (Kaewunrnen and Remennikov, 2007) وضعیت آویختگی به صورت نامتقارن در یکی از دو انتهای تراورس شکل می‌گیرد و اثر پارامتر بدون بعد  $\alpha_s = \frac{L_s}{L}$  که نسبت طول حفره منفرد به طول تراورس می‌باشد را روی فرکانس‌های تمام مدها بررسی و مطابق شکل ۸-۲ (Kaewunrnen and Remennikov, 2007) پی برده شد که با افزایش حفره‌ها تا حدود ۴۲ درصد فرکانس مد چرخشی کاهش و سپس رفتار مد چرخشی افزایش می‌یابد و برای مد

۳-۲-۳- آویختگی دو طرفه

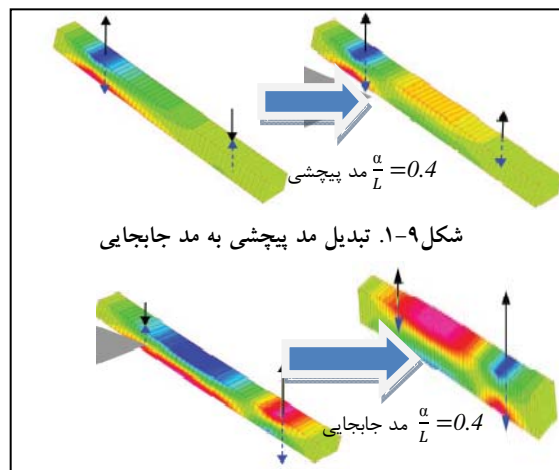
مطابق شکل ۱۰ (Kaewunnen and Remennikov, 2007) تماس بالاست فقط در بخش میانی تراورس باقی می‌ماند و دو حفره در طرفین تراورس گسترش می‌یابد و اثر دو پارامتر بدون بعد  $\alpha_d = \frac{L_{dl}}{L} \beta_d = \frac{L_{dR}}{L}$  بعد حالت متقارن و غیرمتقارن بررسی می‌شود.



شکل ۱۰. الگوی تماس خرابی آویختگی دو طرفه

مطابق شکل ۱۱-۱، در حالت متقارن حفره‌ها، میزان کاهش فرکانس برای مد چرخشی در اندازه حفرات کم تا متوسط نسبت به سایر مدها بیشتر می‌باشد (Kaewunnen and Remennikov, 2007). مطابق شکل ۱۱-۱ در یک انتها، اندازه حفره‌ها در هر حالت تغییر می‌کند، در حالی که در انتهای دیگر ثابت نگه داشته می‌شود. شکل ۱۱-۲ برای  $B_d=10$  درصد و شکل ۱۱-۳ برای  $B_d=30$  درصد و شکل ۱۱-۴ برای  $B_d=20$  درصد و شکل ۱۱-۵، برای  $B_d=40$  درصد می‌باشد (Kaewunnen and Remennikov, 2007).

