Archive of SID

اندازه گیری مقدار سختی یک اتصال T شکل در بدنه خودرو و مقایسه آن با نتایج تحلیل عددی

محسن حامدی

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

امیرعلی اله بداشتی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/٤/۳۱، تاریخ تصویب ۸۱/۱/۲٤)

چکیده

مطالعات انجام شده بر روی اتصالات سازه خودرو نشان دهنده نقش تعیین کننده این اتصالات در پاسخ بدنه به بارهای‌استاتیکی و دینامیکی است. مقاله حاضر به بررسی رفتار الاستیک یک اتصال T شکل در بارگذاری استاتیکی می‌پردازد و یک روش برای ارزیابی مقدار سختی در این نوع اتصال ارائه می‌دهد .به وسیله این روش قسمتی از جابجائی کل نقطه اثر نیرو که‌مربوط به منطقه اتصال می‌شود اندازه گیری شده و سپس سختی منطقه اتصال براساس مقدار گشتاوری که باعث چرخش منطقه اتصال به اندازه یک رادیان می‌شود، محاسبه می‌گردد. در ادامه مقدار سختی یک اتصال T شکل از بدنه یک خودروی‌نمونه در دو جهت (براساس اهمیت بارهای وارده به اتصال) محاسبه شده است. بررسی نتایج به دست آمده و توجه به قسمتی از جابجائی نقطه اثر بارگذاری که منحصرا مربوط به منطقه اتصال می‌شود، حاکی از اهمیت درنظر گرفتن سختی اتصال است. در پایان نیز به منظور ارزیابی پاسخهای بدست آمده مدل اجزاء محدود دقیقی از نمونه آزمایش با استفاده از یک نرم‌افزار اجزاء محدود ساخته شد و این مدل نیز تحت بارگذاری های مشابه آزمایشها قرار گرفت. مقایسه نتایج تجربی و تحلیل عددی‌نشان دهنده انطباق قابل قبولی می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

واژه های کلیدی : سختی اتصال، استحکام بدنه، اتصالات سازه‌ای، رفتار بدنه خودرو

مقدمه

سازه بدنه خودرو در حالت کلی از اتصالات قطعات مختلفی به یکدیگر ساخته می‌شود .این قطعات خود بوسیله انجام کار سردبر روی ورق ساخته شده از آلیاژ مخصوص با ضخامتهای مختلف ساخته می‌شوند .اتصال اجزاء تشکیل دهنده سازه بدنه‌خودرو عمدتاً با استفاده از روش نقطه جوش انجام می‌شود که در محل اتصال این اجزاء سازه‌ای به یکدیگر مفصل تشکیل‌می‌گردد .مجموعه قطعات تشکیل دهنده سازه بدنه باید نقش یک سیستم پیوسته[۱] را بازی کنند یعنی تمام نیروها وگشتاورها باید از طریق اتصالات بین اجزاء سازه‌ای به سایر اجزاء انتقال پیدا کنند. پس این اتصالات نقش اساسی در چگونگی پاسخ سیستم به بارهای اعمال شده دارند .

سازه های بدنه اتومبیل شامل اتصالات سازه‌ای در شکلهای گوناگونی می‌باشند. ساختار اتصالات سازه‌ای متصل کننده اعضاء سازه‌ای در حالت عمومی به سه نوع تقسیم می‌شوند [۱]:

۱ – اتصالات L شکل مانند اتصال رکاب[۲] به ستون جلو[۳].

۲– اتصالات T شکل مانند اتصال رکاب به ستون میانی[۴].

۳– اتصالات Y شکل مانند اتصال ستون جلو به کلاف های سقف[۵].

