

تحلیل و مدل‌سازی آیرودینامیکی پرش بالاست در عبور قطار پرسرعت

محمد رضا خلایلی* (استادیار)

حامد بختیاری‌زاده (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

سهیل غیاثوند (کارشناس ارشد)

مسعود پوشیده (کارشناس ارشد)

گروه تحقیقات فنی و زیربنایی، مرکز آموزش و تحقیقات شرکت راه آهن ج.ا.ا.

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۷ (ص. ۴۵-۵۴)
دوره ۲ - ۳۴، شماره ۱، ص. ۴۵-۵۴

پدیده پرواز بالاست یک مشکل جدی در خط پرسرعت بالاستی مانند خط تهران - قم - اصفهان به شمار می‌رود. در این پدیده موج فشاری ایجاد شده در اثر حرکت قطار منجر به بلند شدن سنگ‌های روی خط (بالاست) شده و آنها را پرت می‌کند. هدف این تحقیق شناسایی علت‌های احتمالی و ارائه‌ی راهکارهای کاهش احتمال خطر پرواز بالاست است. حل جریان زیر قطار پرسرعت به صورت تحلیلی با مدل‌سازی معادلات جریان کوئت انجام شده و با مدل‌سازی در نرم افزار فلوئنت مقایسه شده و به منظور اعمال به سنگ نمونه در نظر گرفته شده است. در ادامه با نمونه‌برداری از بالاست‌های مورد استفاده در راه آهن ایران، از لحاظ شکل آیرودینامیکی و جرم دسته‌بندی شده و در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفته و سرعت بحرانی برای بلند شدن آنها تعیین و با محاسبات تحلیلی و نرم‌افزاری مقایسه شده است و ضریب احتمال پرواز بالاست و راهکار پیشنهادی جهت کاهش خطر پرش ارائه شده است.

واژگان کلیدی: پرواز بالاست، قطار پرسرعت، تونل باد، جریان کوئت، سرعت بحرانی.

mrtalae@iust.ac.ir
hamedbakhtiarizade@yahoo.com
soheil.ghiasvand@aut.ac.ir
pooshide_M@rai.ir

۱. مقدمه

است. این خط که در حال حاضر عملیات زیرسازی آن حدود ۷۰ درصد پیشرفت داشته مانند دیگر خطوط پرسرعت دنیا از نوع بالاستی است. بالاست به سنگ‌های دانه‌بندی شده و تیزی گفته می‌شود که در روی خط و بین تیرهای سیمانی (تراورس) ریخته می‌شود که وظیفه جذب ارتعاشات و نوسانات عرضی قطار و ریل‌ها را بر عهده دارد. البته از مزایای خط‌های تمام‌بتونی نسبت به خط بالاستی می‌توان به کاهش عملیات تعمیر و نگهداری ۶۰ الی ۷۰ درصدی، افزایش دوره عمر خط، بهره‌برداری بیشینه از خط، ارتقاء ایمنی در سیر و حرکت، دست‌یابی به سرعت‌های بیشتر، پایداری بسیار بیشتر خط، کاهش ارتفاع و وزن سازه، و عدم نیاز به تأمین مصالح بالاست اشاره کرد. در مقابل خط بدون بالاست نسبت به خط بالاستی از معایب تمایل خط به حرکت در هر دو جهت طولی و عرضی، مقاومت جانبی محدود در قوس‌ها، عدم دمپ مناسب نیروهای جانبی، ساختار نسبتاً سنگین، زیاد بودن هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت و نیاز به بستر بسیار مناسب و دقت بسیار بیشتر در نصب اولیه‌ی خط، مشکل بودن تصحیح خط در هنگام وقوع نشست زیاد بستر، هزینه‌بری و زمان‌بری بیشتر برای تعمیر و بازسازی در اثر خروج از خط و ناحیه‌ی انتقالی بین خط بالاستی و بدون بالاست برخوردار است. مهم‌ترین دلیل برای انتخاب خط بالاستی مسیر تهران - قم - اصفهان را پایین‌تر بودن هزینه‌ی ساخت این مسیر نسبت به خط بتنی می‌توان عنوان کرد.^[۱]

بهره‌برداری از قطارهای پرسرعت در جهان سفری راحت، سریع، تقریباً بی‌خطر و ارزان را برای مسافران فراهم می‌آورد. برای اولین بار قطار تندرو با سرعت ۱۶۰ km/h در سال ۱۹۶۰ میلادی در ژاپن با موفقیت آزمایش شد و در پی آن قطارهای دیگری با سرعت ۲۰۰ km/h در آلمان، فرانسه، ایتالیا، انگلستان و سوئد امتحان شد. پیشرفت‌های تکنولوژی در ساخت و ساز ریل و ساخت وسایل کشنده راه‌آهن امکان اجرای سرعت بالا را ایجاد کرد. امروزه آزمون‌های انجام شده بیشینه سرعت قابل دست‌یابی قطار فرانسوی TGV، را برابر ۵۷۴ km/h گزارش کرده‌اند و هم‌اکنون سرعت بهره‌برداری از آن ۳۰۰ km/h است. همچنین قطار پرسرعت آلمانی ICE، با سرعت ۴۰۶٫۹ km/h آزمایش و سرعت ۲۵۰ km/h از آن بهره‌برداری می‌شود.

در ایران نیز شرکت راه‌آهن با حذف تقاطع‌های هم‌سطح، عدم توقف‌های متوالی، حذف قوس‌های متوالی و داشتن مسیرهای مستقل به دنبال توسعه‌ی راه‌آهن و ایجاد سرعت‌های ۲۵۰ تا ۳۵۰ km/h در مسیر تهران - قم - اصفهان است. طول این مسیر ۴۱۲ km و برنامه‌ی حرکت قطار بر مبنای سرعت ۳۰۰ km/h طراحی شده

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۲/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۸/۲۲، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

DOI:10.24200/J40.2018.6400



شکل ۳. تنظیم سطح بالاست خط نسبت به تراورس.^[۸]

به صورت تحلیلی براساس روابط موجود تعیین شده و برای زبری‌های مختلف سطح به دست آمده است. در حالت خاصی از بالاست (مکعبی) نتایج سرعت بحرانی غلتش بالاست، به صورت تحلیلی و نرم افزاری تعیین و با نتایج حاصل از تونل باد مقایسه شده است. بعد از تحلیل نتایج حاصل از تونل باد ضریب احتمال پرواز بالاست در سرعت‌های 300 km/h و 350 km/h تعیین شده است. در انتها، در مقایسه با سایر کارهای انجام شده در جهان، راهکار دانه بندی جرمی و شکلی بالاست‌ها در مسیر خطوط پرسرعت ارائه شده است.