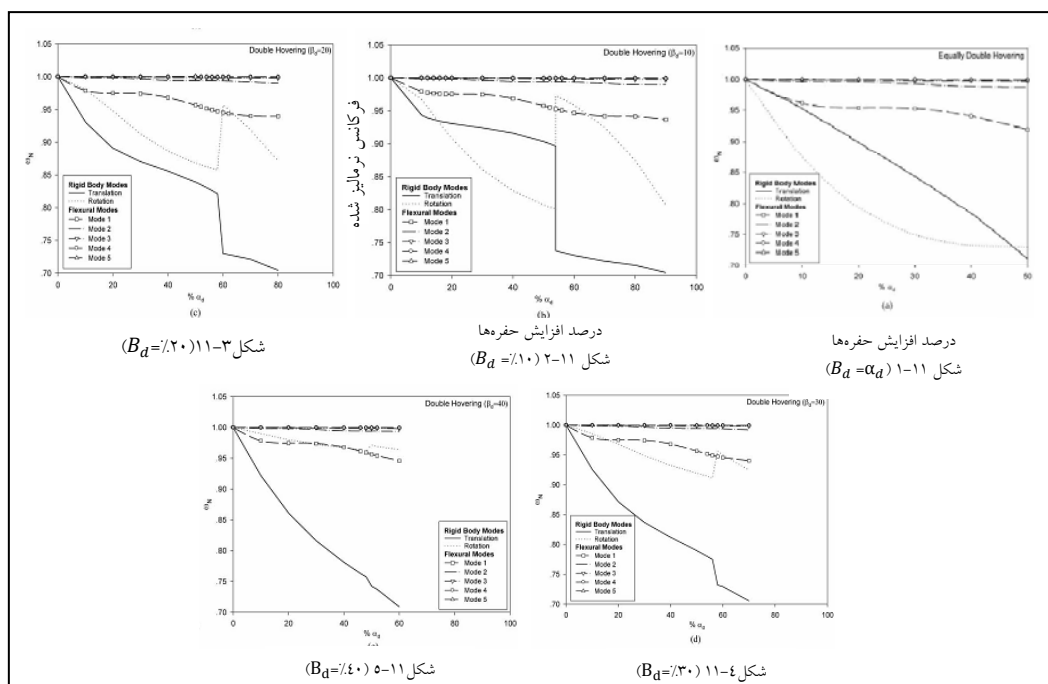
(and Remennikov, 2009) کمترین مقدار مد پیچشی به طور ناگهانی به مد جابه‌جایی تبدیل می‌شود و از طرفی چون مد جابه‌جایی اکثراً به جابه‌جایی مجاز فنرها در نشیمنگاه ریلی بستگی دارد، کمترین مقدار مد جابه‌جایی به مد پیچشی تبدیل می‌شود و مد جابه‌جایی و پیچشی رفتاری غیرخطی پیدا می‌کنند (Kaewunruen and Remennikov, 2009).



شکل ۹-۱. تبدیل مد پیچشی به مد جابه‌جایی

شکل ۹-۲. تبدیل مد جابه‌جایی به مد پیچشی

شکل ۹. انتقال شکل‌های مد پیچشی و جابه‌جایی در حفره‌های ۴۲ درصد به ۵۲ درصد



شکل ۱۱-۳ ( $B_d=20$ )

شکل ۱۱-۲ ( $B_d=10$ ) درصد افزایش حفره‌ها

شکل ۱۱-۱ ( $B_d = \alpha_d$ ) درصد افزایش حفره‌ها

شکل ۱۱-۵ ( $B_d=40$ )

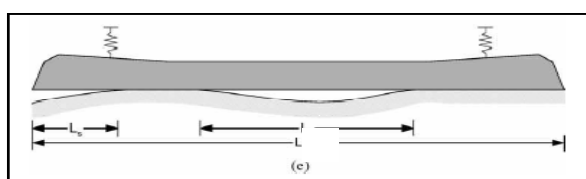
شکل ۱۱-۴ ( $B_d=30$ )

شکل ۱۱. اثر حفره‌های آویختگی دو طرفه در فرکانس‌های طبیعی

فرکانس نرمالیز شده تمایل به کاهش و مد خمشی اول در میزان حفره‌های متوسط و زیاد ثابت می‌ماند ولی سایر مدهای خمشی تمایل به کاهش دارند. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در این الگوی تماس خرابی متقارن رفتار دینامیکی تراورس به خاطر نقص تمایل به کاهش دارد ولی با افزایش اندازه حفرات و یا به عبارتی کاهش سختی تکیه گاهی این تمایل کمتر می‌شود.

۳-۲-۵- حفرات گوشه‌ای و مرکزی

مطابق شکل ۱۴ حفره‌هایی در لبه و مرکز تراورس در یک زمان شکل می‌گیرد و اثر دو پارامتر بدون بعد  $\alpha_{s-c}$  و  $B_{s-c}$  بر فرکانس‌های تمام مدها بررسی می‌شود.



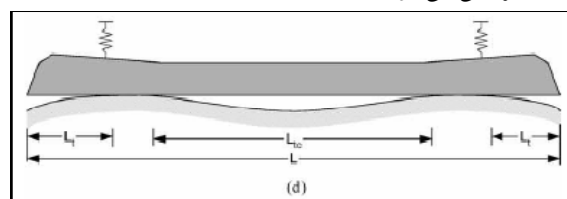
شکل ۱۴. اثر حفره‌های گوشه‌ای و مرکزی در فرکانس‌های طبیعی

مطابق شکل ۱۵ تا ۱۵-۵ می‌توان پی برد که میزان نرم‌شدگی دینامیکی در مد چرخشی با افزایش درصد حفره‌های  $B_{s-c}$  بیشتر از مد جابه‌جایی است و افزایش درصد حفره‌های  $B_{s-c}$  باعث کاهش اغلب مدهای خمشی می‌شود.