مطالعه سختی اتصالات که تعیین کننده رفتار این اتصالات و در نتیجه سازه بدنه در مقابل بارگذاری است اهمیت زیادی دارد.تحقیق و آزمایش بر روی ماهیت سختی اتصالات سازه بدنه خودرو طی دو دهه گذشته مورد توجه طراحان بدنه قرار گرفته‌است. مطالعات و تحقیقات انجام شده بر روی اتصالات سازه خودرو نشان دهنده این مطلب است که این اتصالات رفتارغیرصلب از خود نشان می‌دهند به این معنی که وقتی بدنه تحت بارگذاری یا اعمال جابجایی اجباری قرار می‌گیرد، قسمتی ازپاسخ سیستم به محرک خارجی (بارگذاری یا اعمال جابجایی) مربوط به انعطاف پذیری اتصالات بین قطعات بدنه و مقدار این‌انعطاف پذیری است به طوریکه

www.SID.ir

Archive of SID

چشم پوشی از اثر انعطاف پذیری اتصالات و درنظر گرفتن آنها به عنوان اتصالات صلب، خطای‌بزرگی را به همراه آورده و با این فرض تحلیل شرایط بدنه نتایج گمراه کننده و نادرستی دربر خواهد داشت[۲] به عنوان مثال Shigeta [۳] اشاره می کند که درنظر گرفتن اتصالات سازه‌ای به عنوان یک اتصال صلب نتایج مفیدی در پی نخواهد
داشت.

Chang [٤] مقاومت و سختی سازه بدنه خودرو را در مدل اجزا محدود ضمن درنظر گرفتن سختی اتصال محاسبه کرده و براهمیت درنظر گرفتن سختی اتصال تاکید می‌کند Kamada و Sakurai [۱] در تحقیقات خود نتایج محاسبه شده مربوط به‌خصوصیات استاتیکی (یعنی سختی خمشی و پیچشی) و ویژگیهای دینامیکی (یعنی فرکانس تشدید) را با نتایج تست مقایسه‌می‌کنند و نتیجه می‌گیرند که خصوصیات دینامیکی نیز تحت تاثیر سختی اتصال هستند .در همین راستا Rao [۵] گزارش دادکه از یک تست دینامیکی برای بدست آوردن مقدار سختی بهنیه اتصال سازه‌ای استفاده کرده است و از این طریق توانسته است صداهای حاصل از لرزش و تغییر شکلهای ارتعاشی کوچک بدنه را بهبود بخشد Ida [٦] نیز تعریفی از ساختار منطقه‌اتصال را ارائه می‌دهد که در آن منطقه اتصال را به عنوان محل تقاطع عضوهای سازه‌ای تعریف می‌کند و سختی اتصال رابصورت تقریبی محاسبه می‌کند Inoda و Matsuo[۷] به ارائه یک روش برای ارزیابی مقدار سختی اتصال L شکل می‌پردازند و قسمتی از جابجایی را که منحصرا مربوط به منطقه اتصال می‌شود در محاسبات منظور می‌نمایند.

Nicolidis و Gangadharan [۸] در سال ۱۹۹۰ در تحقیقی ضمن عنوان این مطلب که انعطاف پذیری در اتصالات یک فاکتورمهم در طراحی بدنه خودرو است، دو مدل سه بعدی کلی را (ساده و پیچیده) برای نشان دادن رفتار انعطاف پذیر اتصالات‌چند شاخه‌ای[٦] ارائه کرده‌اند. مدل ساده شامل فنرهای پیچشی برای اتصال شاخه ها به یکدیگر است و حرکت شاخه‌ها درصفحات مختلف مستقل از هم درنظر گرفته شده است به این معنی که از اثر پیچش هر شاخه در بارگذاری بر روی آن شاخه صرفنظر شده است .در ساخت

www.SID.ir

Archive of SID

مدل پیچیده نیز اثر پیچش ذکر شده در نظر گرفته شده است .در ادامه با استفاده از یک روش‌آماری بر روی پاسخ سیستم به بارهای استاتیکی، پارامترهای مدلها تعیین می‌شود .در نهایت دو مدل ارائه شده از جهت‌توانایی در پیش بینی پاسخ به بارگذاری‌های استاتیکی مقایسه می‌شوند.

