

اعتبارسنجی شبیه‌سازی دینامیکی پانتوگراف-سیستم کاتنری با استاندارد EN 50318

رضا عبادی^۱، حجت جعفری^۲، قنبر برزگر^۳، محمد علی قشنگ پور^۴

^۱ کارشناسی ارشد، شرکت آلوکاست ایران؛ ebadi.reza@chmail.ir

^۲ کارشناسی ارشد، شرکت آلوکاست ایران؛ hojjatjafari.ir@chmail.ir

^۳ کارشناسی ارشد، شرکت آلوکاست ایران؛ q.barzegar@chmail.ir

^۴ کارشناسی، شرکت آلوکاست ایران؛ ATBBA94@gmail.com

چکیده

یکی از مهمترین موضوعات درگیر در افزایش سرعت قطارها مربوط به رفتار دینامیکی تقابل بین پانتوگراف و سیستم کاتنری می‌باشد. هدف از شبیه‌سازی عددی، بررسی تقابل بین پانتوگراف-سیستم کاتنری می‌باشد تا کاهش سایش سیم تماس و عدم جدایی پانتوگراف از سیم تماس را تضمین نماید و هزینه‌های نگهداری را به حداقل برساند. شبیه‌سازی عددی تقابل سیستم کاتنری با پانتوگراف می‌تواند زمینه‌ای برای مطالعات بعدی جهت بهبود سیستم‌های کاتنری و انواع پانتوگراف برای افزایش سرعت قطارها فراهم نماید. جهت اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از نرم افزار آباکوس، نتایج شبیه‌سازی با نتایج استاندارد EN 50318 مقایسه شده است و نتایج نماینگر این می‌باشد که شبیه‌سازی عددی می‌تواند بیانگر رفتار دینامیکی سیستم شبکه بالاسری با دقت بالایی باشد. استخراج نیروی تماس بین پانتوگراف-سیستم کاتنری و میزان جابجایی عمودی سیم تماس در اثر حرکت پانتوگراف از معیارهای مورد بررسی در این مقاله می‌باشد که هر یک از شرکت‌های بزرگ دنیا در این زمینه از روش‌های مختص به خود جهت دستیابی به این مهم استفاده نموده‌اند. دستیابی به این قابلیت می‌تواند زمینه خوبی برای بهینه‌سازی سیستم شبکه بالاسری برای طراحی خطوط پر سرعت و بهبود کارایی تجهیزات خاصی نظیر پانتوگراف و غیره برای مهندسان ایرانی فراهم آورد و انحصار این علم را از دست شرکت‌های خارجی پیشرو در این زمینه خارج سازد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی دینامیکی، پانتوگراف، سیستم کاتنری

۱ مقدمه

در سیستم‌های قطار برقی، تقابل بین پانتوگراف و سیستم کاتنری وظیفه اصلی انتقال انرژی الکتریکی به قطار را جهت تامین قدرت بر عهده دارد. کیفیت تماس بین سیم تماس و پانتوگراف یکی از مهمترین پارامترها در شبکه بالاسری می‌باشد به طوریکه روی ساختار سیستم و پارامترهای ضروری از جمله ماکزیمم سرعت قطار و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری تاثیر به‌سزایی دارد. سیمون و آرنولد [۱] این تماس را به عنوان بحرانی ترین بخش در انتقال انرژی الکتریکی به قطارهای امروزه معرفی می‌کنند. این تماس از طریق فشار به سمت بالا از سمت پانتوگراف ارضا می‌گردد. تقابل بین سیستم کاتنری و پانتوگراف سیستمی بسیار پیچیده می‌باشد بطوریکه استفاده از روش‌های ریاضی را در این مورد بسیار مشکل می‌سازد و در روش‌های تجربی امکان تست با مدل‌های ساده را امکان‌پذیر می‌سازد به طوری که محدودیت‌های تجهیزات، محیط و شکل ساختار ممکن است منجر به شکست در این روش شود. امروزه با توسعه سیستم‌های کامپیوتری پیشرفته، روش‌های عددی توسعه یافته‌اند. استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی جهت بررسی تقابل بین سیستم کاتنری و پانتوگراف می‌تواند مورد تحقیق قرار بگیرد. استفاده از این روش علاوه بر کاهش هزینه و زمان تست، امکان اعمال تغییرات بر هر یک از عوامل درگیر را ممکن می‌سازد و فقط از این روش می‌توان جهت بهینه‌سازی سیستم در آینده استفاده نمود.

محققان زیادی در زمینه شبیه‌سازی پانتوگراف و سیستم کاتنری وجود دارند. مدل‌های المان محدود [۲]، مدل‌های ساده‌سازی شده ای [۳] که تو سعه یافته [۴] و مدل‌های ریاضی [۱] از تقابل سیستم کاتنری با پانتوگراف تو سعه یافته‌اند. بنت و همکاران [۵]، تیچلمن [۶] و جنسن [۷] روی معادلات حرکت پانتوگراف و کاتنری بر اساس معادله دینامیک آن و مدل‌های پیشنهادی برای محاسبات دینامیکی سیستم متمرکز شدند. راموس [۸] و می و همکاران [۹] مدل‌های پانتوگراف و کاتنری ساخته و در نرم‌افزار المان محدود از سیستم شبیه‌سازی کردند. در مقاله [۱۰] سیستم کاتنری معادل با یک فنر-جرم یک بعدی شامل فنر بود که نیروی تماسی می‌تواند با معادلات دینامیکی پانتوگراف حل شود. هاو

[۱۱] دینامیک های پانتوگراف و ریل رسانای مورد استفاده در حمل و نقل شهری را شبیه سازی نمود. مقالات زیادی در زمینه شبیه سازی پانتوگراف با سیستم کاتنری با استفاده از نرم افزارهای المان محدود از جمله گاسندو^۱ از ژاپن، اسکار^۲ از SNCF، کاتموس^۳ از BB، سیکات مستر^۴ از زمینس و پروسا^۵ از DB به چاپ رسیده است [۱۲ تا ۱۶]. در اکثر مقالات بر روی روند مدل های شبیه سازی متمرکز شده اند اما اقدام به اعتبار سنجی مدل خود با استفاده از استانداردهای بین المللی ننموده اند. مقالات معدودی از جمله [۱۷] اقدام به اعتبار سنجی مدل شبیه سازی خود با استفاده از استانداردهای بین المللی نموده اند.

