

شبیه‌سازی آزمون واژگونی اتوبوس O457 و اصلاح سازه آن به‌منظور ارضای شرایط آزمون

محسن اصفهانیان*، احسان کیبری** و سعید ضیائی راد***
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۸/۱۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۱۲/۱۹)

چکیده -

O457 (Rollover - ECE.66)

واژگان کلیدی :

-ECE66 -

Rollover Simulation and Required Structural Modification of O457 Bus

M. Esfahanian, E. Kabiri and S. Ziaei-Rad

Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology

Abstract: The present paper is to examine European rollover standard (ECE66) on O457 bus, using computer simulation method. Due to the huge size of the analyzed structure and unavailability of supercomputers and also according to the rollover

* - استادیار

** - دانشجوی کارشناسی ارشد

*** - دانشیار

regulation, the equivalent method, i.e., body section rollover test is selected. Also, because of impossibility of real test, the simulation results have been qualitatively compared with the existing experimental results. The extracted results show that deformation occurs mainly in the pillar-to-floor and pillar-to-roof joints, while the roof and chassis have small deformations. As the deformations in the body were greater than the standard level and the bus failed the test, suggestions were made to increase the body strength. The suggestions are based on the available capabilities and limitations of the production process.

Keywords: Finite element simulation, ECE66 standard, Rollover test, Bus.

۱- مقدمه

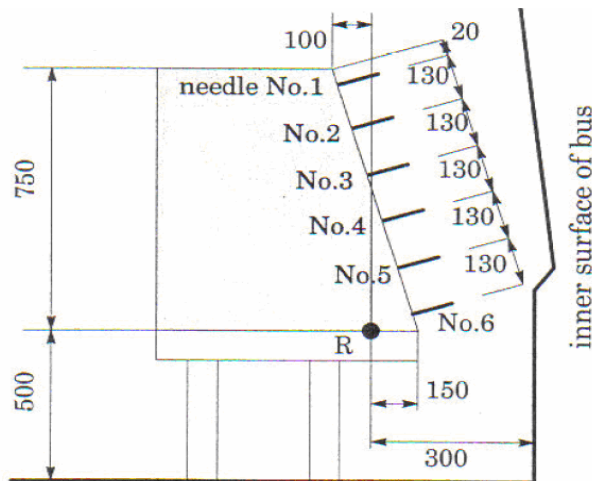
پیش‌بینی دقیق میزان استحکام ساختار وسایل نقلیه، برای تعیین میزان امنیت آنها و همچنین کاهش آسیبهای وارد شده به مسافری، ضروری است. شرکتهای خودروسازی در داخل و خارج از کشور، همواره در حال اصلاح طرحهای خود و ارائه مدل‌هایی جدیدند. بدین منظور تحلیل‌های متنوعی روی قسمتهای مختلف خودرو انجام می‌شود تا اجزای مختلف خودرو بتوانند عملکرد بهتری از خود نشان بدهند. آزمون واژگونی نیز یک آزمون دینامیکی است که برای سنجش میزان استحکام بدنه خودروها انجام می‌گیرد. در این میان رعایت استاندارد واژگونی در ساخت خودروها، در کشورهایی نظیر امریکا و سوئد اجباری شده و در سایر کشورهای پیشرفته اروپایی نیز حرکت به سوی این هدف جریان دارد. در این مقاله نیز با هدف افزایش امنیت مسافران در اتوبوسهای برون‌شهری، تلاش شده است تا به بررسی استاندارد اروپایی واژگونی، بر روی یکی از اتوبوسهای تولیدشده در داخل کشور پرداخته شود.

واژگونی نوعی تصادف است که در آن خودرو حداقل یک چهارم دور دوران می‌کند، صرف‌نظر از اینکه خودرو در پایان چرخش، بر روی پهلو یا سقف قرار گیرد و یا حتی دوران کامل کرده و بر روی تیرها قرار بگیرد [۱]. اغلب اوقات پدیده واژگونی هنگامی روی می‌دهد که وسیله نقلیه پس از ترک جاده با جدول یا حفاظ کنار خیابان یا چیزی شبیه آن برخورد کرده و به آن گیر کرده و به زمین می‌خورد^۱. درصد کمی از تصادفات واژگونی در اثر اصطکاک میان تیر و جاده است^۲. واژگونی‌های نوع دوم غالباً در اثر یک تغییر موقعیت ناگهانی در جاده مانند چرخشها یا تغییر مسیرهای سریع رخ داده و همچنین بیشتر تابع ویژگیهای فیزیکی وسیله نقلیه بوده

و قابل پیش‌گیری‌اند [۲]. احتمال پدیده واژگونی در وسایل نقلیه سنگین که مرکز ثقل آنها نسبت به خودروهای سبک در نقطه‌ای بالاتر از سطح زمین قرار دارد، بیشتر است [۳].

واژگونی وسایل نقلیه یکی از جدی‌ترین تصادفات جاده‌ای وسایل نقلیه است، چرا که احتمال آسیبهای منجر به مرگ در واژگونی نسبت به سایر تصادفات جاده‌ای بسیار بیشتر است. تحقیقات انجام‌شده در سالهای ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۱ نشان می‌دهد که علی‌رغم آنکه درصد تصادفات واژگونی در قیاس با سایر تصادفات خیلی کم است ۸٪، اما مرگ و میر ۳۱٪ و آسیبهای جدی وارد به مسافری ۲۱٪ در پدیده واژگونی، سهم عمده‌ای را در آسیبها و تلفات جاده‌ای به خود اختصاص می‌دهد. آمار و ارقام دقیقتر برای مقایسه درصد انواع تصادفات و نوع آسیبهای وارده، در شکل (۱) آورده شده است [۴].

واژگونی از مباحث روز دنیا بوده و قدمت چندان زیادی ندارد. ناوکی نی و دستیارش، در مقاله‌ای با عنوان روش تحلیل آزمون واژگونی در اتوبوسهای بزرگ، اقدام به انجام یک آزمون عملی و شبیه‌سازی رایانه‌ای براساس استاندارد اروپایی کرده و به تطابق خوبی میان جوابهای عملی با شبیه‌سازی انجام‌شده رسیدند. به‌منظور اندازه‌گیری میزان تغییر شکل ستونها در هنگام واژگونی، از یک سری نمونه‌های پلاستیکی به‌عنوان نمادی برای فضای سرنشینان^۳ استفاده کردند و تعدادی سوزن با اندازه مشخص، مطابق شکل (۲) کار گذاشتند و در پایان واژگونی با اندازه‌گیری میزان نفوذ سوزنها به داخل نمونه‌های پلاستیکی، مقدار دقیق تغییر شکل ستونها و نفوذ آنها به فضای ایمن سرنشینان معین شد. آنها به ارائه دو راهکار برای کاهش زمان محاسبات در شبیه‌سازی المان محدود پرداختند. اول آنکه قسمتهایی از

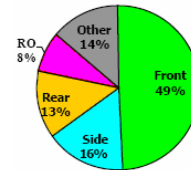


نمونه ای از فضای ایمن سرنشینان

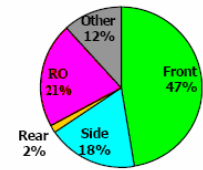
شکل ۲- اندازه گیری مقدار دقیق تغییرشکلها به کمک

سوزن [۵]

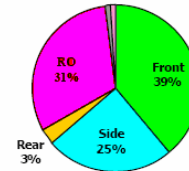
RO = RollOver



انواع تصادفات وسایل نقلیه
مورد ۲۸۱۰۰۰



سرنشینان به شدت آسیب دیده
۳۰۰۰۰ نفر در حادثه واژگونی



تلفات سرنشینان در حوادث
۱۰۱۲۸ نفر در حادثه واژگونی

شکل ۱- مقایسه درصد انواع تصادفات و نوع آسیبهای وارده به

سرنشینان [۴]

جدول ۱- درصد جرم کوپل شده به وسیله نقلیه درحین آزمون واژگونی [۶]

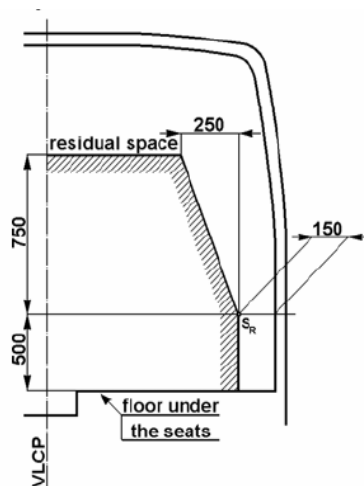
نوع اتصال	جرم کوپل شده به سازه
استقرار سرنشینان آزادانه روی صندلی	۲۰٪
اتصال سرنشینان در دو نقطه به صندلی	۷۰٪
اتصال سرنشینان در سه نقطه به صندلی	۹۰٪

است [۶].

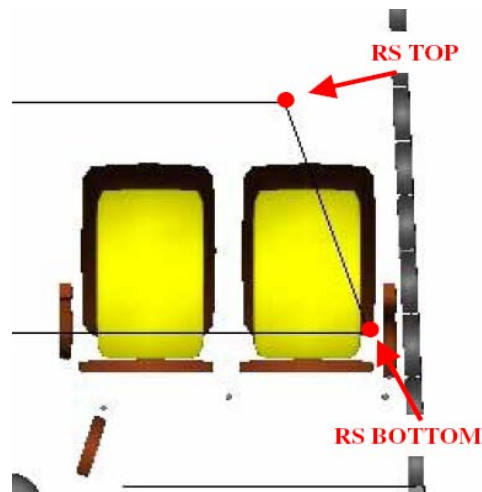
به منظور ارزیابی دقیق تأثیر نوع اتصال سرنشینان بر میزان تغییرشکل ساختار اتوبوس، آزمون واژگونی روی بخشی از سازه (مقطع-بدنه^۴) در شرایط مختلف اتصال سرنشینان به سازه، انجام شده و اجرام و آدمکهای استفاده شده به گونه ای انتخاب شدند که مرکز جرم آنها با واقعیت منطبق باشد. در حین انجام آزمون روی این بخش، دو نقطه بالایی و پایینی فضای سرنشینان که به ترتیب با RS TOP و RS Bottom در شکل (۳) مشخص شده است به عنوان معیاری برای اندازه گیری تغییرشکلهای ایجاد شده در سازه استفاده می شود. آنها به این نتیجه دست یافتند که حضور سرنشینان حتی در حالت آزاد باعث افزایش تغییرشکل سازه می شود. بنابراین کسب موفقیت در آزمون واژگونی در حالت نبود سرنشینان،

مدل که در آنها تغییرشکلهای اندک پدیدار می شود به صورت کلی و با المانهای صلب مدل شود. دیگر آنکه زمان انجام تحلیل کاهش یابد یعنی آنکه تحلیل سازه از لحظه قبل از برخورد با زمین آغاز شود. بدین منظور سرعت وسیله نقلیه قبل از برخورد نیاز است که امکان به دست آوردن آن از روی آزمون عملی و یا با تقریب خوبی توسط محاسبات وجود دارد [۵].