نوآوری‌ها و دستاوردهایی که در این تحقیق نسبت به کارهای انجام شده قبلی می‌توان برشمرد عبارت‌اند از:

- دسته بندی بالاست‌های موجود در راه آهن ایران از منظر اندازه، وزن و شکل آیرودینامیکی؛
- آزمون تکی و مجموعه‌یی هر سه دسته بالاست کروی و نیمه‌کروی و تخت، و محاسبه سرعت بحرانی پرواز برای آنها؛
- مقایسه‌ی تأثیر اثر زبری کف تونل بر سرعت بحرانی پرواز؛
- ارائه‌ی توزیع جرمی و شکلی بالاست مورد استفاده در خط پرسرعت برای جلوگیری از پرش بالاست در عبور قطار پرسرعت ایران.

۲. دسته بندی آیرودینامیکی بالاست از نظر شکل و جرم

برای مطالعه‌ی آماری نمونه بالاست‌های موجود در راه آهن جمهوری اسلامی ایران از نظر جرم و شکل ظاهری، از حجمی به اندازه‌ی $\frac{1}{8}$ متر مکعب از بالاست‌ها که در حدود تعداد 150° نمونه داشت به صورت تصادفی نمونه برداری شده است. طبقه بندی به صورت سه دسته‌ی کروی^۳، نیمه‌کروی^۴ و تخت^۵ انجام شده است (جدول ۱). نتایج این طبقه بندی به صورت درصد احتمال حضور جرم خاصی از نمونه بالاست برای جرم‌های پایین تر از 180 gr (شکل ۶) و برای محدوده‌ی جرم 180 gr تا 450 gr (شکل ۷) گزارش شده است. با توجه به نتیجه‌ی طبقه بندی بالاست‌ها مشاهده می‌شود که در یک نمونه گیری تصادفی احتمال حضور بالاست در محدوده‌ی جرمی صفر تا 180 gr به مراتب بیشتر از جرم‌های بزرگ تر است. همچنین با توجه به تندباد ایجاد شده توسط قطار پرسرعت که در حدود $30 - 25 \text{ m/s}$ است، در شرایط عادی تنها قادر به پرتاب بالاست نمونه‌های این محدوده است. از این رو حساسیت تحلیل روی این محدوده بیشتر خواهد بود. همچنین حضور شکل‌های نیمه‌کروی فراوانی بیشتری در این بازه دارد و در مرتبه‌ی بعد شکل‌های کروی و تخت قرار دارند.

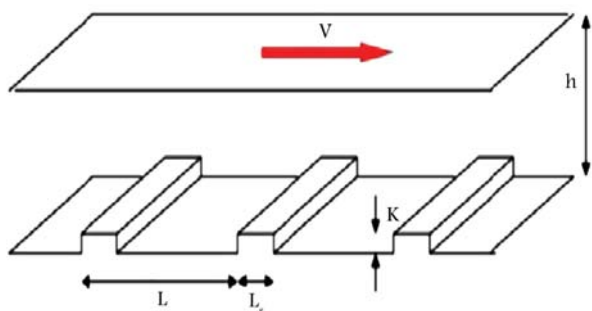


شکل ۴. ایجاد حفره‌ی خالی زیر ریل و بین تراورس‌ها.^[۹]



شکل ۵. توری‌های بالاست در قطار ژاپنی شینکانسن.^[۱۰]

و کشورهای دیگر به نتایج خوبی رسیده است.^[۹] توری بالاست یکی دیگر از راهکارهای کاهش احتمال خطر پرواز است که در مسیر بالاستی قطار ژاپنی شینکانسن^۲ استفاده شده است؛ در شکل ۵ نحوه‌ی به کارگیری آن نشان داده شده است. در صورت به کارگیری این راهکار، ذرات بالاست در داخل توری قرار گرفته و هیچ پرواز بالاستی رخ نمی‌دهد.^[۱۰] در این تحقیق با تمرکز به پروژه‌ی خط پرسرعت تهران - قم - اصفهان و با در نظر گرفتن یک قطار پرسرعت با سرعت حرکت 300 (km/hr) (به طور نمونه قطار ICE آلمان)، در ابتدا از بالاست‌های موجود در راه آهن ایران به طور تصادفی نمونه برداری شده است؛ این نمونه‌ها از نظر شکل آیرودینامیکی در دسته‌های کروی، نیمه‌کروی و تخت، و به لحاظ جرمی نیز در بازه‌های مختلف دسته بندی شده‌اند و آمار تعداد حضور در هر دسته تعیین شده است. سپس پروفیل سرعت زیر قطار



شکل ۸. مدل‌سازی مسیر خط با جریان کوئت.

جدول ۲. زبری سطوح بالایی و پایینی برای مسیرهای مختلف.

نوع سطح خط	زبری مؤثر [۸] (mm)	نوع سطح زیر قطار	زبری مؤثر [۵] (mm)
بالاستی	۲۰۵	با صفحه پوشش پایینی (بادبند)	۱
شنی و ماسه بتنی	۲۴	بدون صفحه پوشش پایینی (بادبند)	۱۵۰ - ۳۰۰
	۳		

جریان کوئت عبارت است از: [۵]

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + v_T \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \varepsilon = 0 \quad (1)$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon = \frac{u^{*3}}{kz} \quad (2)$$

جریان دوبعدی توسط دو صفحه موازی بی‌نهایت واقع در $z = h$ و $z = 0$ محدود شده است (شکل ۸). سطح پایین ثابت ($u = 0$) و سطح بالایی با سرعت $u = V$ حرکت می‌کند. جریان به‌طور کاملاً توسعه‌یافته با فشار یکنواخت فرض می‌شود. به‌طوری‌که تمام متغیرها تنها به مختصات عمودی z وابسته‌اند. بی‌نظمی زیر قطار را می‌توان توسط زبری معادل آن شبیه‌سازی کرد. زبری معادل برای سطوح بالاستی، شنی و بتنی در محدوده‌ی بین ۲۰۰ - ۳۰۰ mm متغیر است. همچنین زبری سطح بالا در حضور و عدم حضور حائل (بادبند) زیر قطار در جدول ۲ گزارش شده است.