در این مقاله تقابل بین سیستم کاتنری- پانتوگراف با استفاده از روش المان محدود و نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است و نتایج شبیه سازی با نتایج استاندارد EN 50318 مقایسه و اعتبارسنجی شده است تا اطمینان پذیری آن را مورد تایید قرار دهد. جهت انجام این تحقیق در ابتدا نیاز بود تا خواص مکانیکی و دینامیکی سیستم های کاتنری و پانتوگراف مطالعه گردد. سپس رفتار تقابل پانتوگراف-کاتنری باید مورد تحقیق قرار کی گرفت و در نهایت مدل ارائه شده در استاندارد EN 50318 مورد بررسی قرار گرفته تا با مدل شبیه سازی شده مقایسه و اعتبارسنجی گردد. این مدل باید قادر به پردازش حرکت پانتوگراف باشد تا بتوان نیروهای تماسی بین سیم تماس- پانتوگراف و جابجایی های عمودی سیم تماس در کل بخش کششی را تحقیق نموده و همچنین باید قادر به تحلیل رفتارهای غیرخطی ها در مدل باشد. رفتارهای غیر خطی شامل تماس لغزشی و اصطکاکی پانتوگراف و شل شدگی سیم دراپر بر اثر عبور پانتوگراف می باشد.

۲ مدل سیستم کاتنری

سیستم کاتنری شامل سیم تماس، سیم مسنجر و تعداد مشخصی از دراپرها می باشد. این سیستم توسط کانتیلورها نگهداری می گردد که خود کانتیلورها بر روی پایه نصب می شوند و در یک سمت مسیر قرار دارند.

۲-۱ سیم تماس:

وظیفه اصلی سیم تماس انتقال انرژی الکتریکی بدون قطعی به قطار می باشد. در عین اینکه نباید هیچگونه قطعی در انتقال انرژی الکتریکی به قطار صورت بگیرد، سایش روی سیم تماس و زغال های روی سیم تماس نیز باید به حداقل برسد تا هزینه های تعمیر و نگهداری کاهش یابد [۱۵]. جهت کاهش سایش سیم تماس دو روش اصلی وجود دارد. در روش اول به سیم تماس زیگزاگ می دهند تا هنگام عبور پانتوگراف، موقعیت سیم تماس روی زغال های پانتوگراف دائما در حال تغییر باشد. در روش دوم به سیم تماس یک شکم اولیه می دهند تا از نیروی تماسی یکنواخت اطمینان حاصل شود [۱۵]. ولی با این وجود جهت دستیابی به شکم اولیه بهینه نسبت به سرعت قطار، نیاز به بررسی میزان نیروی تماسی می باشد که این کار فقط با انجام شبیه سازی دینامیکی ممکن می باشد. شکم اولیه در ادامه به تفصیل توضیح داده شده است. سیم تماس استفاده شده در تحلیل دینامیکی از نوع Cu-150 می باشد [۱۸ و ۱۵]. سطح مقطع سیم تماس دایره ای نمی باشد و شیارهای موجود در روی سیم با استفاده از کلمپ های متصل به دراپر جهت نگهداری سیم طراحی شده است.

۲-۲ سیم مسنجر:

هدف استفاده از سیم مسنجر همراه با دراپرها، نگهداری سیم تماس در امتداد عمودی و در یک موقعیت مطلوب و مورد نظر می باشد. استفاده از سیم مسنجر امکان داشتن طول های اسپن طولانی تر را ممکن ساخته و سایش روی زغال های جمع کننده جریان را کاهش می دهد [۱۵]. سیم مسنجر استفاده شده در این مقاله از نوع Cu-120 می باشد [۱۸ و ۱۵].

۲-۳ دراپرها:

دراپرها وظیفه اتصال سیم تماس به سیم مسنجر را از طریق کلمپ دراپرها دارند. در این مقاله جهت شبیه سازی دراپرها از المان فنر غیر-خطی استفاده شده است.

۲-۴ کانتیلور:

کانتیلورها جهت نگهداری شبکه بالاسری طراحی شده اند که روی پایه ها سوار شده اند. شمشیرک^۶ روی کانتیلور نصب شده است و بسته به جهت نیرو (پول آف؛ پوش آف) در دو جهت می تواند نصب گردد [۱۵]. در این مقاله جهت شبیه سازی شمشیرک از یک میله به طول ۱ متر و جرم بر

-
- Conductor rail ^۱
 - GASENDO-FE ^۲
 - OSCAR ^۳
 - CATMOS ^۴
 - SicatMaster ^۵
 - ProSA ^۶
 - Pole ^۷
 - Registration arm ^۸
 - Pull-off ^۹
 - Push-off ^{۱۰}

واحد طول ۱ کیلوگرم بر متر استفاده شده است [۱۸] که در انتها به صورت مفصل نصب شده است.

جهت دستیابی به سفتی^{۱۱} و هندسه مطلوب سیستم کاتنری، اعمال کشش در هر دو سیم تماس و مسنجر ضروری می باشد. این میزان کشش از سیستمی به سیستم دیگر تغییر می کند که میزان ماکزیمم مجاز کاری این کشش از طریق فرمول ۱ ارائه شده در استاندارد EN 50119 [۱۹] قابل محاسبه می باشد. میزان کشش استفاده شده برای سیم تماس و مسنجر به ترتیب برابر ۲۰ و ۱۶ کیلو نیوتن می باشد [۱۸].