بلینگاردی، مارتلو و پرونی در نشستی در تورینو ایتالیا، به بررسی تأثیر صندلیها و نحوه اتصال سرنشینان در آسیبهای وارده در هنگام آزمون واژگونی پرداختند. در هنگام واژگونی تنها بخشی از جرم سرنشینان به سازه کوپل (متصل) می شود که این مقدار به نحوه اتصال به صندلیها بستگی دارد. در جدول (۱) درصد جرمهای کوپل شده بر اساس انواع اتصال، مشخص



شکل ۴- نمایش مقطع عرضی ویژگیهای فضای
سرنشینان [۷]



شکل ۳- تعیین دو نقطه به عنوان معیاری برای اندازه گیری
تغییرشکلهای سازه [۶]

تعلیق آن بلوکه شده و به آرامی (سرعتی کمتر از ۵ درجه بر ثانیه) به سمت نقطه ناپایداری حرکت می کند. آزمون واژگونی از نقطه ناپایداری وسیله نقلیه با سرعت زاویه ای تقریباً صفر شروع می شود و محور دوران از نقاط تماس تایر با زمین عبور می کند. وسیله نقلیه به داخل گودال کناری، که دارای سطحی از جنس بتون خشک و عمق اسمی ۸۰۰ میلی متر است، دوران و سقوط می کند. در لحظه ناپایداری، انرژی E_R بیانگر انرژی مرجع وسیله نقلیه بوده و مطابق با شکل (۵) و بر اساس معادله (۱) به دست می آید.

$$E_1 = M.g.h_1 = M.g.[0.8 + \sqrt{h_0^2 + (B \pm t)^2}] \quad (1)$$

که در آن،

M = جرم مؤثر وسیله نقلیه،

h_0 = ارتفاع مرکز ثقل وسیله نقلیه

t = فاصله عمودی مرکز جرم اتوبوس، تا صفحه عمودی مرکزی طولی

B = فاصله عمودی میان صفحه عمودی مرکزی طولی، تا محور دوران

g = ضریب شتاب گرانش زمین

h_1 = ارتفاع مرکز ثقل وسیله نقلیه در آغاز موقعیت ناپایداری

نسبت به صفحه افقی پایین گودال کناری.

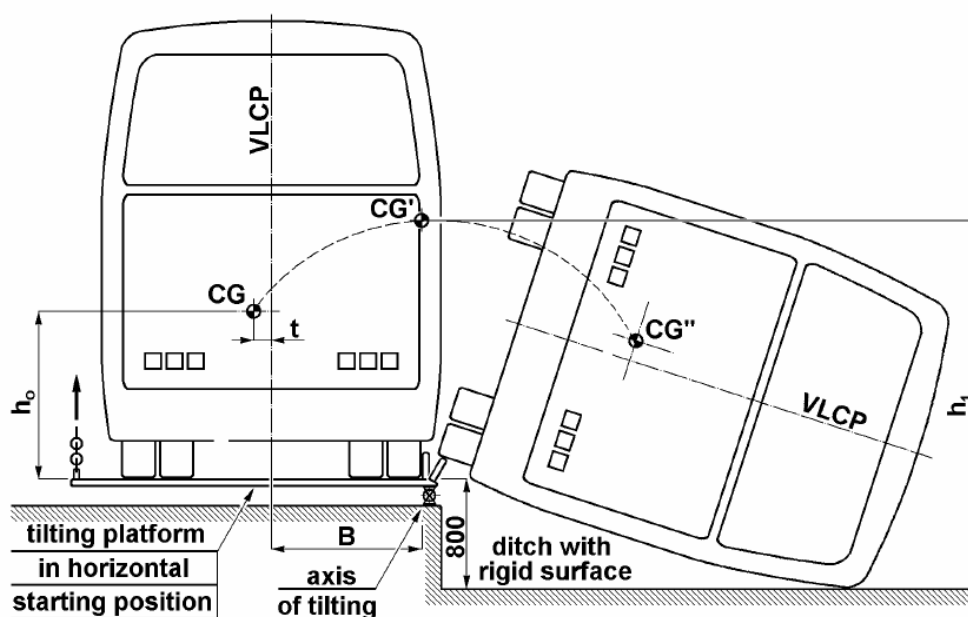
منجر به گذر از این آزمون در هنگام لحاظ کردن اثر مسافری، نمی شود [۶].

۲- استاندارد واژگونی ECE66

این آیین نامه در مورد وسایل نقلیه ای که برای حمل بیش از ۲۲ مسافر، علاوه بر راننده و خدمه، طراحی و ساخت شده اند به کار می رود، خواه مسافری ایستاده و یا نشسته باشند. مطابق با این استاندارد، ابرسازه^۵ وسیله نقلیه باید از استحکام کافی برخوردار باشند تا تضمین کنند که فضای سرنشینان در حین و پس از انجام آزمون واژگونی روی وسیله نقلیه کامل، بدون آسیب باقی بماند. به عبارت دیگر، هیچ بخشی از وسیله نقلیه که در آغاز آزمون بیرون از فضای سرنشینان قرار دارد (مانند ستونها، قفسه ها، طاقچه های باری و ...) نباید در حین آزمون به داخل محفظه سرنشینان نفوذ کند. محفظه سرنشینان با ایجاد یک صفحه متقاطع عمودی در میان وسیله نقلیه، مطابق با شکل (۴)، و حرکت این صفحه در امتداد طول وسیله نقلیه ایجاد می شود [۷].

روش اصلی آیین نامه برای انجام آزمون واژگونی به شرح زیر است:

کل وسیله نقلیه روی یک صفحه دوار قرار دارد که سیستم



شکل ۵- ویژگیهای آزمون واژگونی روی کل اتوبوس [۷]

اتوبوسهای برون شهری است، اما با توجه به یکسان بودن سازه و بدنه اتوبوس O457 با اتوبوس برون شهری C457 و همچنین به دلیل عدم دسترسی به نقشه‌ها و سایر اطلاعاتی از جمله جنس، وزن و موقعیت دقیق نصب هر کدام از اجزای اتوبوس برون شهری، شبیه‌سازی آزمون واژگونی بر روی اتوبوس O457 که مدارک آن در دست است انجام شده است. بیان تمام مشخصات و ویژگیهای قطعات مدلسازی شده در این مقال نمی‌گنجد. لذا به منظور آشنایی کلی، برخی از ویژگیهای اتوبوس O457 در زیر ارائه می‌شود:

- طول : ۱۱۹۷۵ میلی‌متر
- ارتفاع از زمین : ۲۹۸۰ میلی‌متر
- عرض : ۲۵۰۰ میلی‌متر
- ارتفاع داخل کابین : ۱۹۰۲ تا ۱۹۷۲ میلی‌متر
- فاصله دو محور : ۶۰۵۵ میلی‌متر
- وزن خالص : ۹۸۲۰ کیلوگرم
- بار مجاز روی اکسل جلو : ۶۰۰ کیلوگرم
- بار مجاز روی اکسل عقب : ۱۱۵۰۰ کیلوگرم
- وزن ناخالص مجاز : ۱۸۰۰۰ کیلوگرم

به جای انجام آزمون واژگونی مطابق با روش اصلی آیین‌نامه (یعنی انجام آزمون واقعی روی کل وسیله نقلیه)، بنا به تشخیص تولیدکننده، یکی از روشهای معادل آزمون می‌تواند انتخاب شود: الف. انجام آزمون واژگونی روی مقاطعی از بدنه که نماینده کل وسیله نقلیه باشد. ب. بارگذاریهای شبه‌استاتیکی روی قسمتهایی از بدنه. ج. شبیه‌سازی رایانه‌ای آزمون واژگونی.

۳- شبیه‌سازی آزمون واژگونی

قاعده کلی شبیه‌سازی آزمون واژگونی آن است که ابتدا یک آزمون عملی روی یک مقطع-بدنه انجام شده و همان آزمون با نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود. پس از دستیابی به فرضیات مناسب و نتایجی منطبق با آزمون عملی (به‌منظور بررسی صحت شبیه‌سازی انجام شده)، شبیه‌سازی روی کل سازه اتوبوس تعمیم می‌یابد. اما با توجه به محدودیتهای مالی موجود، و عدم امکان آزمون عملی، پس از انجام شبیه‌سازی روی سازه اتوبوس، نتایج به صورت کیفی با کارهای مشابه مقایسه شده است. نکته دیگر اینکه آزمون واژگونی مخصوص

می‌توان روند شبیه‌سازی را به سه بخش کلی تقسیم کرد: تهیه مدل مسئله، پیدا کردن سرعت برخورد و نهایتاً شبیه‌سازی برخورد سازه با زمین. توضیح اینکه مدل تهیه شده در ضمن ساده‌سازی، باید دقیق و دارای مرکز جرمی منطبق با واقعیت باشد چون سرعت برخورد اتوبوس با زمین که نقش اصلی در تغییرشکلهای ایجادشده را دارد، براساس گشتاور زاویه‌ای و مرکز ثقل سازه مدل‌شده تعیین می‌شود.

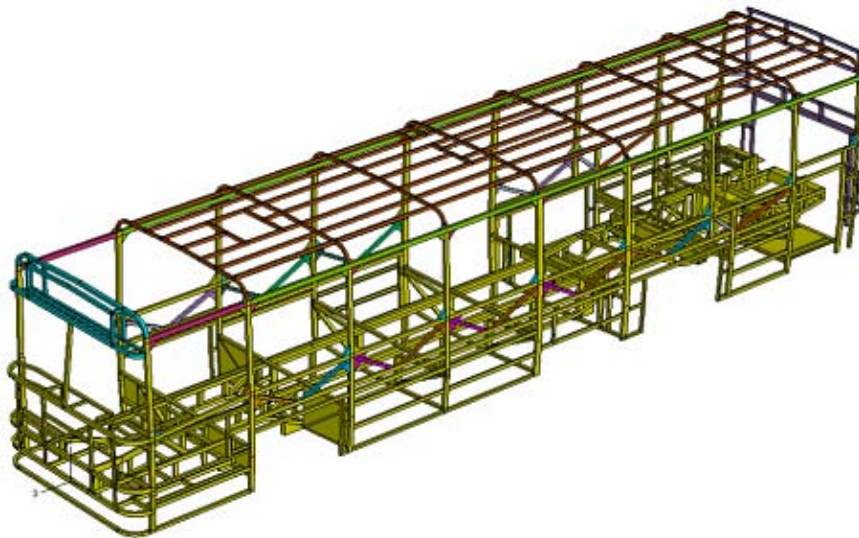
در تهیه مدل المان محدود، فقط بخشهایی که جزو ساختار اصلی هستند (در استحکام سازه در هنگام آزمون رول‌اور نقش اصلی دارند)، مدل می‌شوند و از اثر استحکام بخشی سایر اجزا مانند صندلیها، اتصالات در و پنجره‌ها و ... صرف‌نظر می‌شود [۷]، هر چند تأثیر وزن و ممان اینرسی دورانی آنها لحاظ خواهد شد. به عبارت دیگر قسمتهایی مانند موتور، تایرها، گیربکس، اکسل جلو و عقب، مسافران و راننده، مخزن سوخت و محتویات آن، سیالهای موجود در رادیاتور، گیربکس و ... در مدل مسئله دیده نمی‌شوند، بلکه اثر آنها به صورت جرمهای نقطه‌ای ثابت لحاظ می‌شود. پس از تهیه مدل هندسی به صورت پوسته، جرمهای نقطه‌ای در نقاط مختلف سازه، به کمک قید Tie به گونه‌ای اعمال می‌شوند که جرم کل و هم‌مین‌طور مرکز ثقل مدل المان محدود ایجادشده منطبق بر واقعیت باشد. این نکته را نیز باید لحاظ کرد که نیروی ناشی از این جرمها باید در محل درست اعمال شود، به عبارت دیگر از ایجاد گشتاورها و تنشهای کاذب ناشی از اثر جرمهای نقطه‌ای، تا حد ممکن دوری شده است.