Nicolidis و Lee [۹] در تحقیق دیگری در سال ۱۹۹۲ مدلی از اتصال در سازه خودرو ارائه می‌دهند که ضمن درنظر گرفتن انعطاف پذیری اتصال و اثر پیچش هر شاخه در صفحات دیگر، انحراف مرکز چرخش شاخه های اتصال را نیز درنظر می‌گیرد.پارامترهای این مدل شامل سختی فنر پیچشی، محل قرار گرفتن این فنرها و جهت گیری صفحاتی که فنرهای پیچشی در آن‌قرار می گیرند است. در ادامه عنوان می کنند که در بعضی حالات رفتار اتصال را می‌توان با استفاده از مدلهای ساده‌تر به طوردقیق پیش بینی کرد و شرایطی را که در آن مدل اتصال می‌تواند ساده شود ارائه می‌دهند. همچنین در این تحقیق یک سری از مدل اتصالات با پیچیدگی های مختلف ارائه شده است و با استفاده از یک روش آماری در کم کردن اختلاف بین‌جابجایی‌های پیش بینی شده و اندازه گیری شده، پارامترهای مدل شناسایی شده است. روش ارائه شده بر روی یک اتصال باشاخه های اطرافش مورد بررسی قرار گرفته است.

Nicolidis و Zho [۱۰] در سال ۱۹۹٤ در تحقیق دیگری عنوان می‌کنند که در طرح اولیه خودرو هدف رسیدن به ویژگیهای بهینه بدنه و اجزاء آن است و برای ارتقاء روشهای طراحی ابزاری جهت ارتباط بین اهداف بهینه‌سازی و پارامترهای فیزیکی‌طرح موردنیاز است. روش به این صورت است که ابتدا خصوصیات بهینه یک اتصال پیش بینی می‌شود و سپس اتصالاتی که با این اهداف بهینه سازگار بوده و محدودیتهای ساخت را نیز درنظر بگیرند طراحی می‌شوند. برای این منظور از یک شبکه عصبی استفاده می‌شود که آموزش این شبکه با استفاده از نتایج تحلیل اجزاء محدود چندین طرح اتصال انجام می‌شود و درنهایت اتصالی که کمترین جرم مصرفی را دارد و در عین حال محدودیتهای تولید و شکل دهی را درنظر می‌گیرد انتخاب می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

Piterson و Doebling [۱۱] در سال ۱۹۹۵ به اندازه گیری دقیق ماتریسهای سختی سازه از طریق انجام آنالیز مودال بااستفاده از شکل مودها، فرکانس مودال و سختی اندازه گرفته شده پرداخته‌اند و به دلیل درنظر گرفتن سختی اتصال به نتایج‌بهتری دست یافته‌اند.

Sergeyev و Morz [۱۲] در سال ۱۹۹۸ به طراحی بهینه قابها می‌پردازند و فاکتورهای ابعاد و سطح مقطع‌های استفاده شده (پارامتر اندازه) و موقعیت قرار گرفتن اتصالات بین اعضاء (پارامترهای مربوط به ساختار قاب) را برای بهینه‌سازی درنظرمی‌گیرند و عنوان می‌کنند که بهینه‌سازی طرح براساس حداقل جرم مورد استفاده در بدنه و در نظر گرفتن ظرفیت میرایی‌مودهای ارتعاش آزاد سیستم [۷] انجام می‌شود.

مجموعه تحقیقات بالا نشان دهنده این مطلب است که اتصالات در بدنه خودرو رفتار غیرصلب دارند. سختی اتصالات نه‌تنها بر روی سختی های خمشی و پیچشی بدنه تاثیر می‌گذارد بلکه بر روی مقاومت بدنه و نیز بر روی پاسخهای ارتعاشی ورفتار بدنه در تصادف نیز تاثیر می‌گذارد .در سالهای اخیر برای بهبود آسایش سرنشینها و نیز راحتی در هدایت اتومبیل،سختی اتصال در طراحی سازه بدنه خودرو مورد توجه قرار گرفته است.

در این نوشتار هدف ارائه روشی جهت جدا ساختن مقدار جابجایی نقطه اثر نیرو که منحصرا مربوط به منطقه اتصال‌می‌شود و نیز اندازه گیری مقدار سختی اتصال است .برای این منظور بارگذاریهایی در جهت های مهمترین بارهای وارده به‌این اتصال بر روی نمونه واقعی انجام شده است.