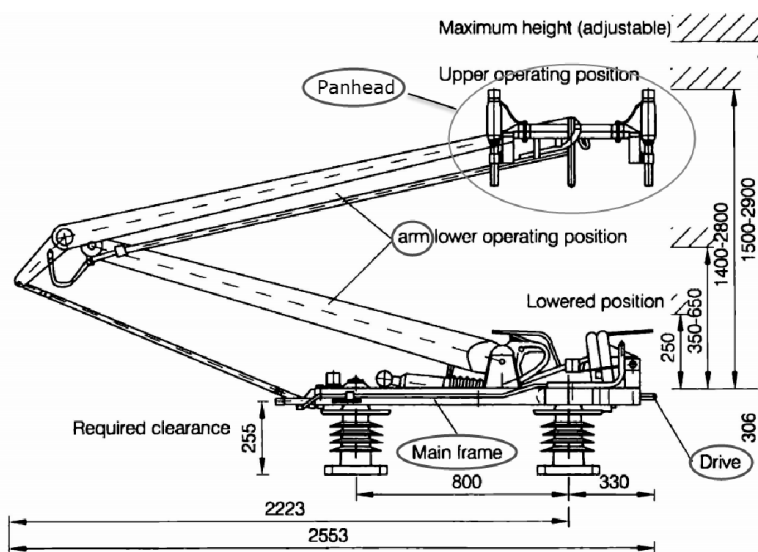
$$\sigma_w = \sigma_{min} \times n \times K_{temp} \times K_{wear} \times K_{icewind} \times K_{eff} \times K_{clamp} \times K_{joint} \quad (1)$$

σ_w ماکزیمم تنش، σ_{min} مینیمم استحکام شکست کششی، n فاکتور ایمنی، K_{temp} فاکتور دما، K_{wear} فاکتور ماکزیمم سایش مجاز، $K_{icewind}$ ضریب مربوط به اثر باد و یخ، K_{eff} فاکتور بازدهی سیستم کششی، K_{clamp} فاکتور بازدهی کلمپ ها و K_{joint} ضریب مربوط به کاهش استحکام کششی در اتصالات می باشد.

مطابق استاندارد EN 50318 جرم دراپرها و کلمپ های استفاده شده صفر در نظر گرفته شده است [۱۸].

۳ مدل پانتوگراف

پانتوگراف عبارت است از وسیله ای که روی قطار قرار گرفته تا انرژی الکتریکی را از سیم تماس به قطار منتقل نماید. پانتوگراف به ۴ قسمت اصلی تقسیم می گردد: شاسی اصلی^{۱۲}، بازو^{۱۳}، یک هد پانتوگراف^{۱۴} و یک محرک^{۱۵} (شکل ۱).



شکل ۱ پانتوگراف DSA-350S

پانتوگراف شامل یک سیستم پیچیده می باشد که از قسمت پایین به سقف قطار متصل شده است. نیروی رو به بالای پانتوگراف از طریق یک هوای فشرده در داخل سیلندر به سیم تماس منتقل می گردد [۱۵] که نیرویی بسیار پایدار و یکنواخت می باشد. بازو به شاسی اصلی و محرک متصل شده است و هد را به دلیل نیروی وارده از سمت محرک به سمت بالا فشار می دهد. همچنین یک اصطکاک خشک در اتصال میانی بازو وجود دارد که موجب اندکی پایداری و یکنواختی سیستم می گردد. هد به قسمت بالایی بازو متصل شده است و زغال ها بر روی هد قرار گرفته اند. این زغال ها مستقیماً با سیم تماس در ارتباط هستند و انرژی الکتریکی را از سیم تماس دریافت می کنند. نیروی استاتیکی وارده از سمت هد پانتوگراف به سیم تماس در شبیه سازی معادل ۱۲۰ نیوتن در نظر گرفته شده است [۱۸].

۴ روش عددی

مدل عددی بر مبنای اطلاعات ورودی معرفی شده در استاندارد EN 50318 طراحی و شبیه سازی شده است. از نرم افزار آباکوس جهت شبیه سازی مدل ارائه شده در استاندارد EN 50318 استفاده شده است.

اطلاعات مورد نیاز جهت ایجاد مدل شبیه سازی شده عبارتند از:

- هندسه سیستم کاتنری:

طول و شعاع هر اسپن، طول یک بخش کششی، موقعیت دراپرها، ارتفاع سیم تماس (شکم، طول دراپر، شیب سیم)، هندسه و توزیع جرم

^{۱۱} Stiffness

^{۱۲} Main frame

^{۱۳} Arm

^{۱۴} Pantograph pan-head

^{۱۵} Drive

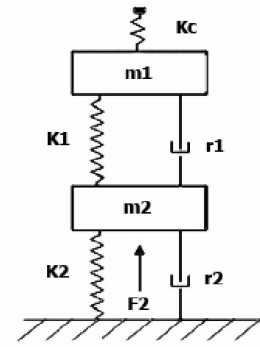
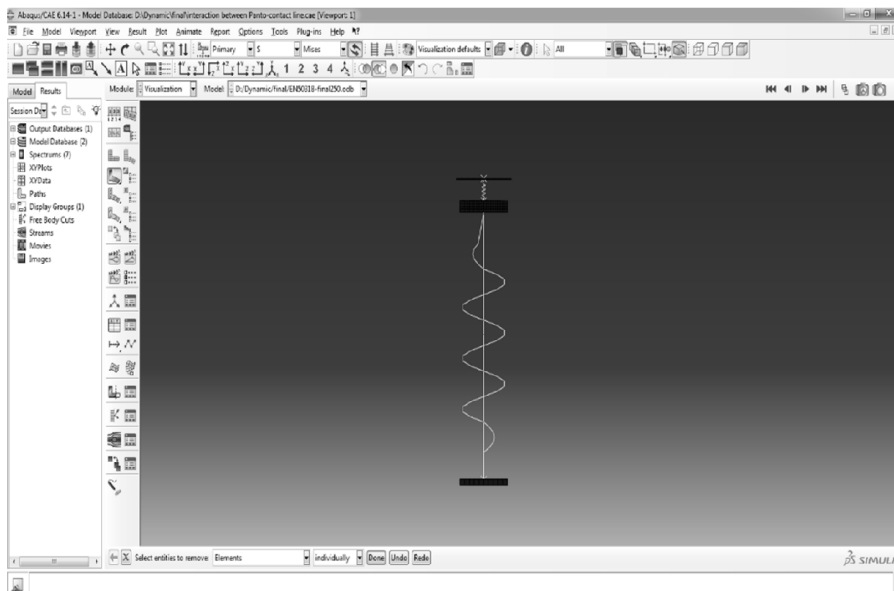
شمشیرک، زیگزاگ سیم تماس، تعداد و مشخصات سیم ها (سیم تماس، سیم کاتنری، سیم کمکی^{۱۶}، سیم استیج^{۱۷}، دراپرها و ...)، جرم بر واحد هر طول سیم ها (چگالی) و سطح مقطع، کشش مکانیکی سیم ها (که وابسته به دما می باشد)، جرم اتصالات بین سیم ها و دراپرها (کلمپ ها)، نوع اتصالات بین سیم ها، مشخصات مکانیکی پایه ها و ساختارها و مشخصات سفتی دراپرها.