شاسی و بدنه اتوبوس، به صورت اسکلت یکپارچه با پروفیل‌های طولی و عرضی است. این پروفیل‌ها توخالی و چهارگوش و جنس آنها از فولاد ST-52 می‌باشد. فولاد مذکور دارای استحکام تسلیم 500 MPa و استحکام نهایی 644 MPa می‌باشد. چگالی فولاد ST-52 برابر با 7850 Kg/m^3 بوده و مقدار مدول یانگ هم از شیب ناحیه الاستیک نمودار تنش- کرنش به دست می‌آید که برابر است با 207 GPa . مقدار ضریب پواسون هم که تقریباً برای تمام فولادها یکسان است، برابر با

0.3 منظور می‌شود. تقریباً تمام اتصالات موجود بین اعضا و قسمتهای ساختار اصلی، از نوع جوشکاریهای سرتاسری است. با توجه به تعداد زیاد این اتصالات، شبیه‌سازی نرم‌افزاری آنها کاری بس طاقت‌فرسا و دشوار است. نکته قابل توجه این است که ماده به کار رفته در جوشکاری از استحکام بالاتری نسبت به ماده به کار رفته در سازه یعنی ST-52 برخوردار است، در نتیجه در هنگام تغییرشکل سازه، تغییرشکلهای ایجادشده در ماده جوش به مراتب کمتر از ماده ST-52 است. بر اساس تحقیقات انجام شده و تجربیات به دست آمده، و با توجه به تعداد بسیار زیاد این اتصالات، می‌توان با یک فرض کاملاً منطقی این اتصالات را به صورت پیوسته و از همان جنس سازه یعنی ST-52 در نظر گرفت. در سازه‌های بزرگ مانند ساختار اصلی اتوبوس مورد نظر، هدف اصلی بررسی وضعیت اتصالات و برهمکنشهای موجود در آنها نبوده، بلکه استخراج تغییر شکلهای ایجادشده در کل سازه دنبال می‌شود. به طور خلاصه چنین می‌توان گفت که با فرض مذکور (مدل کردن قطعات به صورت پیوسته) علاوه بر ساده‌سازی و عملی کردن تحلیل، ضریب ایمنی حل مسئله بیشتر می‌شود چرا که عملاً استحکام اتصالات در شبیه‌سازی کاهش و تغییرشکلهای ایجادشده افزایش داده شده است.

ضریب اصطکاک بین سطوحی از اتوبوس که با کف زمین گودال کناری برخورد دارند، باید بر اساس آزمایشات تجربی و عملی به دست بیاید [۷]، اما با توجه به تحقیقات انجام شده و کارهای مشابه مقدار آن برابر با 0.3 فرض می‌شود. لازم به ذکر است با کاهش این عدد، تغییرشکلهای در حین شبیه‌سازی آزمون واژگونی کاهش می‌یابد.

در شکل (۶) تصویری از مدل اجزای محدود روسازه (اجزای اصلی) اتوبوس مذکور در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. در تهیه این مدل المانهای پوسته S4R به کار رفته است که یک المان پوسته متداول ۶ چهارگره‌ای کاهش یافته بوده و در هر گره دارای شش درجه آزادی است. این المان برای مدل کردن تغییرشکلهای بزرگ و غیرخطی مناسب است. استفاده از این



شکل ۶- مدل اجزای محدود اجزای اصلی اتوبوس

تحلیلی و نرم افزاری به دست آمده و با هم مقایسه شده اند. در روش تحلیلی با فرض ثابت بودن محور دوران در حین آزمون واژگونی، همچنانکه در معادله (۲) مشاهده می شود، داریم:

$$M.g.(h_1 - h_2) = \frac{1}{2} I.\omega^2 \quad (2)$$

که در آن،

M = جرم مؤثر وسیله نقلیه

g = ضریب شتاب گرانش زمین

h_1 = ارتفاع مرکز ثقل وسیله نقلیه در موقعیت ناپایداری نسبت به

صفحه افقی پایین گودال کناری، بر حسب متر

h_2 = ارتفاع مرکز ثقل وسیله نقلیه در لحظه قبل از برخورد با

زمین، نسبت به صفحه افقی پایین گودال کناری، بر حسب متر

I = مومنتم زاویه ای اتوبوس نسبت به محور دوران (در محل

تماس تایرها با زمین)، بر حسب Kg.m^2

ω = سرعت زاویه ای بر حسب رادیان بر ثانیه.

با جایگذاری مقادیر عددی در معادله (۲)، مقدار ω در لحظه

برخورد اتوبوس با زمین، برابر با $124/9$ درجه بر ثانیه به دست

می آید. برای اطمینان از صحت جواب به دست آمده، مسئله بار

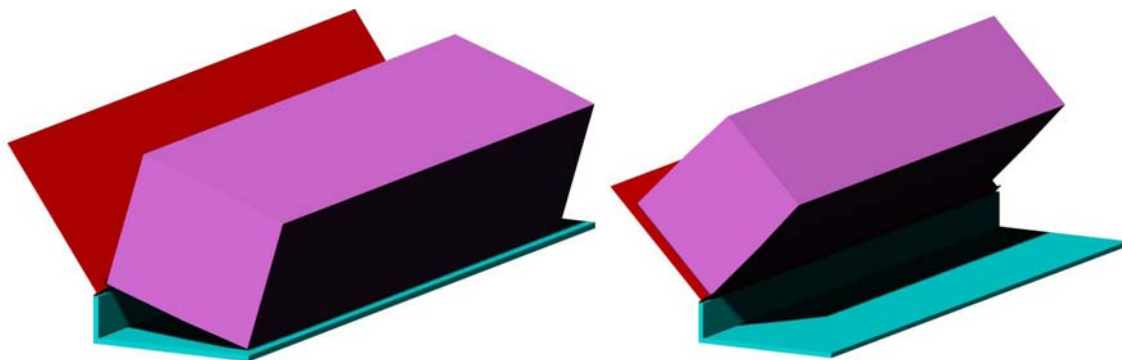
دیگر به کمک نرم افزار ویژوال نسترن شبیه سازی شده و سرعت

برخورد اتوبوس با زمین استخراج می شود. مطابق با شرایط

نوع المان، اولاً زمان حل مسئله را نسبت به المانهای سه بعدی آجری ۷ بسیار کمتر می سازد، ثانیاً مقاطع مورد تحلیل دارای ضخامت بسیار اندک در مقایسه با دو بعد دیگر بوده و در مواردی که یک بعد از بقیه ابعاد کوچکتر است می توان از المان پوسته استفاده کرد. نکته مهم در هنگام کاربرد این المان، بررسی انرژی به کار رفته در کنترل پدیده ساعت شنی ۸ است. به صورت یک قانون کلی، می توان چنین گفت که حالت ایدئال آن است که میزان انرژی صرف شده برای کنترل پدیده ساعت شنی، کمتر از پنج درصد انرژی داخلی کل باشد [۸].

دو روش برای انتگرال گیری در فرمول بندی المانهای پوسته وجود دارد، سیمپسون و گوس. روش گوس با سه نقطه انتگرال گیری در ضخامت المان پوسته، دقتی تقریباً مساوی با روش سیمپسون با پنج نقطه انتگرال گیری دارد. با انتخاب روش گوس با سه نقطه انتگرال گیری، علی رغم سرعت بالاتر، جوابها با کمتر از چند درصد تفاوت، به دست می آید، لذا کلیه قسمتها با روش گوس و با سه نقطه انتگرال گیری تحلیل می شود.

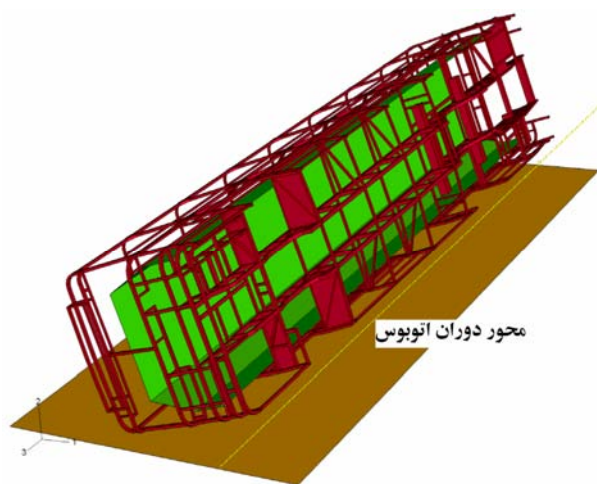
پس از تهیه مدل مسئله و استخراج مومنتم زاویه ای حول محور دوران (محل تماس تایرها با زمین)، سرعت برخورد اتوبوس در لحظه برخورد با کف گودال کناری به دو روش