با ساده‌سازی روابط و اعمال شرایط مرزی و ضریب زبری معادل برای بالاست مسیر (k_s) و پارامترهای هندسی شکل مشخص شده است، پروفیل سرعت بی‌بعد شده زیر قطار از طریق رابطه‌ی ۳ حاصل می‌شود: [۵]

$$V = 2.75 u^* \left(\ln \left(\frac{\cos \left(\frac{\pi z_1}{2h} \right)}{\frac{\pi z_1}{2h}} \right) - \ln \left(\sin \left(\frac{\pi z_2}{2h} \right) \right) \right) \quad (3)$$

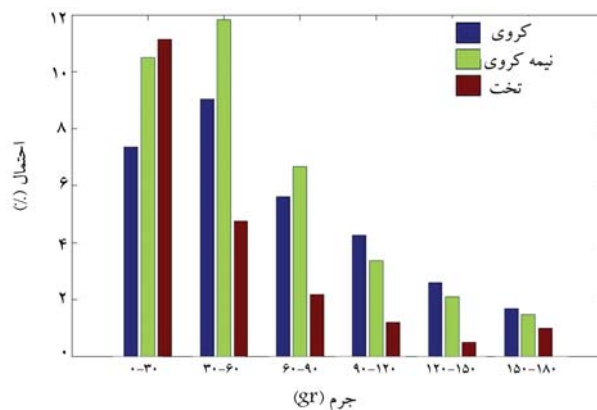
که در آن $z_1 = k_{s1}/3^\circ$ و $z_2 = k_{s2}/3^\circ$ زبری مجاز سطح پایینی و $z_2 = k_{s2}/3^\circ$ زبری مجاز سطح بالایی است و u^* سرعت اصطکاکی و به‌صورت رابطه‌ی ۴ است.

$$u^* = \frac{V}{2.75 \left(\ln \frac{2h}{\pi z_1} + \ln \frac{2h}{\pi z_2} \right)} \quad (4)$$

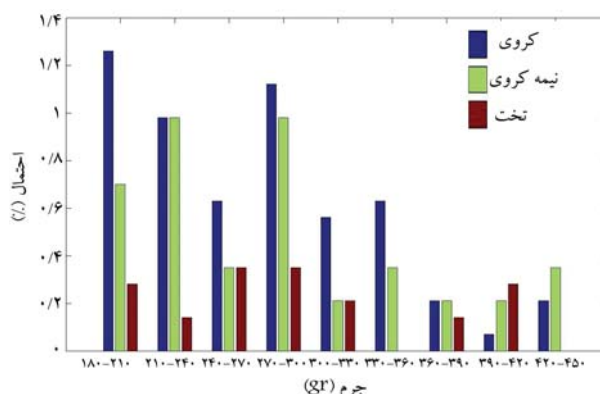
در شکل‌های ۹ و ۱۰ پروفیل سرعت تحلیلی مربوط به زیر قطاری که با سرعت ۳۰۰ km/h حرکت می‌کند، به ترتیب برای دو حالت -- در یکی زبری معادل برای هر دو سطح و در دیگری زبری معادل فقط برای سطح خط مد نظر قرار گرفته --

جدول ۱. طبقه‌بندی انواع بالاست از نظر شکل آیرودینامیکی.

شکل عمومی	ویژگی‌های آیرودینامیکی	نوع شکل
	سطح مقابل جریان کم پایداری روی زمین زیاد	تخت
	سطح مقابل جریان متوسط پایداری روی زمین متوسط	نیمه کروی
	سطح مقابل جریان زیاد پایداری روی زمین کم	کروی



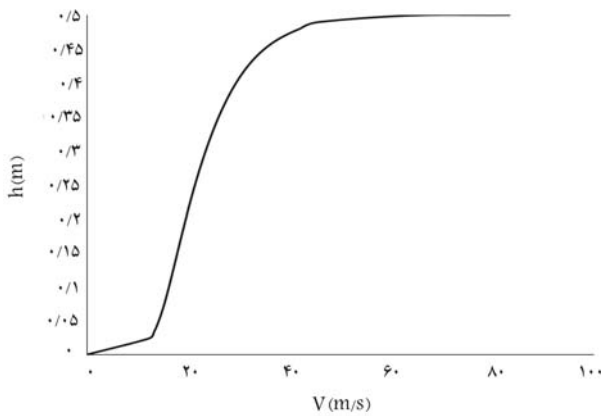
شکل ۶. درصد احتمال حضور بالاست در محدوده‌ی جرم‌های زیر ۱۸۰ گرم.



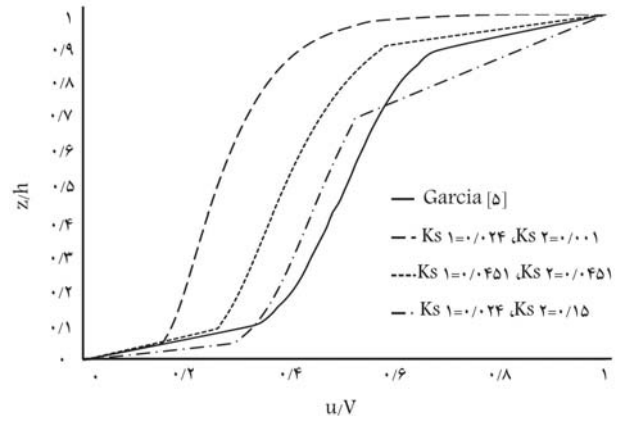
شکل ۷. درصد احتمال حضور بالاست در محدوده‌ی جرم بین ۱۸۰ تا ۴۵۰ گرم.

۳. تحلیل پروفیل سرعت زیر قطار

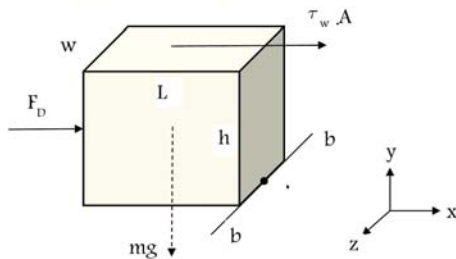
برای تحلیل پروفیل سرعت زیر قطار مدل ساده شده مسیر همانند شکل ۸ در نظر گرفته شده است. برای مطالعه‌ی پروفیل سرعت زیر قطار پرسرعت و سطح زمین می‌توان این ساختار را به‌عنوان مجموعه‌ی متشکل از بالاست و تلووس دانست. حرکت صفحه‌ی زیر قطار (صفحه‌ی متحرک) و سطح زمین (صفحه‌ی ساکن) مشابه جریان کوئت در مکانیک سیالات است. در اینجا از پروفیل سرعت ارائه شده برای این مسئله در مراجع استفاده می‌شود. روابط ساده شده‌ی مدل $k_s - \varepsilon$ مربوط به



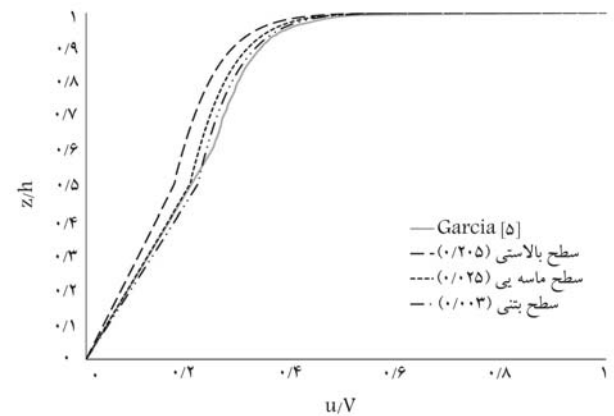
شکل ۱۱. پروفیل سرعت زیر قطار.