- پانتوگراف:

مشخصات فنی، مقادیر اصطکاک، سفتی، دمپینگ، جرم ها و نیروی های استاتیکی و آیرودینامیکی، توزیع جرم، درجات آزادی اتصالات، طول و عرض زغال ها و تعداد و فاصله بین پانتوگراف ها.

پس از وارد نمودن اطلاعات ورودی مورد نیاز، مدل مش بندی شده مورد تحلیل قرار گرفت و از ابتدا تا به نتیجه گرفتن تحلیل، تغییرات بر روی مدل اعمال گردیدند تا نتایج مدل نهایی مطابق با نتایج استاندارد EN 50318 گردد.

در ابتدا فقط یک اسپن از مدل مورد نظر مورد تحلیل قرار گرفت که با استفاده از این مدل ساده خواص متفاوت و تغییرات بر روی سیستم انجام گرفت. سپس با گسترش یک طول اسپن به ده طول اسپن، شبیه سازی کل مدل در حالت سه بعدی انجام گرفت. لازم به ذکر می باشد که به ارتفاع طول دراپرها در استاندارد EN 50318 اشاره نشده است و پس از تحقیق و کد نویسی توسط مهندسین گروه مکانیک آلوکاست ایران، طول های دراپر بهینه برای طول های اسپن بدست آمد. تعداد گره، المان و فنر استفاده شده برای سیستم کاتنری به ترتیب برابر ۴۳۳۹۲، ۳۸۶۰۰ و ۹۰ می باشد. پانتوگراف مطابق استاندارد EN 50318 در نرم افزار آباکوس به صورت یک سیستم جرم-فنر-دمپر طراحی شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ سمت راست: مدل جرم - فنر - دمپر پانتوگراف ارائه شده در استاندارد EN 50318. سمت چپ: مدل جرم - فنر - دمپر پانتوگراف شبیه سازی شده معادله دینامیکی سیستم پانتوگراف-کاتنری برای حرکت عمودی به صورت فرمول ۲ قابل ارائه می باشد:

$$[M_c]\{\ddot{y}_c\} + [C_c]\{\dot{y}_c\} + [K_c]\{y_c\} = \{f(x, t)\}, \quad (2)$$

که M_c و C_c و K_c ماتریس جرم، میرایی و سفتی سیستم کاتنری می باشند. \dot{y}_c و \ddot{y}_c بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی سیستم کاتنری می باشند و در نهایت $f(x, t)$ بردار نیروی گرهی برای نیروهای تماسی بین پانتوگراف و سیستم کاتنری در زمان t می باشد. برای مدل سه بعدی، ماتریس دمپینگ ساختاری سیستم کاتنری $[C_c]$ مطابق زیر تعریف شده است:

$$[C_c] = \alpha[M_c] + \beta[K_c]. \quad (3)$$

مقادیر α و β برای مدل شبیه سازی شده در قسمت مواد وارد نرم افزار شده است.

مطابق استاندارد دو جرم m_1 و m_2 برای پانتوگراف در نظر گرفته شده است که از وزن مربوط به فنر و دمپر صرف نظر شده است.

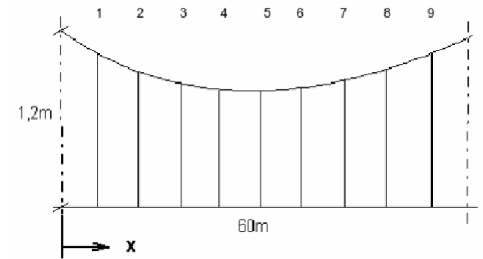
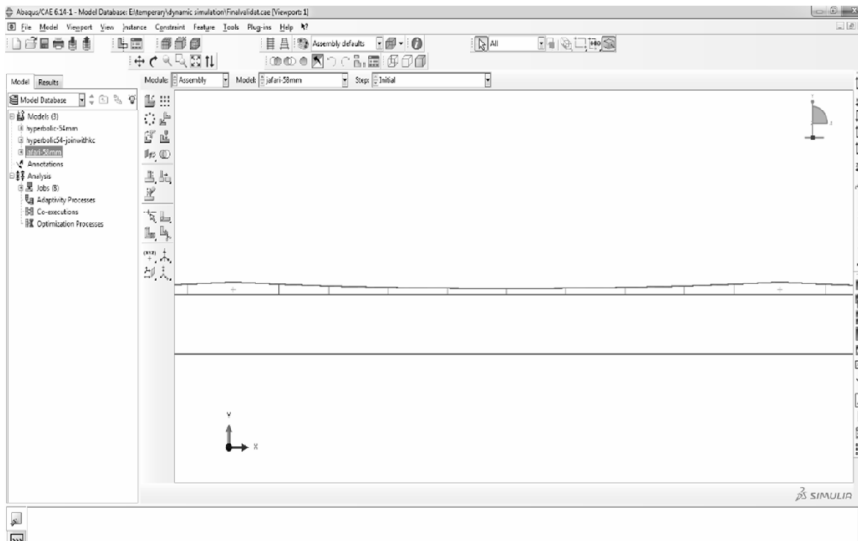
۵ اعتبارسنجی