شکل ۷- استخراج سرعت برخورد با زمین توسط نرم افزار

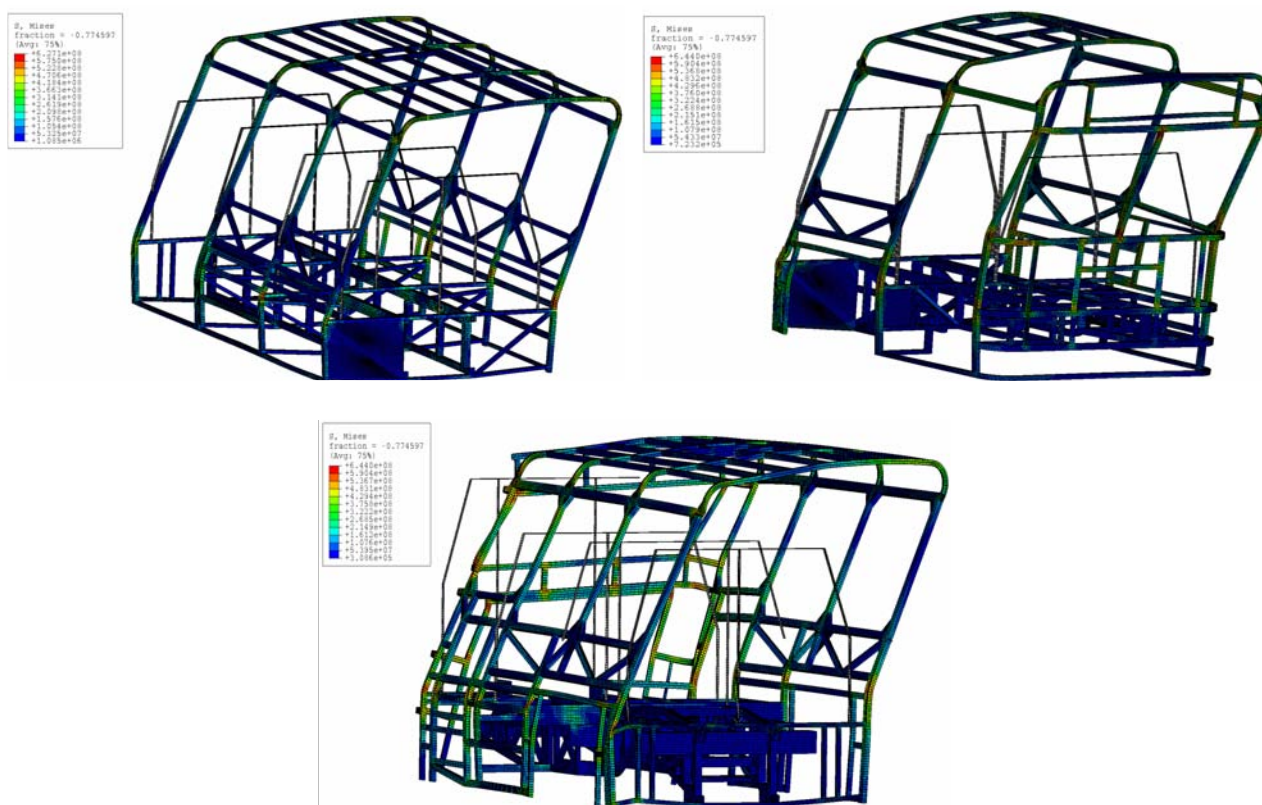
برخورد با زمین، سازه صلب فرض شده که با این فرض مرکز ثقل و ممان اینرسی دورانی حول مرکز ثقل ثابت بوده، اما بر خلاف روش تحلیلی بدیهی است که محور دوران در حین واژگونی ثابت نیست. سرعت دوران به دست آمده از این روش ۱۲۱ درجه بر ثانیه است که تفاوت چندانی با نتیجه به دست آمده از روش تحلیلی ندارد. اختلاف ناچیز میان نتایج، علاوه بر صحت نتایج، حاکی از منطقی بودن فرض استفاده شده در روش تحلیلی، مبنی بر ثابت بودن محور دوران در حین واژگونی است. لذا در فرایند شبیه سازی برخورد سازه با زمین، به منظور ساده سازی در اعمال سرعت اولیه اتوبوس در لحظه برخورد با زمین، از فرض ثابت بودن محور دوران در حین واژگونی و سرعت برخورد ۱۲۴/۹ درجه بر ثانیه استفاده شده و از خطای نسبی ۳/۲ درصدی، صرف نظر شده است. با داشتن سرعت دورانی، برخورد سازه مدل شده با زمین توسط نرم افزار آباکوس صریح^۹ انجام شده است. سازه مورد نظر به همراه فضای سرنشینان در شکل (۸) مشاهده می شود.

برای شبکه بندی سازه نشان داده شده، از المانهای مربعی با اندازه ۲۰ میلی متر استفاده شده است، یعنی در پهنای یک ستون حداقل دو المان وجود دارد (لازم به ذکر است هنگام کاربرد المانهای ریزتر، کمتر از ۵ درصد تغییر در نتایج مشاهده شد). با این ابعاد، در کل ساختار بیش از نیم میلیون المان تشکیل می شود. از آنجا که چنین تحلیلی با رایانه های معمولی ناممکن است، سازه به سه مقطع-بدنه جلویی، وسطی و عقبی تقسیم شده و شبیه سازی برخورد روی هر قسمت



شکل ۸- نمایش اتوبوس و فضای سرنشینان در لحظه برخورد با زمین

آیین نامه همچنانکه در شکل (۵) مشاهده شد، یک مدل صلب در نرم افزار ویزوال نسترن به گونه ای تهیه شده که مرکز ثقل و ممان اینرسی دورانی آن منطبق با واقعیت باشد. مدل تهیه شده بر روی یک صفحه دوار که با سرعت ۵ درجه بر ثانیه دوران کرده و مشخصات هندسی آن از جمله ارتفاع، پهنای شعاع انحنای سر پله گیردار، کاملاً مشخص است [۷]، قرار می گیرد. با دوران صفحه و رسیدن به نقطه تعادل ناپایدار، همچنانکه در تصویر سمت راست شکل (۷) مشاهده می شود، اتوبوس تحت اثر نیروی گرانش و سرعت اولیه از صفحه دوار جدا شده و شروع به واژگونی می کند. در تصویر سمت چپ شکل (۷) نیز لحظه برخورد اتوبوس با زمین مشاهده می شود. لازم به ذکر است به دلیل کوچک بودن تغییرشکلهای ایجاد شده تا قبل از



شکل ۹- شکل تغییرشکل یافته سه مقطع-بدنه جلویی، میانی و عقبی

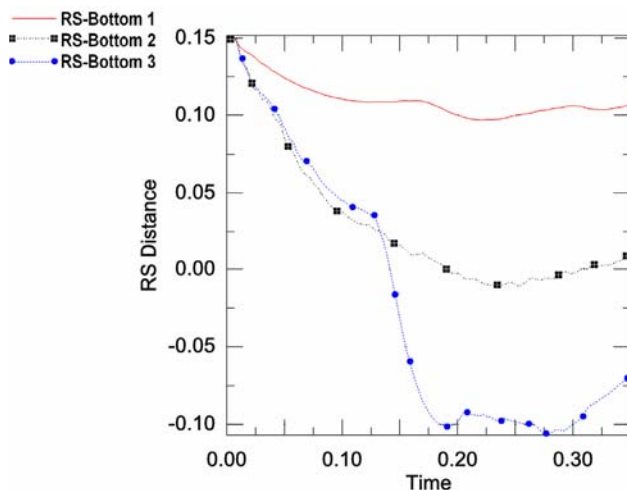
تصویر (۹) مشاهده می‌شود. چنانچه در این شکل دیده می‌شود، فضای سرنشینان که تنها معیاری برای اندازه‌گیری تغییرشکلهای ایجادشده در ستونهاست، فقط در مقابل ستونها مدل شده است، این کار به دلیل کاهش تعداد المانها و افزایش سرعت تحلیل است.

تغییرشکل هر یک از ستونها، در هر مقطع-بدنه به صورت مجزا و در دو نقطه بالایی و پایینی در طول آزمون واژگونی استخراج شده و در شکلهای (۱۰) تا (۱۵) آورده شده است. از تصاویر و نمودارها مشخص است که در هنگام برخورد با سطح زمین، با گذر زمان تغییرشکل ستونها و نفوذ آنها به داخل فضای سرنشینان بیشتر می‌شود. اما پس از چندی، به علت برگشت پذیری تغییرشکلهای الاستیک ایجادشده، مقدار نفوذ به داخل فضای سرنشینان کمتر می‌شود. این پدیده (حداکثر تغییرشکل) بسته به تفاوت‌های موجود در مدل هندسی و جرمهای متصل شده، در هر یک از ستونها، در زمانهای متفاوتی

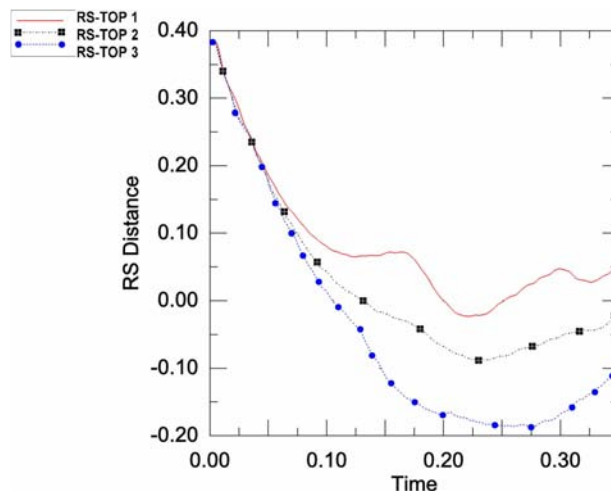
به طور جداگانه انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، به استناد آیین‌نامه روش آزمون واژگونی روی مقطع-بدنه اتخاذ می‌شود. شکل هندسی و پیچیدگیهای بخشهای مختلف سازه و همچنین محدودیت در تعداد المانها در اینکه سازه به چند بخش تقسیم گردد دخالت دارد.

با توجه به آن که مجموع جرم مقطع-بدنه‌های مورد تحلیل، از جرم کل سازه بزرگتر است [۷] و همچنین استحکام هر یک از بخشها به طور منفصل بررسی می‌شود، بدیهی است که تحلیل روی مقطع-بدنه، بررسی و طراحی مجدد را به سوی امنیت و ضریب ایمنی بالاتری سوق می‌دهد. به عبارت دیگر آزمون واژگونی روی مقطع-بدنه، روش محافظه کارانه تأیید آزمون واژگونی است، بنابراین در صورتی که سازنده این روش را برگزیند، سطح ایمنی تأیید آزمون، مساوی یا بیشتر از هنگام انجام آزمون به شیوه اصلی آیین‌نامه خواهد بود [۹].

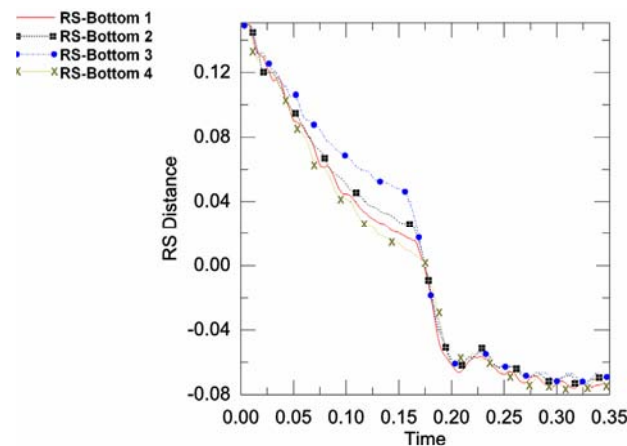
فرم تغییرشکل یافته سه مقطع-بدنه جلویی، میانی و عقبی در



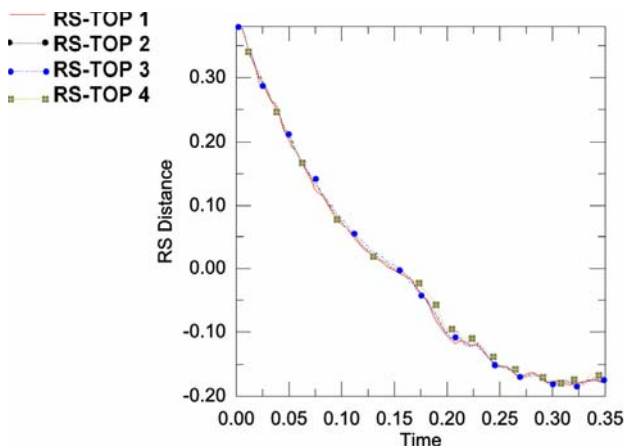
شکل ۱۱- فاصله RS BOTTOM بر حسب زمان برای ستونهای
مقطع-بدنه جلویی



شکل ۱۰- فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای
مقطع-بدنه جلویی



شکل ۱۳- فاصله RS Bottom بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-
بدنه وسطی