وقتی  $\alpha_d$  بین ۵۰ و ۶۰ درصد تغییر می‌کند، در اثر جرم آویختگی بیش از اندازه، ساختار استاتیکی ناپایدار جدیدی شکل می‌گیرد که باعث رفتاری غیر عادی و پایپای بین مدهای جابه‌جایی و چرخشی می‌شود. با افزایش  $\beta_d$  به علت پایدارتر شدن سیستم، این ناپایداری کمتر می‌شود.

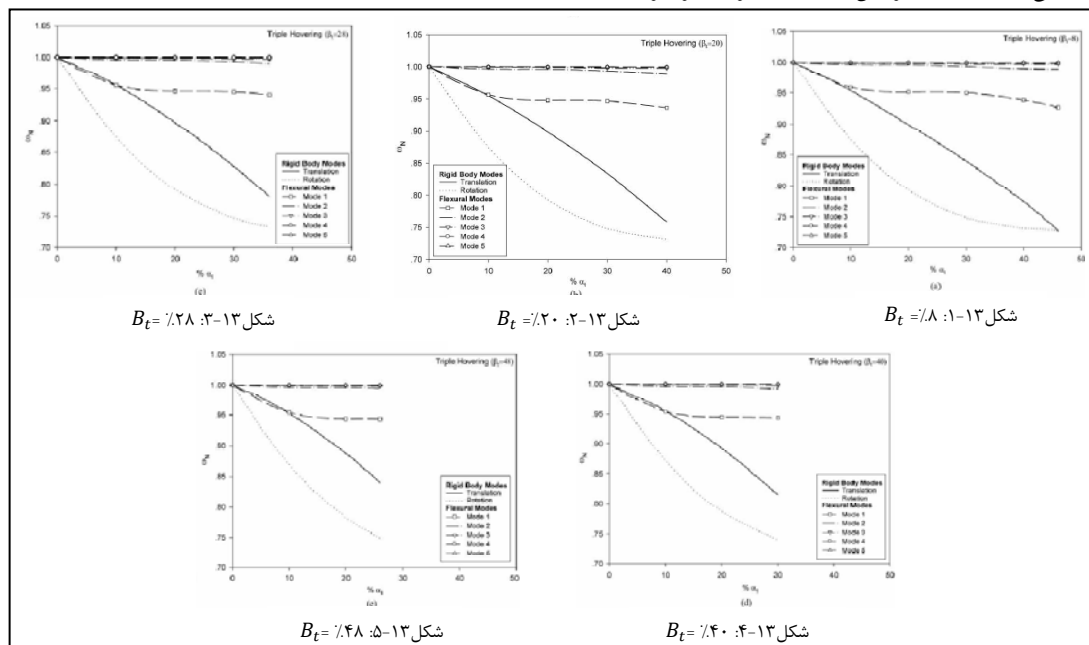
۳-۲-۴- آویختگی سه‌گانه

(مطابق شکل ۱۲، Kaewunrnen and Remennikov, 2007) دو حفره در دو انتهای تراورس و حفره‌ای در مرکز تراورس گسترش می‌یابد و اثر دو پارامتر بدون بعد  $\alpha_t = \frac{L_t}{L}$  و  $\beta_t = \frac{L_{tc}}{L}$  روی پاسخ‌های دینامیکی تراورس فقط در حالت متقارن بررسی می‌شود.