در قسمت بعد به شبیه سازی بارگذاری انجام شده روی اتصال مورد آزمایش پرداخته و با ساخت یک مدل اجزاء محدود ازنمونه و اعمال قیدها و بارهای اعمالی پاسخ اتصال به بارگذاریهای انجام شده واقعی محاسبه شده و در نهایت به مقایسه نتایج‌پرداخته خواهد شد.

ضروری است یادآوری شود که پارامترهای زیادی بر روی مقدار سختی یک اتصال در بدنه خودرو اثر می‌گذارند .از آن جمله‌می‌توان به پارامترهایی نظیر ضخامت و جنس ورق بکاررفته، طرح اتصال، تعداد و فاصله نقطه جوشها، مقاومت نقطه

www.SID.ir

Archive of SID

جوشها، الگوی نقطه جوش کاری، وضعیت تقویتی استفاده شده در منطقه اتصال اشاره کرد. در تحقیق انجام شده پارامترهای ذکر شده‌برای یک اتصال ثابت فرض می شوند و هدف فقط اندازه گیری مقدار سختی اتصال برای یک اتصال معین با شرایط وپارامترهای ثابت است.

تعریف سختی در اتصال T شکل و طراحی روش آزمایش

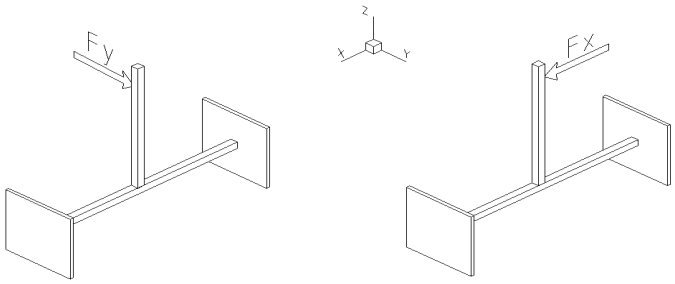
با استفاده از روشی که ماتسو و اینودا [۷] برای اندازه گیری سختی اتصال L شکل ارائه کرده‌اند، در این تحقیق روشی برای‌اندازه گیری سختی اتصال T شکل ارائه می‌شود.

تعریف منطقه اتصال و نقطه اتصال

در ابتدا لازم است منطقه اتصال تعریف شود. فصل مشترک امتداد سطح مقطع ستون با رکاب منطقه اتصال نامیده شده ونقطه اتصال نقطه‌ای است که در آن محورهای خنثی اجزاء سازه‌ای یعنی ستون و رکاب در منطقه اتصال همدیگر را قطع می‌کنند. در حالتی که محورهای خنثی همدیگر را قطع نمی‌کنند، نقطه ای که مجموع فاصله آن تا هر محور خنثی کمترین باشد، نقطه اتصال نامیده می شود. اگر به بارهای وارده به این اتصال در شکل (۱) توجه شود، مشاهده می‌شود که تنها جابجایی حاصل از بارگذاری در دو جهت نشان داده شده حائز اهمیت است زیرا این بارگذاریها باعث اعمال گشتاورهای پیچشی قابل ملاحظه‌ای به منطقه اتصال‌می‌شوند . در صورتیکه نیروهای وارده در راستای ستون (F_z) به دلیل بالا بودن سختی محوری ستون و سختی خمشی رکاب‌باعث ایجاد تغییر مکان قابل ملاحظه‌ای نخواهد شد .به همین دلیل سختی اتصال مربوط به این دو جهت بارگذاری نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای بدست آوردن سختی اتصال در این دو جهت، صفحاتی به دو سر رکاب جوش داده و رکاب در آن نقاط مقید می‌شود و در فاصله مشخصی از مرکز اتصال روی ستون، در دو جهت نشان داده شده بارگذاری انجام می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱ : جهات مهمترین بارهای وارده به اتصال مورد آزمایش.