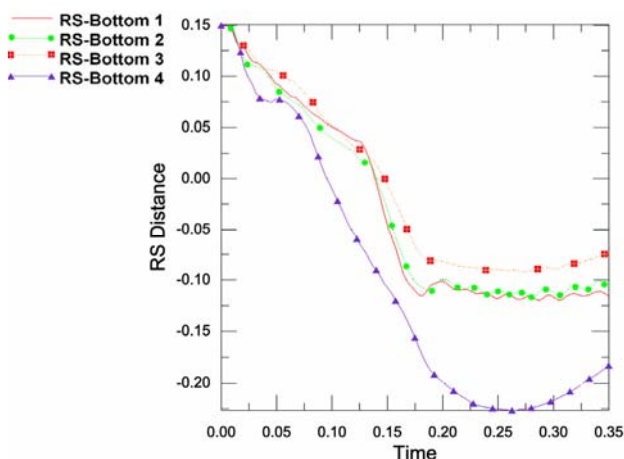


شکل ۱۲- فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-
بدنه وسطی

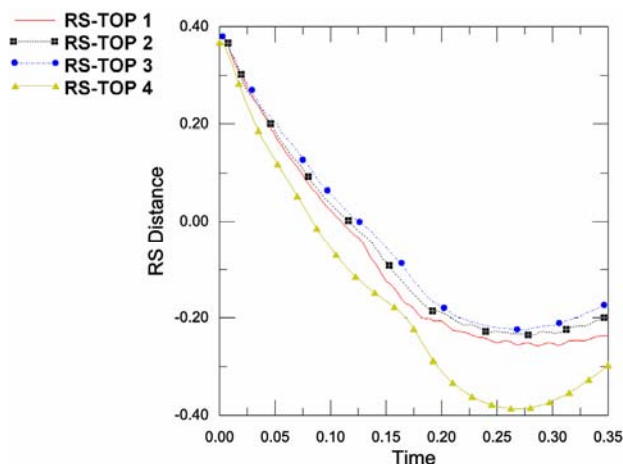
۴- بحث و بررسی نتایج

از شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشخص است که در مقطع-بدنه جلویی، به‌خاطر اثر استحکام‌بخشی ساختار جلوی اتوبوس، ستون یک کمترین و به‌دلیل اثر وزن اکسل جلویی، ستون سوم بیشترین تغییر شکل را دارد. ساختار مقطع-بدنه میانی تقریباً در تمام قسمت‌ها یکنواخت بوده و تغییر شکل ستونها در این بخش، همچنان که در تصاویر (۱۲) و (۱۳) ملاحظه می‌شود، یکسان است. اما مطابق با شکل‌های (۱۴) و (۱۵) بیشترین تغییر شکل‌ها در ساختار عقبی و به‌علت استقرار عمده جرم‌های سنگین در

روی می‌دهد. همچنین در برخی ستونها، حداکثر نفوذ به داخل فضای سرنشینان به‌وضوح قابل رؤیت بوده و در برخی دیگر، بازگشت تغییر شکل‌های الاستیک محسوس نیست. لازم به‌ذکر است که نفوذ سطح داخلی ستونها به سطح بیرونی فضای سرنشینان، هنگامی است که فواصل مربوط به RS TOP و RS BOTTOM مقادیر منفی داشته باشند، یعنی در نمودارهای ۱۰ تا ۱۵، گذر منحنی به زیر خط صفر، نشانگر فاصله منفی یا نفوذ به داخل فضای سرنشینان می‌باشد.



شکل ۱۵- فاصله RS BOTTOM بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه عقبی

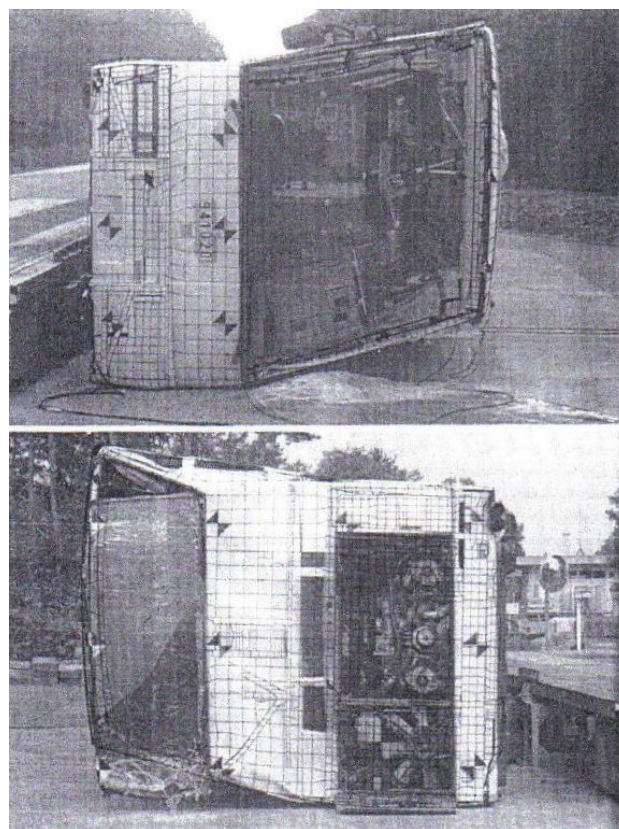


شکل ۱۴- فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه عقبی

در این قسمت فضای سرنشینان به علت موقعیت مسافری در عقب اتوبوس، نسبت به بقیه جاها مرتفعتر (بزرگتر) است.

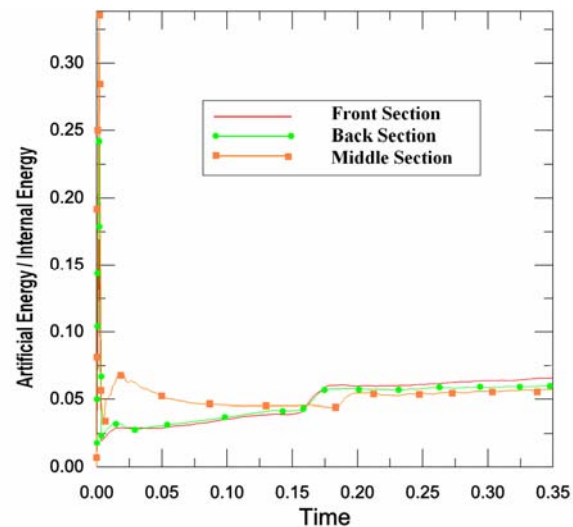
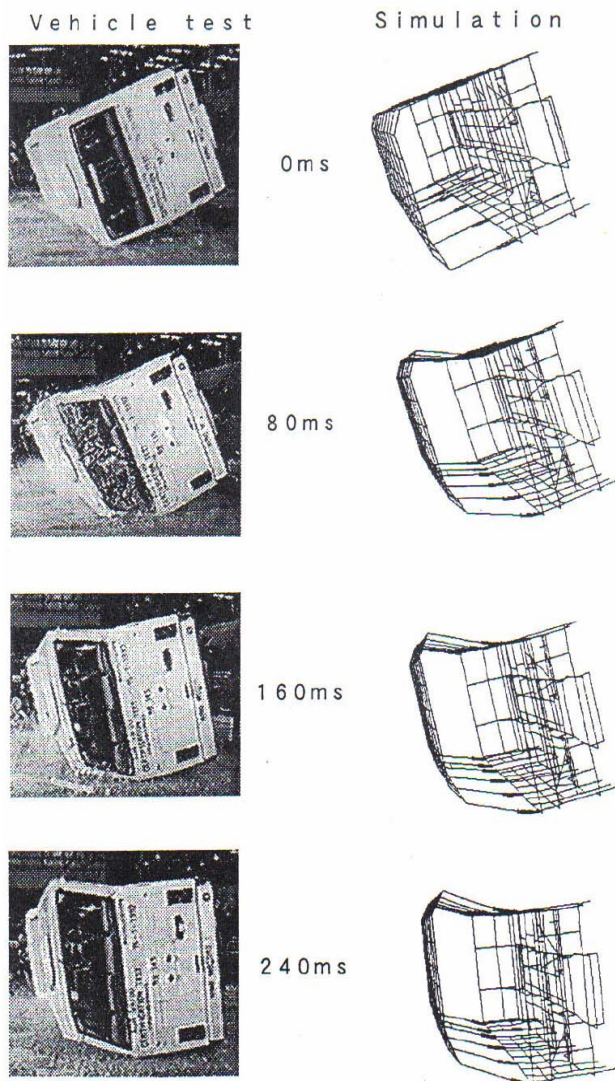
در شکل (۱۶) تصویری از شکل تغییرشکل یافته یک اتوبوس در پایان آزمون واژگونی، آورده شده است. در نتایج به دست آمده تغییرشکل در سمتی که با زمین برخورد کرده، فقط به میزان اندکی بیش از سمت مخالف بوده است. همچنین عمده تغییرشکلها در ستونها و اتصال آنها با ساختار سقف و کف اتوبوس مشاهده شده است. نتایج حاصل از آزمون عملی واژگونی نشان می دهد که تغییرشکلها در جلوی اتوبوس عمدتاً در اتصالات ستون به سازه کف و سقف روی داده و تغییرشکلها در سقف اتوبوس کم است. نمای پایینی بیانگر آن است که موتور، متعلقات آن و سیستم تعلیق از تغییرشکلهای عمده به دور بوده و مخزن سوخت پس از آزمون هیچ گونه نشانی نداشته و آسیبی به سیمها و اتصالات برقی هم نرسیده است [۵].

در شکل (۹) که شکل تغییرشکل یافته مقاطع مورد تحلیل نشان داده شد نیز ویژگیهای فوق به چشم می آید، یعنی عمده تغییرشکلها در ستونها و محل اتصال آنها با کف یا سقف پدیدار شده و تغییرشکلها در سقف و شاسی کمتر است.



شکل ۱۶- نمای جلو و پشت از شکل تغییرشکل یافته یک اتوبوس در پایان آزمون [۵]

این مقطع مشاهده می شود. در این مقطع بیشترین مقدار تداخل به فضای سرنشینان در ستون آخر رخ می دهد چرا که



شکل ۱۷- نسبت انرژی مصنوعی به انرژی داخلی بر حسب زمان

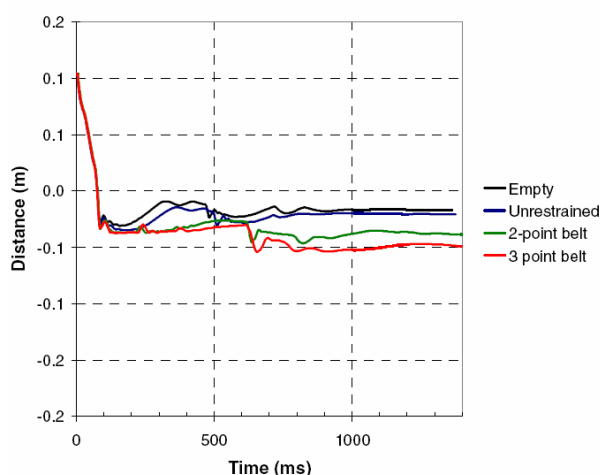
در شکل (۱۷) نسبت انرژی مصنوعی (انرژی تلف شده برای کنترل پدیده ساعت شنی) به انرژی داخلی بر حسب زمان برای تحلیل‌های انجام شده نشان داده شده است. این نسبت باید کمتر از ۵ درصد باشد [۸] که در شکل (۱۷) این مقدار به ۶/۵ درصد هم می‌رسد. علت این امر درشت بودن اندازه المانهاست، یعنی با کاهش اندازه المانها می‌توان درصد انرژی مصنوعی را هم کاهش داد. نکته دیگر اینکه مقادیر زیاد و پرشهای اولیه موجود در نمودار ناشی از خطاهای عددی بوده و قابل چشمپوشی است [۸].