ابزار شبیه سازی فقط جهت مدل کردن سیستم های واقعی طراحی شده اند و زمانی نتایج می توانند قابل اعتماد باشند که با نمونه های واقعی تست شده مقایسه شوند. جهت شبیه سازی تقابل سیستم کاتنری- پانتوگراف نیاز به استخراج اطلاعات دقیق و جزئی از اندازه گیری های انجام شده در ابعاد واقعی می باشد. در ضمن، تست های اندازه گیری شده در ابعاد واقعی (به عنوان مثال میزان نیروی تماسی و بالارفتگی سیم تماس) باید قابل اعتماد باشند. بعلاوه تطابق مقادیر آماری (شامل مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد) بین نتایج تجربی و عددی باید مورد مقایسه قرار بگیرند.

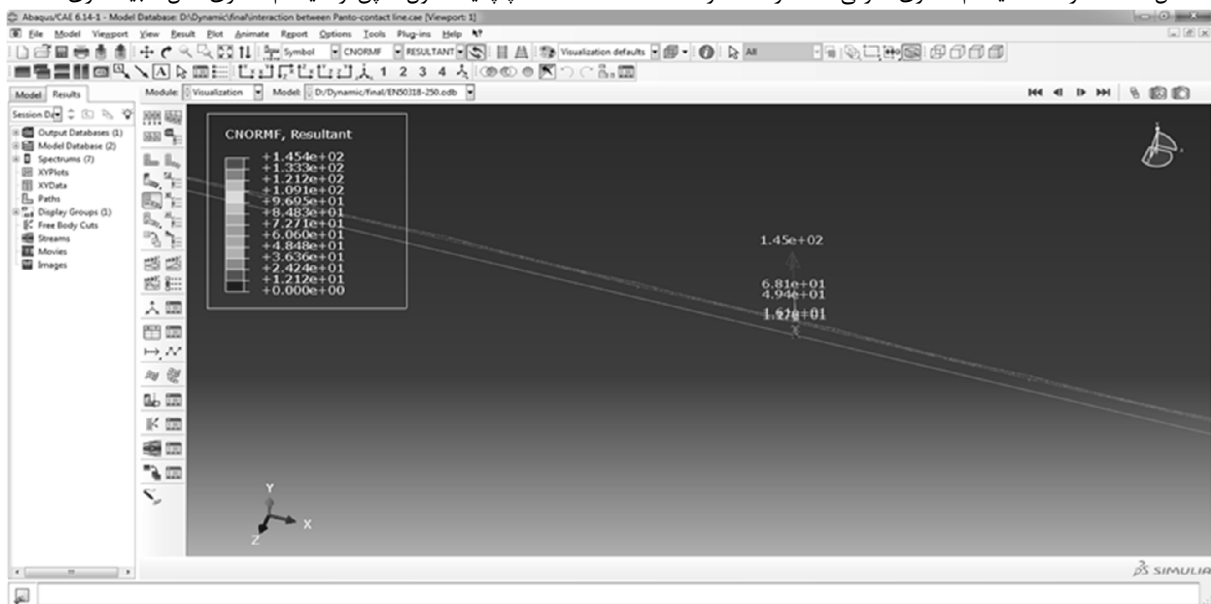
^{۱۶} Auxiliary

^{۱۷} Stitch

استاندارد EN 50318 مدل مرجع تست شده ای را معرفی می کند که تمامی مقادیر ورودی و خروجی مورد نیاز با جزئیات در آن ارائه شده است. استاندارد به طور آشکار تصریح می کند که سیستم شبیه سازی باید با تمام موارد اشاره شده و داده های اندازه گیری شده در استاندارد مطابقت داشته باشد. برای سیستم کاتنری یک اسپن به طول ۶۰ متر با فاصله های مشخص در ابراز هم که با زیگزاگ مثبت/منفی ۰/۲ در ۱۰ اسپن تکرار شده است (شکل ۳) و یک مدل ساده ای از جرم-فنر-دمپر برای پانتوگراف ارائه نموده است (شکل ۲) که باید در دو سرعت متفاوت ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت شبیه سازی شوند. نمونه ای از مدل شبیه سازی شده در شکل ۴ نمایش داده شده است. به منظور اعتبارسنجی، مقادیر آماری برای نیروهای تماسی و بالارفتگی سیم تماس باید در محدوده مشخص شده قرار بگیرند. مقایسه نتایج شبیه سازی با محدوده های در نظر گرفته شده برای استاندارد در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۳ سمت راست: سیستم کاتنری معرفی شده در استاندارد EN 50318. سمت چپ یک طول اسپن از سیستم کاتنری مدل شبیه سازی شده

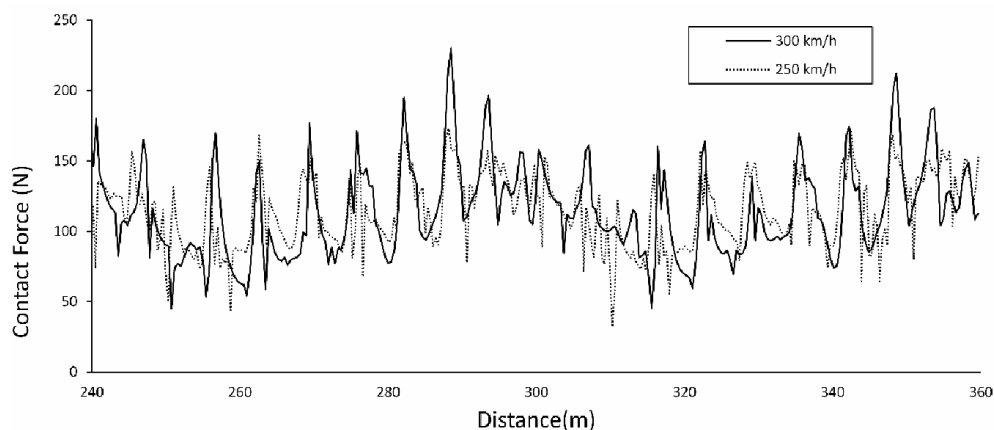


شکل ۴ نمونه ای از شبیه سازی تقابل پانتوگراف-سیستم کاتنری

جدول ۱. مقایسه نتایج آماری مدل شبیه سازی شده با محدوده نتایج مدل مرجع استاندارد EN 50318