شکل ۹. پروفیل سرعت بی بعد زیر قطار در زبری های مختلف سطوح قطار و مسیر.



شکل ۱۲. نمودار آزاد نمونه‌ی بالاست مکعبی.



شکل ۱۰. پروفیل سرعت بی بعد زیر قطار با حائل کف در زبری های مختلف سطح خط.

زبری برای هر دو سطح، با تغییر زبری‌ها محدوده‌ی تندبادهای ایجاد شده تا حدود 5° m/s نیز گزارش شده است.^[۱۱]

۴. بررسی تحلیلی غلتش بالاست

در شکل ۱۲ نمودار آزاد یک نمونه بالاست مکعبی مشاهده می‌شود. آستانه‌ی غلتیدن نمونه‌ی بالاست زمانی است که گشتاور نیروهای وارده به نمونه حول خط $(b - b)$ برابر صفر شود. بنابراین با توجه به جهت نیروهای وارد به نمونه می‌توان گفت گشتاور حاصل از نیروی وزن (mg) در لحظه‌ی بلندشدن با گشتاور حاصل از دو نیروی درگ (F_D) و تنش‌های برشی وارده به سطح $(\tau_w \cdot A)$ برابر است. ذکر این نکته ضروری است که تنش برشی وارده به سطوح کناری (تنش ویسکوز) در مقابل نیروی درگ وارده به سطح روبروی جریان (تنش سطحی) دست کم در مدل مکعبی قابل چشم‌پوشی است. گشتاور فیزیکی نیروی وزن حول خط $(b - b)$ چنین محاسبه می‌شود:

$$F_D \cdot \frac{h}{\gamma} - mg \cdot \frac{L}{\gamma} = 0 \quad (6)$$

با در نظر گرفتن یک نمونه بالاست تقریباً مکعبی، مانند شکل ۱۲ که سرعت غلتش آن از تونل باد برابر $25/25 \text{ m/s}$ به دست آمد مقدار گشتاور باد لازم برای غلتش

نشان داده شده است. پروفیل سرعت در زبری‌های مختلف گزارش شده در مراجع، برای مقایسه ارائه شده‌اند.

شکستگی در پروفیل‌های سرعت به دلیل عرض اولین المان (نزدیک‌ترین المان به دیواره) است. چنان که ملاحظه می‌شود به دلیل این که در جریان کوئت عامل محرک تولید جریان حرکت صفحه‌ی بالایی و تنش برشی روی سطح آن است، با افزایش زبری سطح بالایی پروفیل‌های سرعت با نرخ تندتری تولید و افزایش می‌یابد. با فرض بهره‌برداری از خط تهران - قم - اصفهان با قطار پرسرعت ICE (سرعت 30° km/h) و با در نظر گرفتن ارتفاع 0.5 m زیر قطار از زمین و نیز با فرض وجود حائل (بادبند) در زیر قطار، زبری معادل سطوح بالایی و پایینی به ترتیب برابر 1 و 24 میلی‌متر، پروفیل سرعت همانند شکل ۱۱ به دست می‌آید. با انتگرال‌گیری به روش دوزنقه (رابطه‌ی ۵) از پروفیل سرعت زیر قطار، سرعت تندباد قطار که معیاری برای حد پرواز بالاست است، حاصل می‌شود؛ در سرعت 30° km/h برای قطار فوق سرعت تندباد برابر $24/80 \text{ m/s}$ خواهد شد:

$$\int_a^b V(x) dx \approx \frac{h}{\gamma} \sum_{k=1}^N (V(x_{k+1}) + V(x_k)) = \frac{b-a}{2N}$$



شکل ۱۴. نمایش دو مقطع آزمون تونل باد TE۴۴.



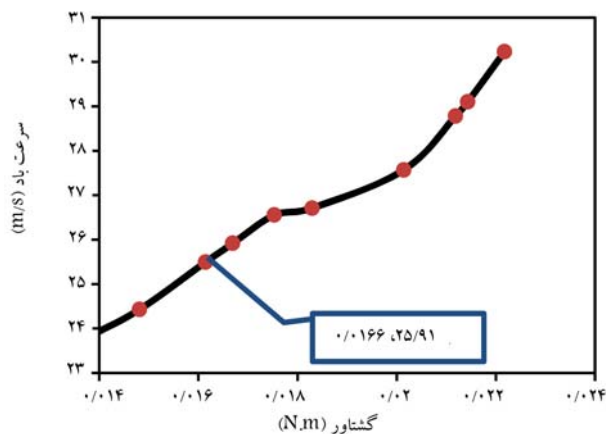
شکل ۱۵. نمای کلی از نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها در دو مقطع تونل باد.



شکل ۱۶. اهرم موتور برای تنظیم سرعت جریان در تونل باد.

مرحله با دو زبری تکرار شده است. لازم به ذکر است که آزمایش‌ها ابتدا با قرار دادن نمونه‌ها روی شیشه‌ی کف تونل انجام شد. پس از راه‌اندازی تونل مشاهده می‌شود نمونه‌ها به‌جای غلتش دچار سرش می‌شدند، به‌همین دلیل از دو زبری ۱ mm و ۱ mm در کف تونل استفاده شد. نمونه‌ها را به‌ترتیب روی این دو سطح قرار داده و سرعت بحرانی برای تک تک آنها محاسبه شد. چنان‌که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود یک ردیف سنگ بالاست در کف تونل باد در جهت عمود بر باد قرار داده شده است. پس از راه‌اندازی تونل، سرعت باد در تونل باد به‌آرامی توسط اهرم (شکل ۱۶) افزایش می‌یابد. با مشاهده‌ی اولین حرکت از بالاست روی سطح (شبه‌ساز تراورس) روند افزایش سرعت متوقف می‌شود. پروب در مسیر جریان (شکل ۱۵) در ارتفاع ۸ cm از کف تونل قرار دارد. با اندازه‌گیری فشار استاتیک (P_{static}) و فشار کل (P_{total}) در نقطه‌ی اندازه‌گیری، از طریق مانومتر گازویلی (شکل ۱۷) که به پروب در مسیر جریان (شکل ۱۵) متصل است، مقدار سرعت به‌دست می‌آید:

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{total} - P_{static})} \quad (8)$$



شکل ۱۳. تغییرات گشتاور اعمال شده به نمونه با تغییر سرعت باد برخوردی.