به منظور مقایسه کیفی جوابهای به دست آمده، در ادامه نمونه‌هایی از نتایج مربوط به آزمون واژگونی ارائه می‌شود. در شکل (۱۸) نتایج مربوط به شبیه‌سازی آزمون واژگونی و مقایسه آن با آزمون عملی، برای یک نمونه اتوبوس آورده شده است [۱۰]. آنچه در تصویر دیده می‌شود، حاکی از انطباق کامل مدل با نمونه واقعی است. در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نیز فواصل مربوط به RS TOP و RS BOTTOM برای آزمون انجام شده روی یک مقطع-بدنه مشاهده می‌شود [۶]، که با آنچه در نمودارهای (۱۰) تا (۱۵) مشاهده شد، مطابقت خوبی دارد.

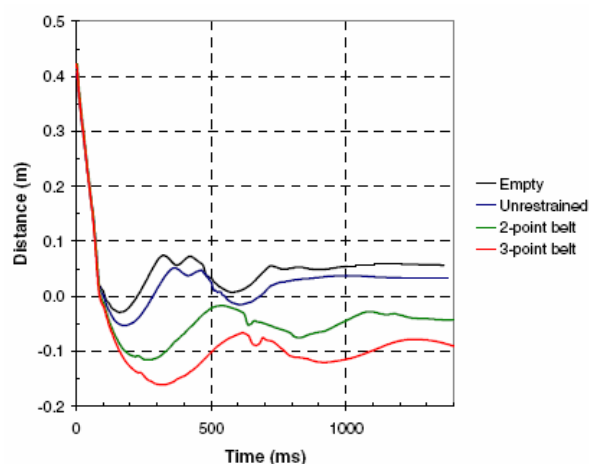
شکل ۱۸- تطابق نتایج شبیه‌سازی رایانه‌ای با نتایج عملی [۱۰]

۵- اصلاح سازه اتوبوس به منظور ارضای شرایط آزمایش واژگونی

با توجه به عدم وجود نظریه‌ها و فرمولهای لازم برای محاسبه تغییرشکلهای الاستیک و پلاستیک در سازه‌های پیچیده، تحت بارگذاریهای ضربه‌ای، به کمک نرم‌افزارهای المان محدود و با سعی و خطا می‌توان به اصلاح طرحهای موجود پرداخت. برای کاهش تغییرشکل ستونها و افزایش استحکام قسمتهای تحلیل شده در آزمون واژگونی، پیشنهاداتی براساس تجربیات مهندسان خط تولید اتوبوس و همچنین امکانات اجرایی و مالی موجود



شکل ۲۰- فاصله میان ستونها با نقطه پایینی در حین آزمون [۶]

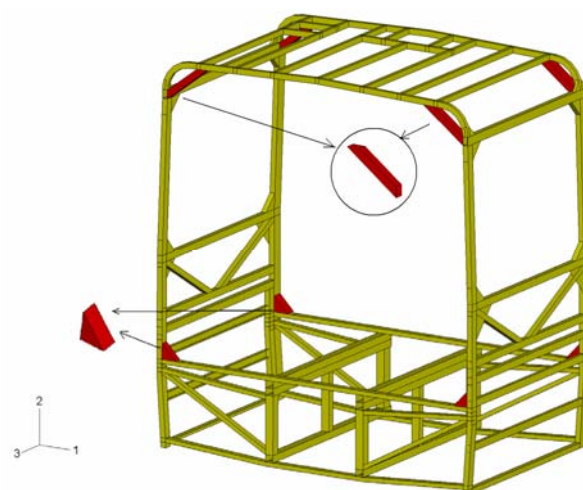


شکل ۱۹- فاصله میان ستونها با نقطه بالایی در حین آزمون [۶]

اتصال ستونها به سقف و شاسی، مطابق با شکل (۲۱) است. با انجام این تحلیل مشاهده شد که این روش مانع از نفوذ ستونها به داخل فضای سرنشینان نمی‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از ریه‌های بزرگتر، به دلیل تأثیر گذاری کم و ایجاد محدودیتهایی در کابین مسافری توصیه نمی‌شود.

دیگر پیشنهاد به منظور افزایش استحکام بدنه اتوبوس، استفاده از ستونهای با ضخامت بیشتر است. توضیح آنکه در ساخت ستونهای فعلی اتوبوس از پروفیلهایی با ضخامت دو میلی‌متر استفاده شده است. با وجود آنکه این روش مؤثر به نظر می‌رسد، اما محاسبات نشان داده که برای قسمتهایی که تغییر شکل آنها زیاده‌تر است، پروفیلهایی با ضخامت سه میلی‌متر هم جوابگو نیست، از طرفی به دلیل نیاز به خمکاری در پروسه تولید ستونها، ضخامتهای بالاتر مشکلاتی را در روند تولید به وجود می‌آورد. با این توضیحات این روش نمی‌تواند چندان قابل قبول باشد.

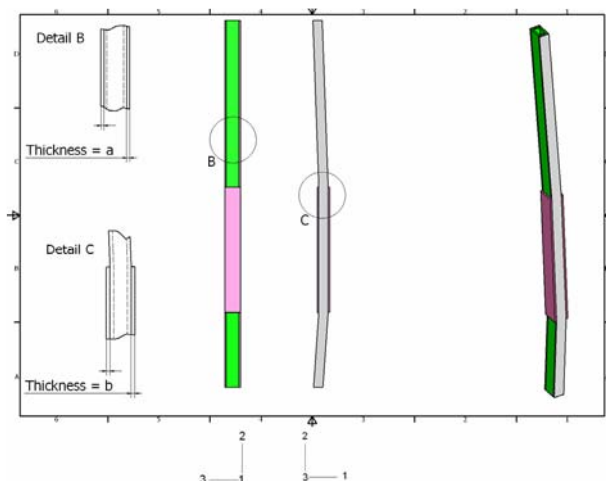
یک راهکار مؤثر برای افزایش استحکام سازه مورد تحلیل استفاده از ستونهای دوگانه مطابق با شکل (۲۲) است. نتایج تحلیل آزمون واژگونی روی مقطع-بدنه نشان داده شده در شکل (۲۲) حاکی از آن است که تغییر شکل ستونها بسیار کمتر شده و دیگر نفوذ به داخل فضای سرنشینان وجود ندارد. البته استفاده از این روش برای بهینه‌سازی بدنه اتوبوس، مستلزم



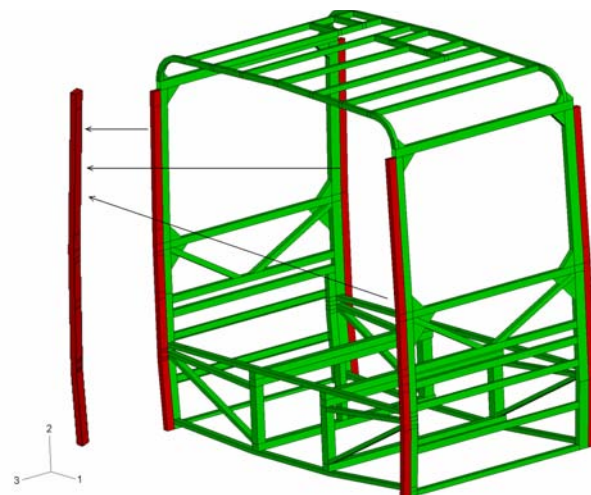
شکل ۲۱- تقویت ستونها در محل اتصال با سقف و شاسی

در کارگاههای تولیدی ارائه و بررسی شده است. یک راهکار قابل قبول شامل طرحها و فرضیاتی است که به اندازه کافی در افزایش استحکام و کاهش تغییرشکلها مؤثر بوده و ساخت آنها بر اساس امکانات فعلی موجود در کارگاههای تولید در داخل کشور امکانپذیر باشد، و از طرف دیگر مشکلی در عملکرد ساختار فعلی اتوبوس ایجاد نکند. همچنین حداقل تغییر ممکن را در سازه فعلی ایجاد کند. به منظور تسریع در روند شبیه‌سازی، ابتدا تأثیر راهکارهای پیشنهادی روی یک مقطع-بدنه کوچکتر بررسی شده است.

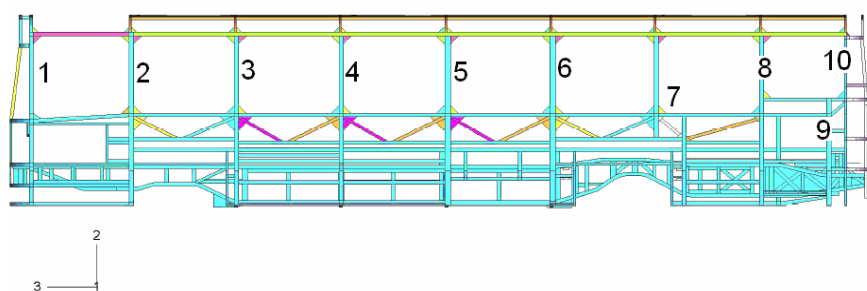
یک پیشنهاد استفاده از صفحات و ریه‌های کمکی در محل



شکل ۲۳- نمایش یک ستون تقویت شده که صفحات کمکی به آن جوش خورده اند



شکل ۲۲- کاربرد ستونهای دوگانه برای افزایش استحکام سازه



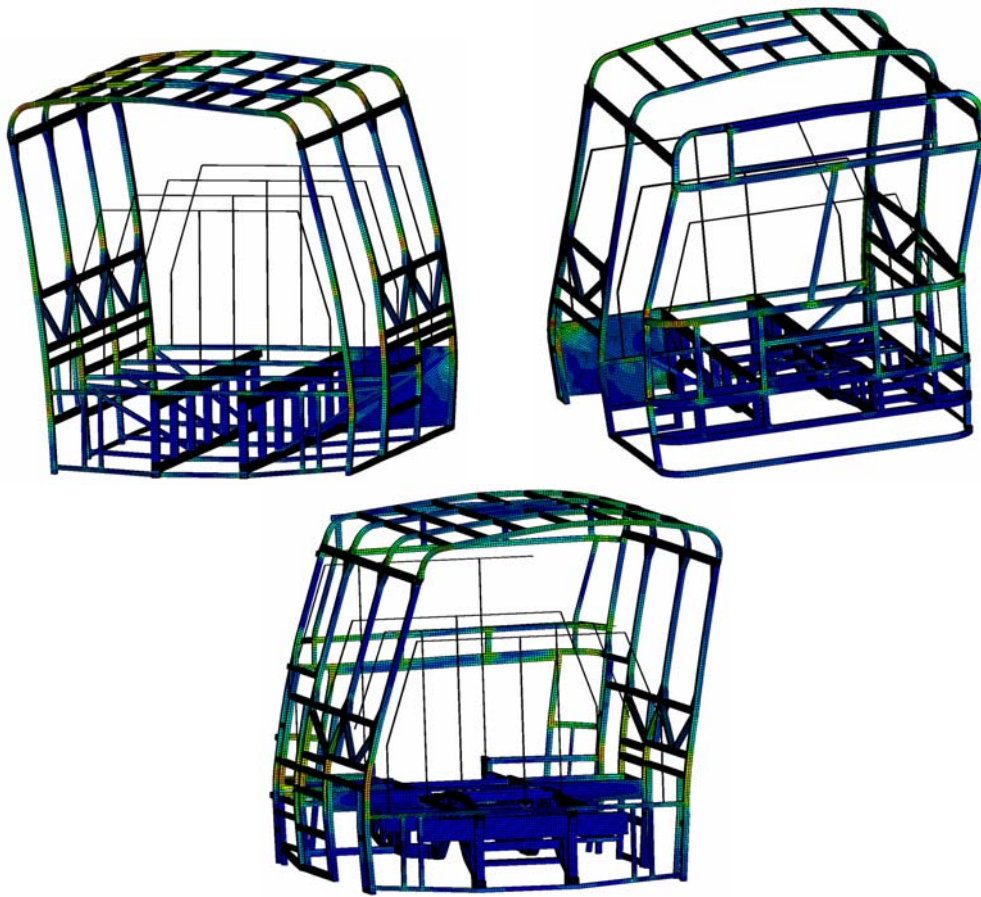
شکل ۲۴- شماره گذاری زوج ستونهای اتوبوس از جلو به عقب