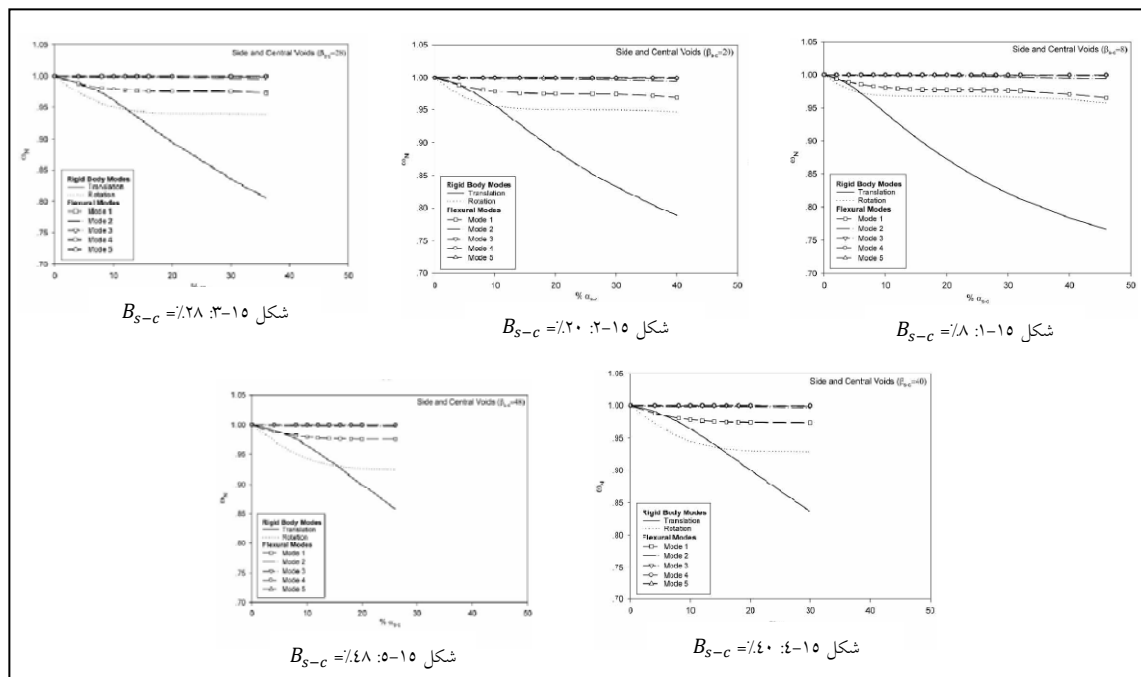
شکل ۱۲. الگوی تماس خرابی آویختگی سه‌گانه

(مطابق شکل ۱۳ تا ۱۳-۵، Kaewunrnen and Remennikov, 2007) همان‌طور که در تمام موارد قابل مشاهده است میزان کاهش فرکانس دینامیکی مد چرخشی بیشتر از مد جابه‌جایی است و با افزایش اندازه حفرات مرکزی،  $\beta_t$



شکل ۱۳. اثر حفره‌های آویختگی سه‌گانه در فرکانس‌های طبیعی





شکل ۱۵. اثر حفره‌های آویختگی سه گانه در فرکانس‌های طبیعی

سیستم مسیر یا از تراورس بتنی تخریب شده تأثیر قابل توجهی در پاسخهای دینامیکی مسیر کلی ندارند اما ممکن منجر به ناپایداری نقص دینامیکی مسیر شود.

۵- پی‌نوشت‌ها

1. Dahlberg and Nielsen
2. Grassie and Cox
3. Plenge and Lammering
4. Kumaran
5. Gustavson
6. Vincent
7. Kaewunruen and Remennikov

۶- مراجع

- Cai, Z. (1992) "Modelling of rail track dynamics and wheel/rail interaction". Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Queen's University, Ontario, Canada, 1992.
- Clark, R. A., Dean, P. A., Elkins, J. A., and Newton, S. G. (1982) "An investigation into the dynamic effects of railway vehicles running on corrugated rails". J. Mech. Eng. Sci., 1982, 24, pp, 65-76.

۴- نتیجه‌گیری

به طور کلی تماس بین تراورس‌های بتنی در محل و مسیر بالاستی ایده‌آل فرض می‌شود اما در برخی موارد مشکلاتی در تراورس یا سیستم مسیر می‌تواند باعث از بین بردن شرایط ایده‌آل و تشکیل حفره‌ها و فضاهای خالی در بالاست و در نتیجه کاهش سختی تکیه‌گاهی بالاست در تماس با تراورس شود. این مقاله حالات مختلف اثر خرابی‌های بالاستی را به صورت عددی و اجزای المان بر روی پاسخهای فرکانسی مدهای جابه‌جایی و پیچشی و خمشی تراورس در محل ارایه می‌دهد.