سنگ عبارت خواهد بود از:

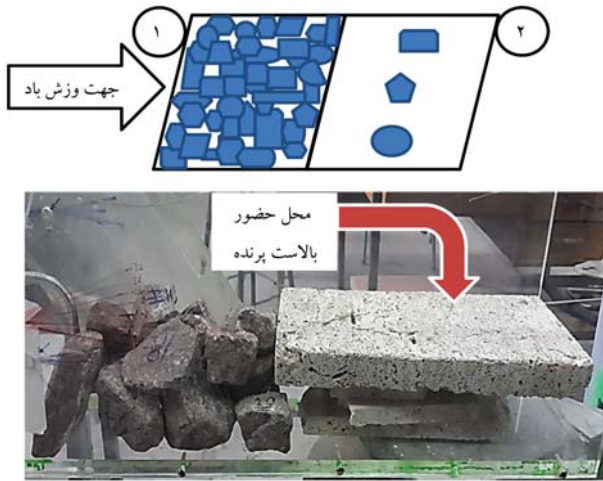
$$\begin{aligned} (W = 4.7, \quad L = 3.5, \quad h = 3 \text{ (cm)}, \quad m = 95.2 \text{ (gr)}) \\ M = mg \times \frac{L}{\gamma} = (0.0952 \text{ (kg)} * 9.81 \text{ (m/s}^2)) \\ \times \frac{0.35}{\gamma} = 0.01634 \quad (9) \end{aligned}$$

در نرم‌افزار تحلیلی fluent مدل مکعبی با همان ابعاد نمونه‌ی شکل ۱۲ روی یک سطح صاف قرار داده شد. همانند تحلیل فیزیکی ارائه شده در بالا، یک منحنی از تغییر سرعت دمیده شده روی سطح برحسب گشتاور حول خط (b - b) در لحظه‌ی بلند شدن که از نقطه‌ی O می‌گذرد (شکل ۱۳) به دست می‌آید. می‌توان گفت در لحظه‌ی بلند شدن بالاست (برابر بودن گشتاور حاصل از نرم‌افزار با گشتاور محاسبه شده از فیزیک مسئله) سرعت اعمالی به نمونه برای غلتش آن در دو حالت با یکدیگر برابر است.

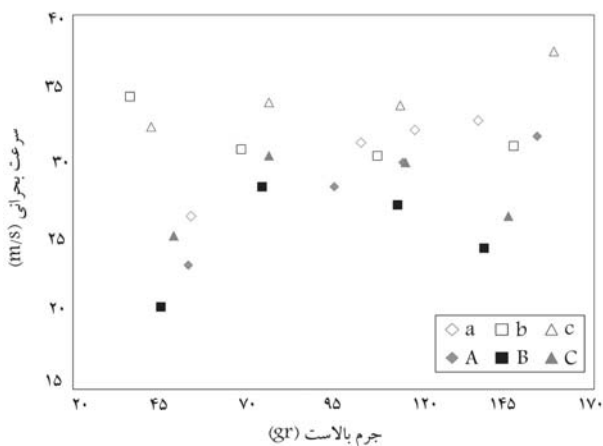
در مقدار گشتاور حاصل از تحلیل فیزیکی مسئله (رابطه‌ی ۷)، سرعت به دست آمده از تحلیل نرم‌افزاری از نمودار شکل ۱۳ برابر (۲۵/۹۱۹ m/s) است و با مقادیر به دست آمده از آزمون تونل باد برای این نمونه مکعبی که برابر ۲۵/۲ m/s است نیز توافق کافی دارد.

۵. نحوه آزمون در تونل باد

برای اندازه‌گیری صحت محدوده سرعت بحرانی باد برای غلتش سنگ‌ها از آزمون تونل باد، در دو حالت استفاده شد. ابتدا سه سنگ دارای وزن مشابه از هر خانواده (کروی، نیمه‌کروی و تخت) در تونل قرار داده شد و سرعت بحرانی غلتش تعیین شد. سپس برای مدل‌سازی واقعی‌تر مجموعه‌ی از بالاست‌های موجود در یک خانواده را کنار هم قرار داده و آزمون تکرار شد. آزمایش‌ها در تونل باد TE۴۴ دمشی و مدار باز (شکل ۱۴) که دارای دو مقطع آزمایشی با ابعاد $45.6 \text{ cm} \times 45.6 \text{ cm}$ و $14 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ دانشگاه علم و صنعت ایران است، انجام شد. عدد ماخ جریان هوا در این تونل در محدوده‌ی مادون صوت بوده و جریان تراکم‌ناپذیر است. شدت اغتشاشات تونل ۰/۷ درصد است. با اندازه‌گیری سرعت به‌وسیله‌ی سرعت‌سنج دیجیتال، تغییرات سرعت در محدوده‌ی $20 \text{ m/s} - 8 \text{ m/s}$ در مقطع یک و $40 \text{ m/s} - 12 \text{ m/s}$ در مقطع دو قابل دست‌یابی است. این آزمایش برای چهار جرم مختلف در محدوده‌ی $180 - 30 \text{ gf}$ و در هر



شکل ۱۹. مدل‌سازی خط و بالاست روی تراورس.



شکل ۲۰. سرعت باد بحرانی برحسب جرم بالاست در هر سه دسته‌بندی بالاست.

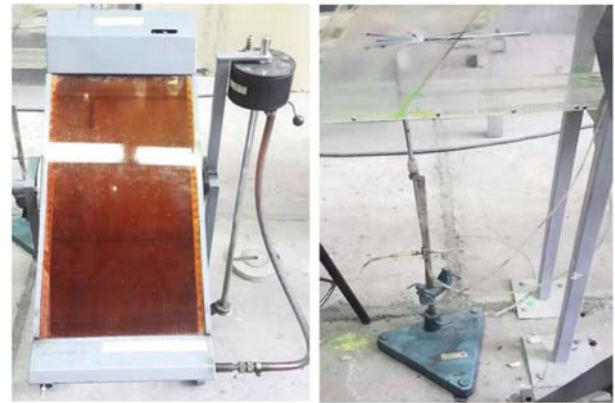
مدل حالت بحرانی پرش سنگ قرار گرفته روی تراورس را کمی واقعی‌تر پیش‌بینی خواهد کرد.