ستونها به حد کافی افزایش یابد. در هر حال شرط استفاده از این راهکار این است که به همان اندازه که ضخامت ستونها زیاد می شود، طول لینکهای اتصالاتی بین ستونهای مجاور و همچنین اعضای که شاسی را به ستونها وصل می کنند، به اندازه کافی کوتاه تر شوند. البته این تغییر ابعاد در حدود چند میلی متر بیشتر نیست.

در شکل (۲۴) نمایی از بدنه اتوبوس، که در آن ستونها از جلو به عقب شماره گذاری شده اند مشاهده می شود. لازم به ذکر است که ستونها در سمت چپ و راست اتوبوس (قبلاً گفته شد) که چپ و راست نسبت به موقعیت راننده تعیین می شود) یکسان اند و هر گونه تغییر روی هر یک از زوج ستونهای متقابل اول تا دهم، یکنواخت است. با این توضیحات

تغییر طول لینکهای اتصالاتی و ابعاد پنجره هاست. با در نظر گرفتن شرایط فعلی موجود در گارگاه ساخت بدنه اتوبوس در شرکت ایران خودرو دیزل، این امر امکان پذیر و بی نیاز از هزینه های اضافی جهت تغییرات اساسی در مراحل ساخت است.

روش دیگری که به منظور استحکام بخشی بیشتر قبلاً در بخشهایی از شاسی، با موفقیت به کار رفته است، جوش دادن صفحات کمکی به منظور تقویت ستونهاست. این روش از نظر استحکام بخشی تقریباً معادل روش قبلی یعنی به کار بردن ستونهای ضخیم تر است، با این تفاوت که در این روش مشکلات مربوط به خمکاری پروفیل های ضخیم وجود ندارد. با توجه به شکل (۲۳) می توان ورقهایی با ضخامت مورد نیاز را در محل اتصال ستونها با سقف و شاسی، جوش داد تا استحکام



شکل ۲۵- شکل تغییرشکل یافته سه مقطع-بدنه پس از بهینه سازی

ستون مشابه است. مطابق با شکل (۲۳) مقدار a و b برابر با ۲ میلی متر است.

ث. **ستونهای ششم تا دهم:** این ستونها به دلیل اینکه عمده وزن اتوبوس را تحمل می کنند و در حین آزمون واژگونی تغییر شکلهای بیشتری نشان می دهند، نیاز به صفحات تقویتی ضخیمتر دارند. بدون منظور با توجه به شکل (۲۳) مقدار a و b برابر با ۴ میلی متر برای ضخامت صفحات تقویتی به کار رفته در این ستونها استفاده می شود.

با اعمال این تغییرات، حداکثر تغییرشکل در سه مقطع-بدنه جلویی، وسطی و عقبی کاهش یافته و در حین آزمون واژگونی، دیگر تداخلی میان ستونها و فضای سرنشینان وجود ندارد. در تصویر (۲۵) شکل تغییرشکل یافته سه مقطع-بدنه جلویی، میانی و عقبی پس از بهینه سازی مشاهده می شود. میزان تغییر شکل

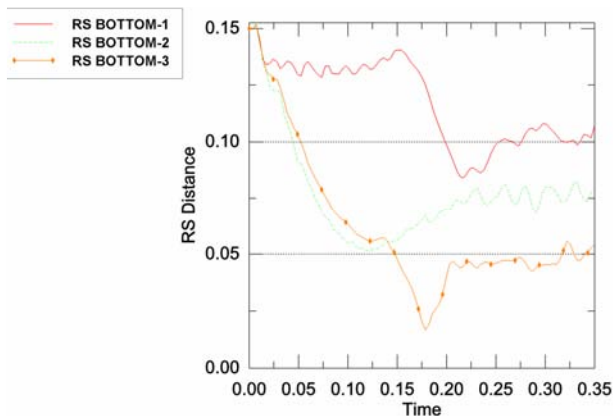
تغییرات اعمال شده روی هر یک از زوج ستونهای اول تا دهم بدین شرح است:

الف. ستون اول: هیچ گونه تغییری در زوج ستون شماره یک نیاز نیست، چرا که علاوه بر اتصالات و لینکهای موجود در قسمت جلوی اتوبوس که خود جنبه استحکام بخشی فراوان دارد، بهینه سازی ستون دوم، افزایش استحکام و کاهش تغییرات ستون یکم را به دنبال دارد.

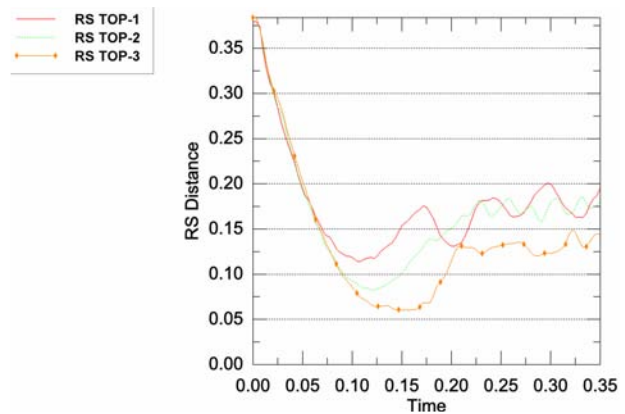
ب. ستون دوم: با توجه به شکل (۲۳)، مقدار a برابر با ۲ میلی متر بوده و از صفحات با ضخامت b استفاده نشده است.

پ. ستون سوم: در این جا از ستون دوگانه به همراه صفحات تقویتی استفاده شده است. در این جا از سه صفحه تقویتی با ضخامت a استفاده شده است. مقدار a و b برابر با ۲ میلی متر است.

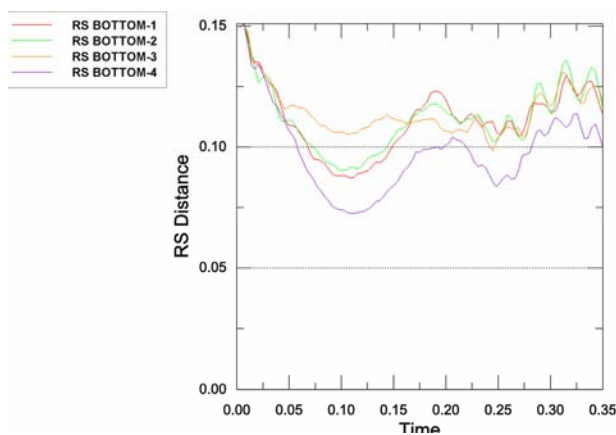
ت. ستونهای چهارم و پنجم: تغییرات اعمال شده روی این دو



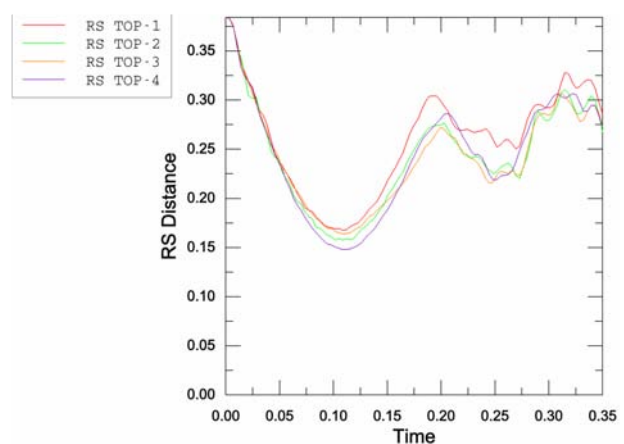
شکل ۲۷- نمودار فاصله RS BOTTOM بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه جلویی بهینه شده



شکل ۲۶- نمودار فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه جلویی بهینه شده



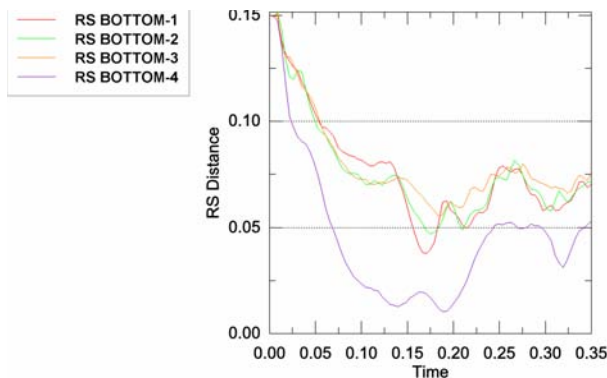
شکل ۲۹- نمودار فاصله RS BOTTOM بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه وسطی بهینه شده



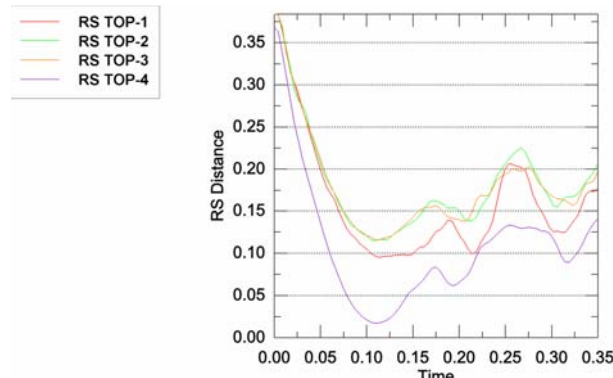
شکل ۲۸- نمودار فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه وسطی بهینه شده