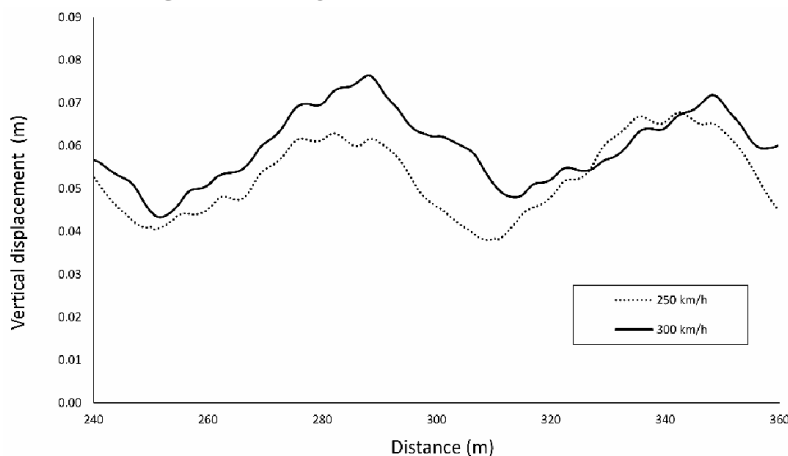
نتایج تست شبیه سازی		محدوده مشخص شده در EN 50318		
۳۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۲۵۰	سرعت (کیلومتر بر ساعت)
۱۱۴	۱۱۵	۱۲۰ تا ۱۱۰	۱۲۰ تا ۱۱۰	نیروی تماسی میانگین (نیوتن)
۳۲/۷	۲۶/۲	۴۰ تا ۳۲	۳۱ تا ۲۶	انحراف معیار استاندارد (نیوتن)
۲۱۲	۱۹۳	۲۳۰ تا ۲۱۰	۲۱۰ تا ۱۹۰	ماکزیمم نیروی تماس آماری (نیوتن)
۱۶	۳۶	۲۰ تا -۵	۴۰ تا ۲۰	مینیمم نیروی تماس آماری (نیوتن)
۶۴	۴۸/۳	۶۵ تا ۵۵	۵۵ تا ۴۸	ماکزیمم جابجایی عمودی در پایه (میلی متر)
صفر	صفر	صفر	صفر	درصد عدم تماس (%)

نیروی تماسی نیرویی می باشد که بین سیم تماس و پانتوگراف عمل می کند. نیروی تماسی بسته به عواملی همچون الاستیسیته، نیروی استاتیکی اعمالی و سرعت قطار و ... تغییر می کند. نیروی آیرودینامیکی به دلیل حرکت پانتوگراف تولید می گردد و با توجه به استاندارد EN 50318 این نیرو در این شبیه سازی صفر در نظر گرفته شده است. به دلیل اثرات دینامیکی حرکت قطار، اگر نیروی تماسی بسیار کم شود امکان کاهش این نیرو به صفر وجود دارد که در این صورت موجب ایجاد جرقه در اتصال بین سیم تماس و پانتوگراف می گردد که می تواند موجب تخریب سیم تماس و زغال های هد پانتوگراف گردد و در صورتی که میزان این نیروی تماسی بسیار بالا باشد می تواند موجب سایش شدید سیم تماس و زغال های کربن گردد. مطابق استاندارد EN 50318 محدوده ای برای نیروی تماسی تعیین شده است که خروجی شبیه سازی نباید از این محدوده تجاوز کند. تغییرات نیروی تماسی در طول اسپن های پنجم و ششم در فرکانس بین ۰ تا ۲۰ هرتز برای سرعت های ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت در شکل ۵ رسم شده است. مطابق جدول ۱ تحلیل آماری نیروی تماسی برای مدل شبیه سازی ارائه شده با نتایج استاندارد EN 50318 مقایسه شده است. همچنانکه از جدول ۱ قابل مشاهده می باشد نتایج تست شبیه سازی شده در محدوده معیارهای تعریف شده با استاندارد EN 50318 قرار دارد. مطابق شکل ۵ در هر دو سرعت، میزان نیروی تماسی در موقعیت های نزدیک به پایه ها دارای مقادیر بالاتری نسبت به موقعیت های نزدیک به میانه اسپن دارند که به دلیل الاستیسیته پایین تر در میانه اسپن می باشد. میزان تغییرات نیروی تماسی در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت بیشتر از میزان نیروی تماسی در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت می باشد که به دلیل اثرات دینامیکی بیشتر در سرعت بالاتر می باشد.



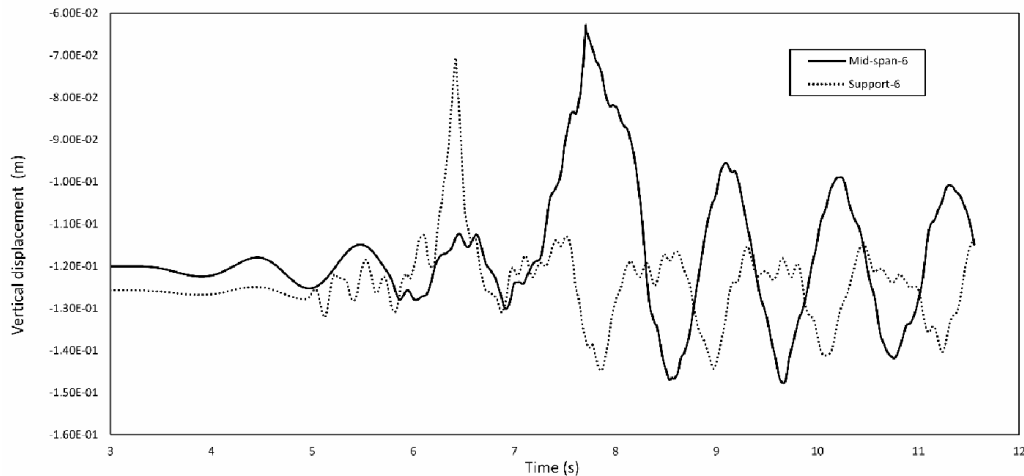
شکل ۵ تغییرات نیروی تماسی در اسپن های پنجم و ششم برای سرعت های ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت

ماکزیمم جابجایی عمودی سیم تماس مطابق استاندارد EN 50318 و مدل شبیه سازی شده در جدول ۱ تعیین شده است [۱۸]. نمودار جابجایی بر حسب زمان برای اسپن های پنجم و ششم و سرعت های ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت در شکل ۶ رسم شده است. به دلیل الاستیسیته پایین، میزان جابجایی عمودی سیم تماس در موقعیت های نزدیک به پایه ها کمتر از جابجایی عمودی در موقعیت های مربوط به میانه اسپن می باشد. با توجه به اینکه اتصال سیم مسنجر در پایه به صورت صلب می باشد، باعث کاهش الاستیسیته و به تبع آن موجب کاهش جابجایی عمودی سیم تماس می گردد. جابجایی عمودی سیم تماس در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت اندکی بیشتر از میزان جابجایی عمودی سیم تماس در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت می باشد که دلیل آن نوسانات بیشتر حاصله از حرکت سریع تر پانتوگراف می باشد.



شکل ۶ تغییرات جابجایی عمودی سیم تماس در اسپن های پنجم و ششم برای سرعت های ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت

در شکل ۷، تغییرات جابجایی عمودی سیم تماس برای پایه ششم و وسط اسپن ششم در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت مقایسه شده است. مطابق شکل، ابتدای نمودارها نزدیک به خط مستقیم می باشد که در این حالت پانتوگراف از سمت اسپن اول شروع به حرکت کرده است و با نزدیک تر شدن به موقعیت مورد نظر اندکی نوسان بیشتر می گردد. هنگام عبور پانتوگراف از موقعیت مورد نظر حداکثر جابجایی عمودی سیم تماس رخ می دهد و پس از عبور پانتوگراف سیم در موقعیت مورد نظر نوسان می کند. با مقایسه جابجایی عمودی سیم تماس در میانه اسپن و پایه، میزان جابجایی عمودی سیم تماس در میانه اسپن بیشتر می باشد و نوسان سیم تماس نیز پس از عبور پانتوگراف نسبت به موقعیت پایه بیشتر می باشد.

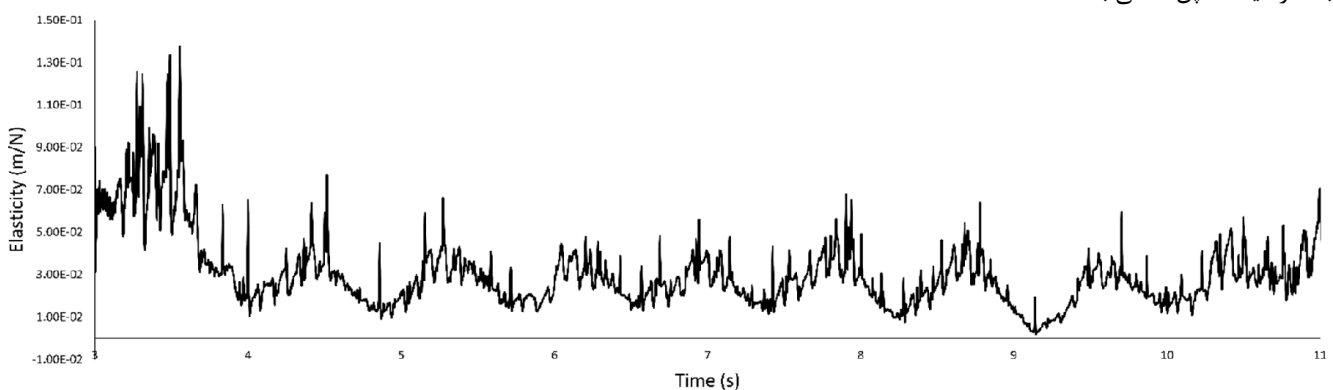


شکل ۷ تغییرات جابجایی عمودی سیم تماس برای پایه ششم و وسط اسپن ششم در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت

۶-۳ الاستیسیته:

الاستیسیته در شبکه بالاسری عبارت است از میزان انعطاف پذیری سیستم کاتنری در مسیر عمودی که معادل میزان جابجایی عمودی (بر حسب میلیمتر) سیم تماس به ازای هر نیوتن می باشد. میزان الاستیسیته خط برای سرعت های بالا برابر ۰/۵ میلی متر بر نیوتن می باشد [۱۵]. زمانی که در یک اسپن شکم اولیه وجود ندارد جابجایی عمودی سیم تماس در وسط اسپن بیشتر بوده و در نتیجه الاستیسیته در میانه اسپن بزرگتر از پایه ها می گردد. بنابراین شکم اولیه مانع از این جابجایی عمودی بیشتر در وسط اسپن گشته و موجب یکنواخت تر شدن الاستیسیته در طول اسپن می گردد. البته شکم اولیه تا سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت مفید می باشد و برای سرعت های بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت شکم اولیه در نظر نمی گیرند [۱۵]. میزان یکنواختی الاستیسیته در امتداد خط بازخورد مستقیمی در کیفیت یکنواختی نیروی تماسی منتجه از شبیه سازی دینامیکی دارد که در واقع ارتباط مستقیمی با ساختار طراحی شده برای سیستم کاتنری دارد.