۲.۵. نتایج حاصل از تونل باد

باتوجه به محدودیت سرعت تولیدی تونل (تقریباً در محدوده‌ی $40 - 120$ m/s) در مقطع ۲، محدوده‌ی جرم بالاست نمونه ناگزیر بین $180 - 300$ gf برای آزمون در نظر گرفته می‌شود. مقدار خطای تحمیل شده از مانومتر و دیگر تجهیزات آزمایشگاهی به محاسبات 2 mm گزوتیل و برابر $3 \pm$ m/s است. بالاست‌ها در دسته‌های سه‌تایی با جرم نزدیک به هم انتخاب شده‌اند. در شکل ۲۰ نتایج نهایی حاصل از تونل باد برای نمونه‌های کروی (A,a)، نیمه‌کروی (B,b) و تخت (C,c) روی سطحی با زبری 1 mm نشان داده شده است.

چنان‌که مشاهده می‌شود، A و B، C نشان‌دهنده‌ی کمترین میزان سرعتی است که باعث حرکت هر کدام از دسته‌های سه‌تایی بالاست می‌شود و نیز c، b و a نشان‌دهنده‌ی سرعتی است که در آن هر سه بالاست حرکت کرده باشند. (این آزمایش‌ها برای سطحی با زبری 0.1 mm نیز تکرار شده است.)

منحنی‌های رسم شده در شکل ۲۱ از تقریب داده‌های کمینه سرعت مورد نیاز (V_{min}) برای حرکت دادن اولین بالاست‌های نیمه‌کروی در تونل باد و همچنین



(ب) مانومتر گزوتیلی.

(الف) پروب اندازه‌گیری؛

شکل ۱۷. تجهیز اندازه‌گیری سرعت باد.



(ب) بعد از آزمون.

(الف) قبل از آزمون؛

شکل ۱۸. مکان نمونه بالاست‌ها.

که در آن، U سرعت باد در نقطه‌ی اندازه‌گیری، ρ چگالی هوا، P_{total} فشار کل و P_{static} فشار استاتیک در سوراخ اندازه‌گیری است.

با تغییر ارتفاع این پروب، تغییراتی به اندازه‌ی $1 \pm$ m/s در سرعت اعمال شده به نمونه‌ها مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که ضخامت لایه‌ی مرزی در مقطع آزمون تونل در حد 1 cm است و سرعت در خارج از لایه‌ی مرزی تغییری نمی‌کند. با توجه به کاتالوگ مانومتر گزوتیلی، دقت این مانومتر 2 mm گزوتیل است. لذا میزان خطای تجهیزات اندازه‌گیری در تونل باد مجموعاً $3 \pm$ m/s است. در شکل ۱۸ مکان نمونه بالاست‌ها قبل و بعد از آزمایش نشان داده شده است.

۱.۵. آزمون مجتمع سطح بالاستی

به‌منظور واقعی‌تر کردن نتایج، یکی دیگر از حالات بحرانی که برای پرش بالاست (غلتش بالاست) باید در نظر گرفت، حضور یک بالاست روی تراورس به‌همراه وجود اغتشاشات در جریان است که از سنگ‌های بالاستی قبل از آن ناشی می‌شود. محیط تونل در این حالت مطابق شکل ۱۹ خواهد شد. ناحیه‌ی ۱ نمایان‌گر فاصله‌ی بین دو تراورس که با بالاست پر شده و ناحیه‌ی ۲ نمایان‌گر سطح تراورس با زبری 0.4 mm است. پس از عبور جریان از روی ناحیه‌ی ۱، جریان مغشوش شده و از روی نمونه بالاست‌های قرار داده شده در ناحیه‌ی ۲ عبور می‌کند. این آزمایش حالت واقعی‌تر و تأثیر اغتشاش جریان بر سرعت بلند شدن بالاست‌ها را نشان می‌دهد.

در مدل شکل ۱۹ بخش ۱ از نمونه‌های حجیم و بزرگ پر شده تا اثر اغتشاشی که در جریان ایجاد می‌شود، در بخش ۲ ملاحظه شود. همچنین در بخش ۲ از سطحی با زبری 0.5 mm (شبه‌سازی تراورس) استفاده شده است. لازم به ذکر است که در ناحیه‌ی ۱ به‌دلیل در هم رفتگی بالاست‌ها قطعاً سرعت باد بحرانی برای پرش سنگ بیش از پرش سنگ قرار گرفته روی ناحیه‌ی مقابل آن است و این

جدول ۳. مقایسه‌ی سرعت بحرانی دسته بالاست‌های مختلف.

نوع بالاست	جرم بالاست (gr)	زبری معادل ۰/۱ mm	زبری معادل ۱ mm	آزمون بالاست مجتمع
کروی	۵۳	۲۰	۲۳	۳۲
نیمه کروی	۴۶	۲۲	۲۱	۲۷
تخت	۴۹	۲۴	۲۵	۳۳

جدول ۴. ضریب احتمال پرواز بالاست (BFPF) برای سطوح با زبری ۱ mm.

مجموع	۱۵۰ - ۱۰۰ (gr)	۱۰۰ - ۵۰ (gr)	۵۰ - ۰ (gr)	سرعت قطار (km/hr)
%۱۸/۹۸	%۴/۳۴	%۱۰/۵۲	%۴۲/۱۰	۳۰۰
%۴۱/۳۰	%۲۳/۹۱	%۳۴/۲۱	%۶۵/۷۹	۳۵۰

محدود بین نمونه‌های کروی، نیمه‌کروی و تخت در بین بالاست‌های موجود:

- به‌طور کلی سرعت بحرانی پرش بالاست برای نمونه‌های تخت بیشتر از نمونه‌های نیمه‌کروی و کروی است.
- سرعت بحرانی غلتش در زبری ۱ mm بیشتر از زبری ۰/۱ mm است که نشانه‌ی از حذف پدیده‌ی سرش و نزدیک شدن به غلتش کامل است.
- سرعت باد بحرانی در حالت آزمون مجتمع مانند شکل ۱۹ برای هر یک از نمونه‌ها بیش از حالت آزمون به‌صورت تکی است. این مسئله ناشی از آشفتگی و بلندشدن جریان قبل از برخورد با سنگ بالاست مورد آزمون و کم شدن توان برخوردی جریان باد در اثر برخورد با سنگ‌های پشت نمونه است.