شبهه‌سازیه‌ای انجام شده، یک بار دیگر هر یک از تحلیلها با شبکه‌بندی ریزتر انجام می‌گیرد. منظور از شبکه‌بندی ریزتر دو برابر کردن تعداد المانها در نقاطی است که دارای تغییرشکلهای بزرگ هستند، مانند ستونها و محل اتصال آنها با سقف و شاسی. لذا در حین مدلسازی تا آنجا که امکان دارد قسمتهایی مانند سقف و شاسی که تغییرشکلهای کمتری در حین رول‌اور دارند، با المانهای بزرگتر شبکه‌بندی می‌شوند تا زمان تحلیل مسئله کمتر بشود. نهایتاً مقطع-بدنه جلویی با ۲۵۵۰۰۰ المان، مقطع-بدنه میانی با حدود ۲۸۰۰۰۰ المان و مقطع-بدنه عقبی با ۲۵۰۰۰۰ المان تحلیل می‌شود. از نظر شکل ظاهری، در پایان

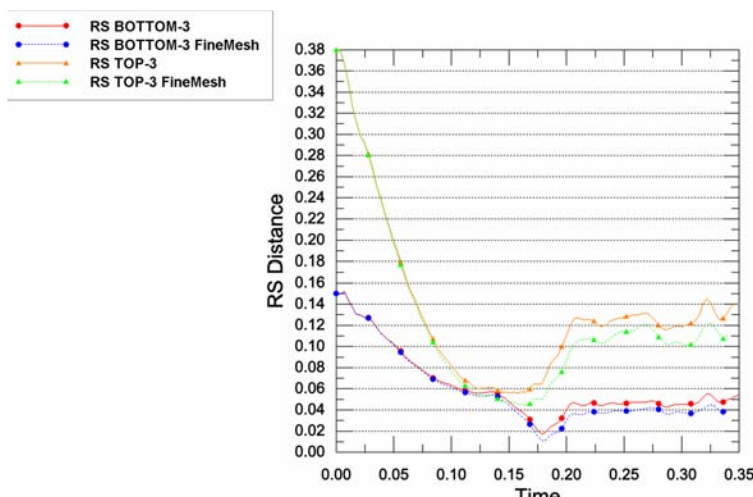
ستونها در هر یک از مقطع بدنه‌ها به‌طور جداگانه در دو نقطه بالایی و پایینی فضای سرنشینان، در شکلهای (۲۶) تا (۳۱) ارائه می‌شود که از روی آنها مقدار دقیق تغییر شکل هر یک از ستونها در حین آزمون واژگونی مشخص می‌شود. رسیدن مقدار RS-Distance به صفر یا عددی منفی، گویای تداخل سطح داخلی ستونها با محدوده ایمن سرنشینان می‌باشد که از این تصاویر و نمودارها مشخص است که مقطع-بدنه‌های بهینه شده، هیچ تداخلی با فضای سرنشینان نداشته و شرایط آیین‌نامه آزمون رول‌اور را با موفقیت پشت‌سر می‌گذارند. پس از بهینه‌سازی نهایی، به‌منظور بررسی صحت



شکل ۳۱- نمودار فاصله RS BOTTOM بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه عقبی بهینه شده



شکل ۳۰- نمودار فاصله RS TOP بر حسب زمان برای ستونهای مقطع-بدنه عقبی بهینه شده

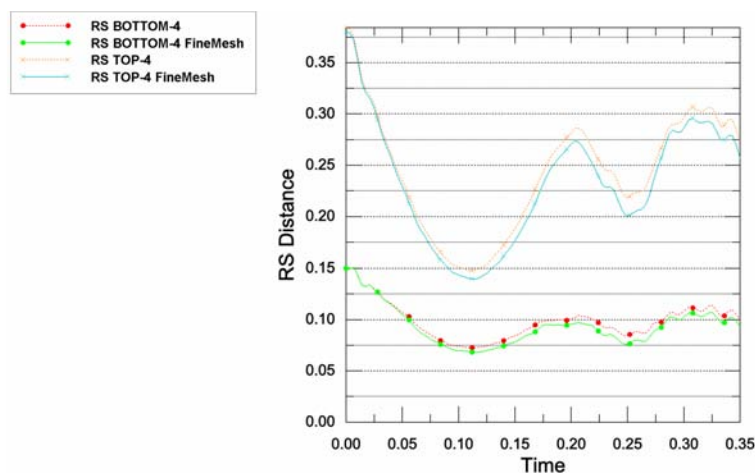


شکل ۳۲- مقایسه فواصل RS Distance برای ستون سوم از مقطع-بدنه جلویی، در دو حالت شبکه بندی

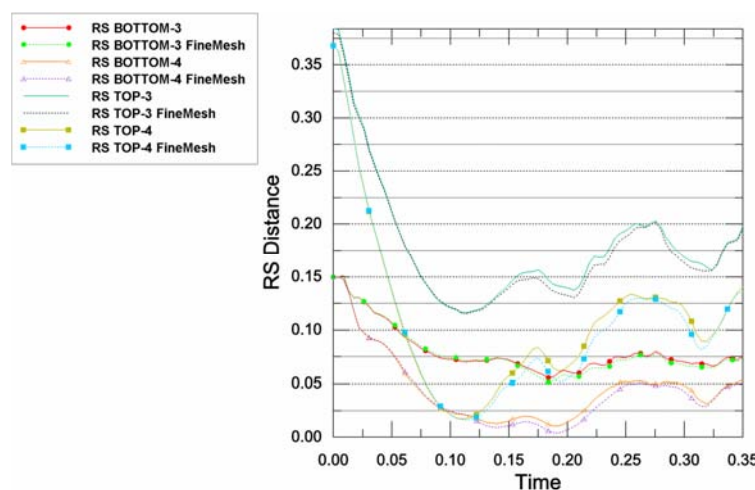
(حتی در صورت استفاده از شبکه بندی ریزتر که تغییر شکل آنها کمی بیشتر می شود) شرایط آیین نامه را با موفقیت پشت سر می گذارند. به عبارت دیگر چنین می توان گفت که استفاده از شبکه بندی ریزتر تأییدی بر صحت تحلیل های انجام گرفته روی مقاطع بهینه شده است. از طرف دیگر با توجه به امکانات موجود، بررسی مسئله با شبکه بندی ریزتر از این مقدار، نامعقول به نظر می رسد.

اتوبوس O457 پس از بهینه سازی، شرایط تعیین شده در آیین نامه واژگونی را با موفقیت پشت سر می گذارد و اصطلاحاً در آیین نامه تأیید می شود. وزن اضافه شده ناشی از کاربرد

شبیه سازی آزمون رول اور، تفاوت محسوسی میان مدل های تهیه شده با المانهای ریز و درشت، مشاهده نمی شود. به همین منظور برای مشاهده این تفاوتها، در هر مقطع-بدنه یک یا دو ستون که تغییر شکل بیشتری دارند برای مقایسه نتایج به دست آمده به کار می رود. مقایسه بین فواصل RS.TOP و RS.BOTTOM در ستونهایی که بیشترین تغییر شکل را دارند، برای هر یک از سه مقطع-بدنه جلویی، میانی و عقبی به ترتیب در شکل های (۳۲) تا (۳۴) قابل مشاهده است. از سه تصویر اخیر چنین بر می آید که اگر چه اختلاف میان نتایج مربوط به شبکه بندی ریزتر در بعضی نقاط زیاد است، اما ستونهای تحلیل شده در هر حال



شکل ۳۳- مقایسه فواصل RS Distance برای ستون چهارم از مقطع-بدنه میانی، در دو حالت شبکه‌بندی



شکل ۳۴- مقایسه فواصل RS Distance برای ستونهای سوم و چهارم از مقطع-بدنه عقبی، در دو حالت شبکه‌بندی

گرفت. هدف از انجام این تحقیق، مطالعه عملکرد سازه در حین واژگونی و بررسی ارضای شرایط آیین‌نامه واژگونی توسط اتوبوس مذکور است. چنانچه مشاهده شد، تغییرشکلهای ایجاد شده در سازه بیش از حد مجاز تعیین‌شده در استاندارد بوده و اتوبوس O457 فعلی نمی‌تواند شرایط تعیین‌شده در آزمون واژگونی ECE66 را ارضا کند. با اعمال تغییراتی ساده ولی مؤثر در بدنه، اتوبوس مذکور قادر خواهد بود شرایط آزمون را ارضا کند. همچنین نتایج و نمودارهای به‌دست آمده به‌صورت کیفی با نتایج تجربی دیگران بر روی اتوبوسهای تقریباً مشابه مقایسه‌شده و روند قابل قبولی داشته‌اند.

صفحات تقویتی در کل بدنه اتوبوس کمتر از ۲۰۵ کیلو گرم می‌باشد، یعنی چیزی در حدود وزن سه مسافر. توضیح آنکه این مقدار در برابر وزن کل اتوبوس که حدود ۱۲ تن است، ناچیز بوده و اثرات محسوسی روی پایداری و دینامیک خودرو نخواهد گذاشت. همچنین اعمال این تغییرات در روند ساخت، دشوار نیست.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی آزمایش واژگونی به روش عددی و به‌کمک روش اجزای محدود بر روی اتوبوس O457 انجام

- | | | |
|-------------------|--------------------|--------------------|
| 1. tripped | 4. body section | 7. solid break |
| 2. untripped | 5. super structure | 8. 8-hourglassing |
| 3. residual space | 6. conventional | 9. abaqus explicit |

مراجع

- Conroy, C., David, B., Hoyt, A., Eastman, B., Erwin, S., Pacyna, Sh., Holbrook, T.L., Vaughan, T., Sise, M., Kennedy, F., and Velky, T., "Rollover Crashes: Predicting Serious Injury Based on Occupant, Vehicle and Crash Characteristics, *Accident Analysis & Prevention*," No.38, pp.835-842, 2006.
- Henty, M. E., "Virtual Simulation of a Pickup Truck Rollover Test using the Nonlinear Finite Element Code PAM-CRASH," Master Thesis, The Pennsylvania State University, May 2003.
- Initiatives to Address the Mitigation of Vehicle Rollover, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Report, June 2003.
- Fatality Analysis Reporting System (FARS), National Automotives Sampling System (NASS) & Crashworthiness Data System (CDS) From Police-Reported Rollover Crashes," 2001.
- Niii, N., and Nakagawa, K., "Rollover Analysis Method of Large-Sized Bus," *Isuzu Motors Ltd Japan*, Paper No 96-S11-O-05, pp. 1845-1853, 1996.
- Belingardi G., Gastaldin D., Martella P., and Peroni L., "Coach Passenger Injury Risk During Rollover: Influence of the Seat and the Restraint System," *Department of Mechanical Engineering, Polytechnic of Torino*, Paper No 05-0439, 2005.
- Rollover Standard ECE No.66, "UNIFORM TECHNICAL PRESCRIPTIONS CONCERNING THE APPROVAL OF LARGE PASSENGER VEHICLES WITH REGARD TO THE STRENGTH OF THEIR SUPERSTRUCTURE," 2006.
- ABAQUS Documentation, Version 6.6".
- Matolcsy M., "Body Section Rollover Test as an Approval Method for Required Strength of Bus Superstructure," *SAE Technical Paper Series*, Vol. #2001-01-3209, PP 25-31, 2001.
- Koji, K., Yutaka, K., Hidehiko, E., and Shigeaki, Sh., "An Analysis Method for Rollover Strength of Bus Structures," *Hino Motors Ltd Japan*, Paper No 94-S11-O-11, pp. 1776-1784, 1994.