تغییرات الاستیسیته برای کل خط در شکل ۸ رسم شده است. در ابتدای خط به دلیل جابجایی عمودی پانتوگراف و برخورد با سیم تماس و شروع حرکت در امتداد خط، نوسانات بیشتر می باشد. حرکت سینوسی نمودار در امتداد خط، به دلیل الاستیسیته پایین در موقعیت پایه ها و الاستیسیته بالا در میانه اسپن ها می باشد.



شکل ۸ تغییرات الاستیسیته برای ده اسپن شبیه سازی شده

۷ بحث و نتیجه گیری

نرم افزار آباکوس به عنوان یک نرم افزار المان محدود برای شبیه سازی تقابل بین سیستم کاتنری- پانتوگراف و حل رفتارهای غیرخطی انتخاب گردید. مدل عددی انتخاب شده قابلیت شبیه سازی حرکت قطار در امتداد یک خط (مستقیم یا منحنی) از سیستم کاتنری در محیط سه بعدی را دارد. مدل کاتنری- پانتوگراف با توجه به ورودی های ارائه شده توسط استاندارد EN 50318 طراحی و ایجاد شد. پانتوگراف به عنوان یک سیستم فنر-دمپر-جرم در نظر گرفته شد. مدل نهایی از طریق تعریف تماس بین پانتوگراف و سیستم کاتنری استخراج شده و معادله دینامیکی به روش انتگرال گیری زمانی حل گردید. سپس نتایج شبیه سازی جهت مقایسه با معیارهای ارائه شده در استاندارد EN 50318 استخراج شدند. مطابق

استاندارد، نتایج مدل شبیه سازی نیازمندی های استاندارد را رعایت کردند. بنابراین مدل پیشنهادی قابل اعتماد بوده و قابل استفاده برای پروژه های ریلی می باشد. به دلیل پیچیدگی سیستم های شبکه بالاسری و پانتوگراف، امکان تست در ابعاد واقعی وجود ندارد و با استفاده از مدل ارائه شده می توان با اعمال تغییرات در پارامترها، سیستم های کاتنری جدید و بهینه را تولید نموده و پانتوگراف های ابداعی جدید را تحقیق نمود.

۸ تشکر

در پایان از مجموعه شرکت آلوکاست ایران کمال تشکر و قدردانی را داریم که همکاری لازم را برای انجام این کار ارزشمند داشتند.

۹ مراجع

- [1]- Arnold, M. and Simeon, B., "Pantograph and catenary dynamics: a benchmark problem and its numerical solution," International Journal of Applied Numerical Mathematics, Vol. 34, pp. 345–362, 2004.
- [2]- Collina, A. and Bruni, S., "Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction," International Journal of Vehicle System Dynamics, Vol. 38, pp. 261–291, 2002.
- [3]- Wu, T. X. and Brennan, M. J., "Dynamic stiffness of a railway overhead wire system and its effect on pantograph-catenary system dynamics," International Journal of Sound and Vibration, Vol. 219, pp. 483-502, 1999.
- [4]- Lopez-Garcia, O., Carnicero, A. and Maroño, J. L., "Influence of stiffness and contact modelling on catenary pantograph system dynamics," International Journal of Sound and Vibration, Vol. 299, pp. 806-821, 2007.
- [5]- Benet, J., Alberto, A., Arias, E., and Rojo, T., "A Mathematical Model of the Pantograph-Catenary Dynamic Interaction with Several Contact Wires," International Journal of Applied Mathematics, Vol. 37(2), 2007.
- [6]- Teichelmann, G., "Modelling and simulation of railway cable systems," International Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 85(12), pp. 864-877, 2005.
- [7]- Jensen, C. N., "Dynamics of an Electrical Overhead Line System and Moving Pantographs," International Journal of Vehicle System Dynamics Supplement. Vol. 29(S1), pp. 104-113, 1998.
- [8]- Ramos, A., Jimenez-Octavio, J. R., Such, M., Carnicero, A. and Sánchez, C., "Dynamic simulation of the system pantograph-catenary vehicle-track," 9th World Congress on Railway Research, Francia, 2011.
- [9]- Mei, G., Zhang, W., Zhao, H., and Zhang, L., "A hybrid method to simulate the interaction of pantograph and catenary on overlap span," International Journal of Vehicle System Dynamics, Vol. 44, pp. 571-580, 2006.
- [10]- Qu, Y., "Modelling and simulation analyses of pantograph and catenary system in electric railway (in Chinese). Computer simulation, 30(6), pp. 202-360, 2013.
- [11]- Hao, X., "Modelling and simulation of pantograph and catenary system in urban rail transit (in Chinese)," International Journal of Computer simulation, Vol. 30(10), pp. 194-198, 2013.
- [12]- RTRI, Characteristic of pantograph and catenary (in Chinese). China CREC railway electrification bureau group, trans. Beijing: China railway publishing house, 2010.
- [13]- Bobillot, A., Cléon, L. M., Collina, A. Mohamed, O. and Ghidorzi, R., "Pantograph-Catenary: a High-Speed European couple," 8th World Congress on Railway Research, France, 2010.
- [14]- Li, J., "Overhead Line Simulation Research for Wire Tensile Forces Optimization," 1st International Workshop on High-speed and Intercity Railways, Springer Berlin Heidelberg, pp. 309-317, 2012.
- [15]- Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A. and Schneider, E., *Contact lines for electric railways planning, design, implementation, maintenance*, Publicis Corporate Publishing, Erlangen. Revised reprint 2012.
- [16]- Thorsten, S., Simulating the dynamic interaction between pantograph and catenary. Proc. of the 1st World Congress on Railway Research, UIC, 2001.
- [17]- Zhou, N., Lv, Q., Yang, Y. and Zhang, W., "<TPL-PCRUN> Statement of methods" International Journal of Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis, pp. 37-41, 2014.
- [18]- EN 50318, *Railway applications — Current collection systems — Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line*, 2002.
- [19]- EN 50119, *Railway applications — Fixed installations — Electric traction overhead contact lines*, 2009+A1:2013.