۶. بررسی احتمال پرواز بالاست

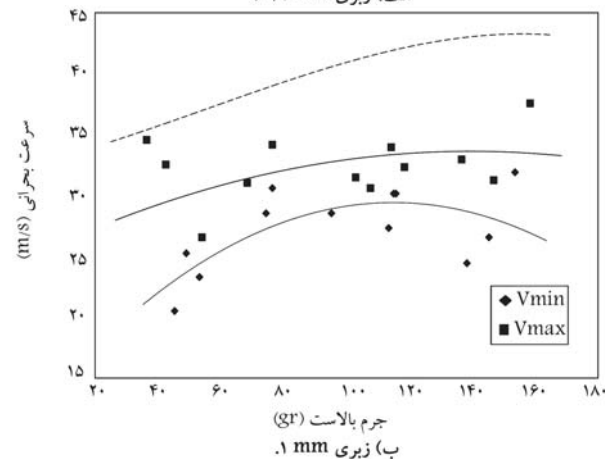
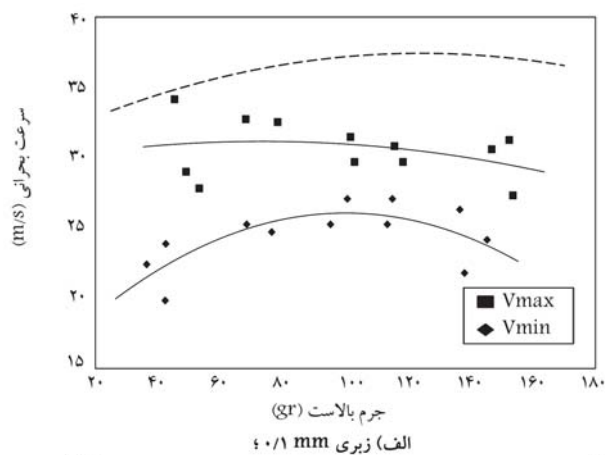
احتمال پرواز بالاست براساس رفتار بالاست در تندباد قطار با سرعت ۳۰۰ km/h بررسی شده است. برای دسترسی به احتمال پرواز بالاست به‌لحاظ کمی، ضریب احتمال پرواز بالاست (BFPF) برای سنگ‌هایی در یک محدوده‌ی جرمی مطابق رابطه‌ی ۹ معرفی شده است: [۳]

$$BFPF = \int_{m_1}^{m_2} \frac{V_{track} - V_{min}}{V_{track} - V_{min}} \frac{dm}{m_2 - m_1} \quad (9)$$

که در آن V_{min} و V_{max} به‌معنای حداکثر و حداقل سرعت بادی است که در آن بالاست حرکت می‌کند. V_{track} متوسط سرعت تندباد بالای مسیر است که با متوسط‌گیری از سرعت به دست آمده در زیر قطار تعیین شد. هنگامی که V_{track} کم‌تر از V_{min} است، می‌توان گفت که هیچ بالاستی نمی‌تواند به پرواز درآید، چون شدت باد به‌اندازه‌ی کافی قوی نیست و بنابراین $BFPF = 0$.

وقتی V_{track} بیشتر از V_{max} باشد، همه‌ی بالاست‌ها به پرواز درخواهد آمد و $BFPF = 1$ است. وقتی V_{track} بین V_{min} و V_{max} باشد، $BFPF$ را می‌توان با رابطه‌ی ۹ فرمول‌بندی کرد. لازم به ذکر است که ضریب احتمال پرواز به محدوده‌ی جرم بالاست تعیین شده بستگی دارد. در جدول ۴ و ۵ ضریب احتمال پرواز بالاست برای دو سرعت ۳۰۰ km/h و ۳۵۰ km/h در محدوده‌ی جرم‌های تعیین شده برای زبری‌های ۱ mm و ۰/۱ mm محاسبه شده است.

چنان‌که ملاحظه می‌شود احتمال پرش بالاست برای سنگ‌های با جرم کم‌تر، بیش از سنگ‌های بزرگ‌تر است و با افزایش سرعت حرکت قطار احتمال پرش سنگ‌ها



شکل ۲۱. سرعت باد بحرانی کمینه و بیشینه‌ی بالاست نیم‌کروی برحسب جرم بالاست.

بیشینه سرعتی (V_{max}) که باعث حرکت تمامی نمونه‌ها شود، رسم شده است. از آنجا که نحوه‌ی قرارگیری بالاست در معرض تندباد به‌صورت کاملاً تصادفی است و احتمال دارد بالاست در پایدارترین حالت خود قرار گیرد، بالاست کروی با جرم کوچک‌تر از ۵۰ gr در سرعت حدود ۲۵ m/s شروع به حرکت می‌کند و همچنین با افزایش جرم، سرعت باد بحرانی دمیده شده که باعث حرکت بالاست می‌شود به محدوده‌ی سرعت بین ۲۵ m/s و ۴۵ m/s شیف‌ت پیدا می‌کند. خط چین P و Q محدوده‌ی است که بیان‌گر بیشینه سرعت پرش تمام نمونه‌های موجود در آن خانواده است. با افزایش تعداد آزمایش یا نحوه‌ی قرارگیری بالاست در تونل باد، انتظار می‌رود این سرعت‌ها در آزمایش تجربه شود.

با مقایسه‌ی داده‌ها در شکل ۲۱ که نشان‌گر سرعت باد بحرانی برحسب جرم بالا به‌ترتیب در زبری‌های ۰/۱ mm و ۱ mm است، می‌توان گفت که سرعت باد بحرانی برای بالاستی که روی سطحی با زبری ۱ mm قرار دارد به‌مراتب از سطحی با زبری ۰/۱ mm بیشتر است؛ لذا با افزایش زبری غلتش بالاست بیشتر در مسئله حاکم می‌شود. به‌عبارتی در آزمایشی با زبری سطح ۰/۱ mm، می‌توان گفت بالاست در تعدادی از آزمایش‌ها به‌جای غلتش، دچار سرش شده است. اطلاعات کمینه سرعت بحرانی برای پرش بالاست برای یک نمونه با جرم تقریباً یکسان از سه دسته بالاست در جدول ۳ ذکر شده است.

باتوجه به داده‌های جدول ۳ می‌توان گفت با در نظر گرفتن خطای ابزارهای اندازه‌گیری و آزمون که در حدود ۳ m/s است و با در نظر گرفتن اختلاف جرم

در شکل ۲۲ نمونه‌یی از مقطع عرضی یک خط بالاستی ارائه شده است. با توجه به استاندارد، رعایت فاصله‌ی ۳۰ سانتی‌متری شانه کنار خط برای قطار پرسرعت الزامی است. لذا در این نواحی و ناحیه‌ی زیرخط که در معرض موج فشاری هوا قرار دارند و به دلیل جلوگیری از پرواز بالاست می‌بایست از سرند بالاست استفاده کرد و حتی‌المقدور از بالاست‌های تخت با جرم در حدود ۱۰۰ گرم به بالا - که سرعت بحرانی پرواز بالاتری نسبت به سایر جرم‌ها دارند - در این ناحیه استفاده کرد. و لذا به‌طور کلی سرند بالاست‌ها باید طوری باشد که بالاست‌های درشت در مرکز مسیر قرار گرفته و هرچه فاصله به سمت خارج ریل بیشتر شود قطر متوسط بالاست‌ها کاهش یابد و بالاست‌های ریزتر از مرکز مسیر فاصله بیشتری داشته باشند.