به طور خلاصه می‌توان بیان کرد که برای الگوهای تماسی متقارن افزایش اندازه حفرات نقش بسزایی در کاهش فرکانس‌های چرخشی و جابه‌جایی دارد و در مدهای خمشی، بر روی مداول خمشی تأثیر می‌گذارند و بر روی سایر مدهای خمشی تأثیر بسزایی ندارد. اثرات شرایط مرزی نامتقارن در ناپایداری دینامیکی در مد جابه‌جایی و چرخشی قابل مشاهده است که به دلیل تأثیر ناشی از عیوب تکیه‌گاه بالاستی باید توجه بیشتری شود. تکیه‌گاه بالاستی تخریب شده نقشی اساسی در در پاسخ تشدید ایفا می‌کند و باعث افزایش تخریب اجزای مسیر و ترک در تراورس‌ها می‌شود، در حالی که مدهای جسم صلب از

- Knothe, K. and Grassie, S. L. (1993) "Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies". *Veh. Syst. Dyn.*, 1993, 22, pp. 209–262.
- Krenk, S. (2001) "Mechanics and analysis of beams, columns and cables – a modern introduction to the classic theories", Second Edition, Springer, (2001).
- Kumaran, G., Menon, D. and Nair, K. K. (2003) "Dynamic studies of rail track sleepers in a track structure system". *J. Sound Vibr.*, 2003, 268, pp. 485–501.
- Paz, M. and Leigh, W. (2003) "Structural dynamics: theory and computation", Fifth Edition, Springer.
- Plenge, M. and Lammering, R. (2003) "The dynamics of railway track and subgrade with respect to deteriorated sleeper support". In *System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade* (Eds K. Popp and W. Schiehlen), 2003, pp. 295–314 (Springer Verlag, Berlin, Germany).
- Kaewunruen, S. and Remennikov, A. M. (2009) "Application of vibration measurements and finite element model updating for structural health monitoring of ballasted rail track sleepers with voids and pockets". University of Wollongong Research Online, 2009.
- Kaewunruen, S. and Remennikov, A. M. (2007) "Investigation of free vibrations of voided concrete sleepers in railway track system. *Proc. IMechE Vol. 221 Part F: J. Rail and Rapid Transit.* 2007. pp. 495-508.
- Vincent, G. (2001) "Modal analysis and numerical modeling of a concrete railway sleepers". M. Eng. Thesis, Dept of StructEng, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2001.
- Zhai, W. M., Wang, K. Y. and Lin, J. H. (2004) "Modelling and experiment of railway ballast vibration", *Journal of Sound and Vibration* (2004), 270(9): pp. 673-683.
- Dahlberg, T. and Nielsen, J. (1991) "Dynamic behavior of free-free and in-situ concrete railway sleepers". In *Proceedings of the International Symposium on Precast Concrete Railway Sleepers*, Madrid, Spain, 1991.
- Esveld, C. "Modern railway track". MRT Press, altbomme, The Netherlands. (2001)
- G+D Computing. Using STRAND7 introduction to the Strand7 finite element analysis system, G+D Computing Pty Ltd, 2002.
- Grassie, S. L. and Cox, S. J (1985). "The dynamic response of railway track with unsupported sleepers. *Proc. Instn Mech*". *Engrs, Part D: J. Automobile Engineering*, 1985, 199 (D2), pp.123–135.
- Grassie, S. L. Dynamic modelling of concrete railway sleepers. *J. Sound Vibr.*, 1995, 187, pp. 799–813.
- Gustavson R, "Static and dynamic finite element analyses of concrete sleepers". Licentiate Eng. Thesis, Dept of Struct Eng, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2000.
- Lama, H.F. and Wong, M.T. (2011) "Railway Ballast Diagnose through Impact Hammer Test". *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, 2011, pp. 185-194.
- Hetenyi, K. (1976) "Beams on elastic foundation: theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering, 1976 (University of Michigan Press, Michigan, USA).
- Iyengar, K. T. S. R. and Ramu, S. A. (1979) "Design tables for beams on elastic foundations and related structural problems", 1979 (Applied Science Publishers Ltd, London, UK).
- Kaewunruen, S. and Remennikov, A. M. (2006) "Sensitivity analysis of free vibration characteristics of an in-situ railway concrete sleeper to variations of rail pad parameters". *J. Sound Vibr.* 2006, 298, pp. 453–461.