۸. نتیجه‌گیری

پدیده‌ی پرش بالاست به‌صورت تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

- بالاست تکی در تونل باد در بازه سرعت باد $20 - 25$ m/s شروع به حرکت می‌کند و حدس زده می‌شود بیشینه مقاومت بالاست‌ها در مسیر باد با توجه به چگونگی قرارگیری و ناهمواری سطح آن در سرعت باد 45 m/s باشد. همچنین در حالت آزمون بالاست به‌صورت مجتمع، محدوده‌ی سرعت غلتش به دلیل درهم‌رفتگی بالاست‌ها و آشفته‌گی جریان افزایش می‌یابد. چنان‌که برای بالاست انباشته بین تراورس‌ها، اولین پرواز بالاست در سرعت باد 33 m/s مشاهده شده است.
- سرعت باد بحرانی بالاست‌های کوچک‌تر و گردتر، پایین‌تر از بالاست تخت است و احتمال پرواز بالاست در سرعت 35 km/h حدود دو برابر سرعت 30 km/h است.

تقدیر و تشکر

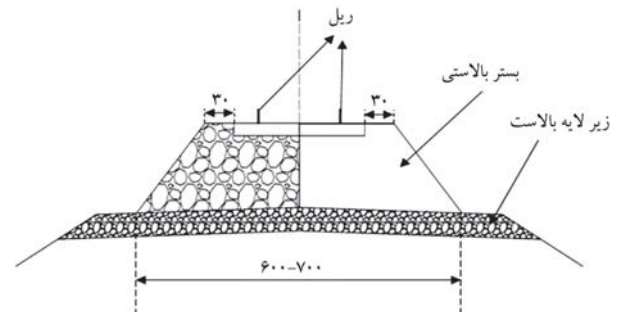
در انتها لازم است از مدیریت آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه علم و صنعت ایران جناب آقای دکتر تقوی و مهندس عباس‌باف که امکان استفاده از تونل باد را فراهم کردند، کمال تشکر را داشته باشیم.

پانویس‌ها

1. slab track
2. Shinkansen
3. spherical
4. half-spherical
5. flat
6. ballast-flying probability factor

جدول ۵. ضریب احتمال پرواز بالاست (BFPF) برای سطوح با زبری 0.8 mm.

مجموع	۱۵۰ - ۱۰۰ (gr)	۵۰ - ۱۰۰ (gr)	۵۰ - ۰ (gr)	سرعت قطار (km/hr)
۲۰/۴۷	۱۳/۶۳	۱۲/۵۰	۳۵/۲۹	۳۰۰
۴۵/۴۹	۳۴/۱۰	۴۰/۶۲	۶۱/۷۶	۳۵۰



شکل ۲۲. برش عرضی یک مسیر بالاستی (ابعاد به سانتی‌متر).

بیشتر می‌شود. به‌طوری‌که در افزایش سرعت از 300 km/h به 350 km/h احتمال حتی دو برابر افزایش می‌یابد.

با مقایسه‌ی احتمال پرش در زبری‌های مختلف ملاحظه می‌شود اگر سنگ بالاستی روی سطوح صافی مانند تراورس قرارگیرد احتمال پرش بالاست نسبت به سطوح با زبری بیشتر (مثل لایه‌ی بالاستی) کمی افزایش خواهد داشت.

۷. طرح پیشنهادی برای کاهش خطر پرواز بالاست

در سیستم قطار پرسرعت سراسر دنیا راهکارهایی برای کاهش احتمال خطر پرواز بالاست استفاده می‌شود. راهکاری که برای کاهش احتمال خطر می‌توان از نتایج این تحقیق برای قطار پرسرعت ایران با سرعت سیر 300 km/h نتیجه گرفت، سرند بالاست در عرض مسیر است. با توجه به نتایجی که برای سرعت بحرانی پرواز از آزمایش‌های تونل باد برای سه دسته بالاست تخت، نیمه‌کروی و کروی به دست آمد، سرعت بحرانی پرواز برای نمونه‌ی تخت نسبت به دو دسته‌ی دیگر به مراتب بالاتر است.

منابع (References)

1. Institute of Protection of High Speed Train Development, Reguale Magazin of Iran Railway Administration, year 2, 17, (in person) (Janivry 2014).
2. Premoli, A., Rocchi, D., Schito, P., Somaschini, C. and Tomasini, G. "Ballast flight under high-speed trains: Wind tunnel full-scale experimental tests", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145, pp. 351-361 (2015).
3. Kwon, H.B. and Park, C.S. "An experimental study on the relationship between ballast flying phenomenon and

- strong wind under high speed train”, In *Proceedings of the World Congress on Rail Research*, Montreal, QC, Canada (2006).
4. Sanz-Andres, A. and Navarro-Medina, F. “The initiation of rotational motion of a lying object caused by wind gusts”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **98**(12), pp. 772-783 (2010).
 5. Garcia, J., Crespo, A., Berasarte, A. and Goikoetxea, J. “Study of the flow between the train underbody and the ballast track”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **99**(10), pp. 1089-1098 (2011).
 6. Cui, J., Patel, V.C. and Lin, C.L. “Large-eddy simulation of turbulent flow in a channel with rib roughness”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **24**(3), pp. 372-388 (2003).
 7. Navarro-Medina, F., Sanz-Andres, A. and Perez-Grande, I. “Gust wind tunnel study on ballast pick-up by high-speed trains”, *Experiments in Fluids*, **52**(1), pp. 105-121 (2012).
 8. *Identification of High-Speed Rail Ballast Flight Risk Factors and Risk Mitigation Strategies*, Final Report, United State Department of Transportation Federal Railroad Administration., Standard Form 298 (Rev. 2-89) Prescribed by ANSI Std. 239-18, 298-102 (2015).
 9. Jacobini, F.B., Tutumluer, E. and Saat, M.R. “Identification of high-speed rail ballast flight risk factors and risk mitigation strategies”, *10th World Congress on Railway Research Sydney*, Australia (25-28 November 2013).
 10. Baker, C. “The flow around high speed trains”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **98**(6), pp. 277-298 (2010).
 11. Jing, G.Q., Liu, G.X., Lin, J., Martinez, J. and Yin, C.T. “Aerodynamic characteristics of individual ballast particle by wind tunnel tests”, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, **7**(2), pp. 137-142 (2014).