## Influence of Ballast Voids on Dynamic Responses of Concrete Sleepers

R. Moayedfar, Assistant Professor, Department of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

A. Mansour Khaki, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

A. Salehi Kalam, M.Sc. Student, Islamic Azad University, South Branch, Tehran, Iran.

H. Motamedi, M.Sc. Grad., Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.

E-mail: r-moayedfar@araku.ac.ir

Received: October 2013 - Accepted: February 2014

### ABSTRACT

The concrete sleeper that is one of the major part of ballast railway tracks are installed on ballast and subgrade to transfer any train wheel loads to the ground support subgrade in operation period that a wide range of loading conditions has been observed. In most of the cases, train wheel impact loads due to asymmetrical cause voids and pockets in contact interface of sleeper and ballast. When the ballast was damaged, the stiffness in ballast supporting of the sleeper will reduce. Voids of ballast can effects in-suit sleeper vibration responses. In order to analyses finite-element can model free – free and in suit sleeper with using 50 Timoshenko beam elements with a trapezoidal cross-section while the rail pads and the ballast system were modeled using a spring damper element and the elastic beam support feature in STRAND7, according to fig.1.

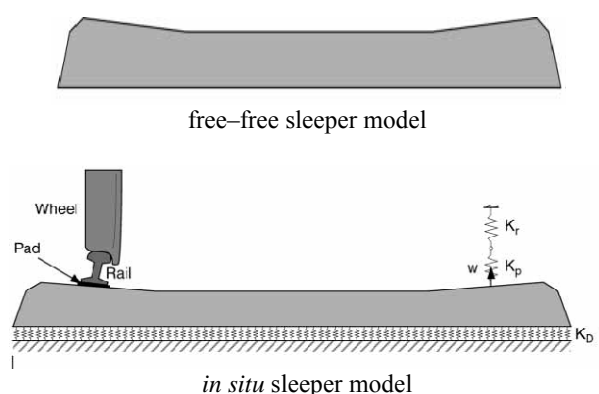
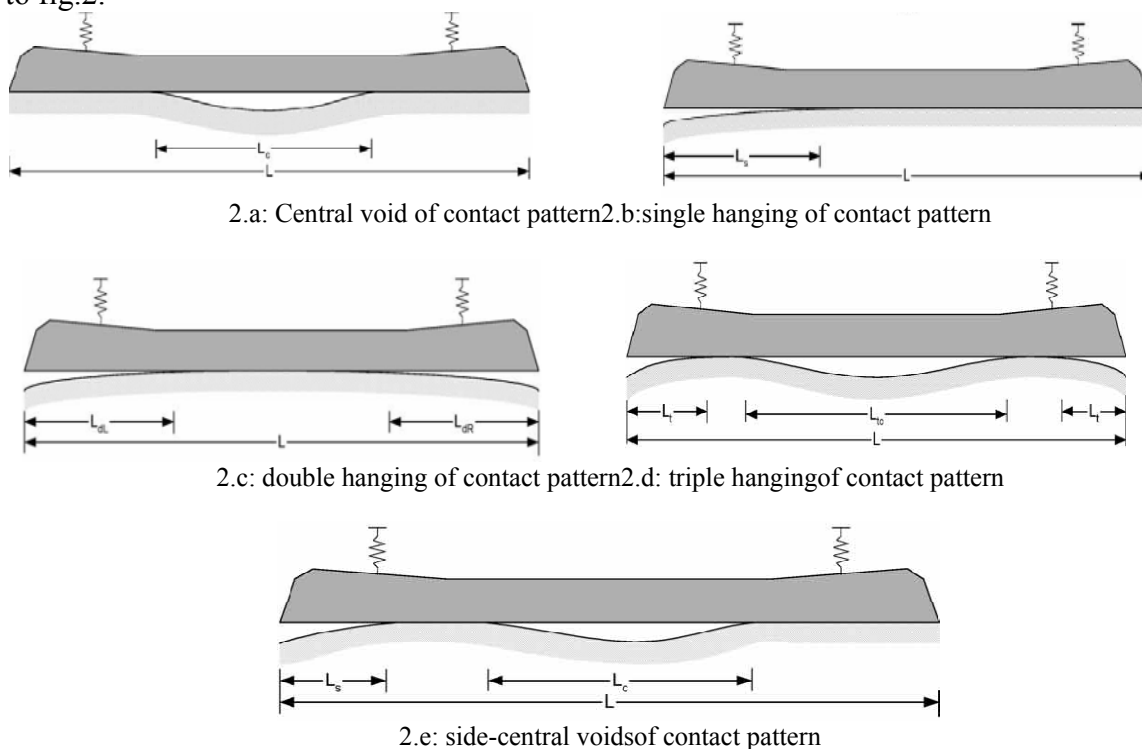


Fig. 1: Typical models of railway concrete sleepers

The damage of sleeper and ballast contact can consider five different patterns, central void, single hanging, double hanging, triple hanging, and side – central voids illustrated according to fig.2.



**Fig. 2:**Sleeper/ballast contact patterns

Based on any sleeper and ballast contact can use following non – dimensional parameters that refers voided concrete sleepers in railway track system and effect of non – dimensional parameters analysis in finite – element model. Effect of those non – dimensional parameters analysis in any different contact pattern on the dynamic responses of sleeper, flexural modes and rigid body modes: translation and rotation. In Central void of contact pattern refers  $\alpha_c = \frac{L_c}{L}$  as ratio central void length to the sleeper length, in single hanging of contact pattern refers  $\alpha_s = \frac{L_s}{L}$  as the ratio of the single-side void length to the sleeper length, in double hanging of contact pattern refers  $\alpha_d = \frac{L_{dL}}{L}$  as,  $\beta_d = \frac{L_{dR}}{L}$ , in triple hanging of contact pattern refers  $\alpha_t = \frac{L_t}{L}$ ,  $\beta_t = \frac{L_{tc}}{L}$ , and in side-central voids of contact pattern refers  $B_{s-c} = \frac{L_c}{L}$ ,  $\alpha_{s-c} = \frac{L_{s-c}}{L}$ . In all of the patterns In order to analysis the dynamic behavior of sleeper refers the normalized frequency,  $W_N = \frac{W_{Voided}}{W_{Ideal}}$  as a ratio between the deteriorated sleeper's frequency  $W_{Voided}$  and the frequency of the in situ sleepers  $W_{Ideal}$  in the ideal contact condition. In order to analysis free vibrations of in suit sleeper model employed the following equations:

$$\frac{\partial}{\partial x} KAG \left[ (\psi(x, t)) - \frac{\partial z(x, t)}{\partial x} \right] + m_s \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2} + c_b \frac{\partial z(x, t)}{\partial x^2} + k_b z(x, t) = \bar{F}(x, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} EI \left( \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} \right) - KAG \left[ (\psi(x, t)) - \frac{\partial z(x, t)}{\partial x} \right] - M_s R_s^2 \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} = 0$$

$$\vec{F}(x, t) = \sum_{i=1}^2 \{ K_{pt} [w(x_t, t) - z(x_t, t)] + C_{pi} [\dot{w}(x_t, t) - \dot{z}(x_t, t)] \} \delta x_i$$

$$K_e = \frac{K_r K_p}{K_r + K_p} \quad \left| \quad KGA = \sqrt{(KGA_r)(KGA_c)} \quad \right| \quad EI = \sqrt{(EI_r)(EI_c)}$$

$k_b$  and  $c_b$  : the stiffness and damping constant of ballast support system;  $K_p$  and  $C_p$  : the stiffness and damping constant of railpads;  $z(x, t)$  : vertical deflection of sleeper;  $\psi(x, t)$  : the rotation angle of sleeper about neutral axis;  $EI$  : the effective sleeper flexural rigidity;  $KGA$  : the effective sleeper shear distortion rigidity;  $M_s$  : the sleeper mass per unit length;  $R_s$  : the radius of gyration of sleeper cross-section.  $EI_c$  and  $EI_r$  : sleeper flexural rigidity at centre, and at rail seats,  $\kappa GA_c$  and  $\kappa GA_r$  : the sleeper shear distortion rigidity at centre and at rail seats.

Voided ballast supporting affects free vibrations frequencies of the in suit sleepers and cause increasing damage of track element and crack in sleeper. Flexural vibration of damaged sleeper affects not as substantial as on the rigid body vibrations, but in result of track dynamic instability. Results of analyses free vibrations of sleepers of finite – element formation shows that symmetrical contact pattern decrease rotation, translation, first flexural mode, and no affect other flexural modes increasing voids. Effects of asymmetrical conditions observe in dynamic responses of the rotation and translation that should attention in result of effect of ballast supporting damage. For example, In contact pattern of central void, frequencies of rotation and translation mode decrease increasing voids between 25 percent and 30 percent and frequency of first flexural mode decrease increasing voids 10 percent and the other flexural modes change a little.

**Keywords:** Sleeper-ballast interaction, Voids of ballast, Free frequency, In-suit railway concrete sleeper, finite element