روش محاسبه سختی پیچشی($k_{\theta x}$)

وقتی در جهت نشان داده شده در شکل (۲ – الف) به ستون بار وارد می‌شود سختی منطقه اتصال مربوط به این جهت بارگذاری $k_{\theta x}$ نامیده می‌شود .در این حالت جابجایی کلی نقطه اثر بارگذاری δ نامیده شده که شامل چهار قسمت است:

۱ – جابجایی نقطه اثر بارگذاری وابسته به انعطاف پذیری ستون در جهت محور عرضها (سختی خمشی ستون): δ_1

۲ – جابجایی نقطه اثر بارگذاری ناشی از انعطاف پذیری اتصال (سختی اتصال): (δ_2مجهول مسئله)

۳ – جابجایی نقطه اثر بارگذاری ناشی از انعطاف پذیری پیچشی رکاب (سختی پیچشی رکاب): δ_3

٤ – جابجایی نقطه اثر بارگذاری ناشی از انعطاف پذیری خمشی رکاب (سختی خمشی رکاب): δ_4

یعنی:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 \quad (۱)$$

هدف به دست آوردن مقدار δ_2 (یا قسمتی از جابجایی نقطه اثر بارگذاری مربوط به منطقه اتصال) است تا از آن طریق سختی‌منطقه اتصال تعین شود.

برای بدست آوردن مقدار δ_1 باید سختی خمشی ستون در آن جهت بدست آید. این مقدار به وسیله بارگذاری بر روی ستون با انتهای گیردار محاسبه می‌شود. به این

www.SID.ir

Archive of SID

ترتیب که ستون را از منطقه اتصال جدا کرده و با مقید کردن انتهای آن و با بارگذاری به همان مقدار و جهت F_y و درهمان نقطه، مقدار جابجایی خمشی مربوط به ستون یا δ_1 بدست می آید. در این مورد به شکل (۲ - ب) توجه کنید.

برای پیدا کردن مقادیر δ_3 وδ_4 که جابجایی های مربوط به رکاب هستند بار F_y به نقطه اتصال منتقل می‌شود که نتیجه گشتاور M_x و نیروی F'_y است. برای این منظور رکاب از دو طرف کاملا درگیر شده و سپس در منطقه اتصال گشتاور M_x ونیروی F'_y اعمال می‌شود تا بتوان میزان پیچش منطقه اتصال تحت اثر گشتاور M_x را ارزیابی کرده و از آن طریق مقدار δ_3 رامحاسبه نمود. سپس جابجایی منطقه اتصال به خاطر نیروی F'_y را بدست آورده که این مقدار خود نشان دهنده δ_4 است. شکلهای (۲ - د) و (۲ – ج) این مطلب را به وضوح نشان می دهند. اگر مقدار پیچش رکاب (برحسب رادیان) به اندازه ω باشد و طول ستون L فرض شود، آنگاه δ_3 از رابطه زیر بدست می آید:

$$\delta_3 = L \times \omega \qquad (۲)$$

و جابجایی δ_2 با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\delta_2 = \delta - (\delta_1 + \delta_3 + \delta_4) \qquad (۳)$$

حال با داشتن مقدار δ_2 باید جابجایی زاویه‌ای متناظر با آن بدست آید. این مقدار را γ نامیده که مقداری برحسب رادیان است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\gamma = \frac{\delta_2}{L} \qquad (٤)$$

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۲ : فرآیند به دست آوردن مقدار سختی $k_{\theta x}$. (الف و ب) : آزمایشهای شماره ۱ و ۳، (ج و د) : گشتاور و نیروی ناشی از بار F_y در آزمایش شماره ۱.

و $k_{\theta x}$ اینگونه محاسبه می شود:

$$k_{\theta x} = \frac{M_x}{\gamma} \qquad (۵)$$

و با جایگزینی γ در رابطه فوق و در نظر گرفتن مقدار گشتاور M_x این رابطه حاصل می شود:

$$k_{\theta x} = \frac{F_y \times L^2}{\delta_2} \qquad (٦)$$

روش محاسبه سختی پیچشی ($k_{\theta y}$)

برای محاسبه $k_{\theta y}$ در جهت نشان داده شده در شکل (۳ – الف) روی ستون بارگذاری کرده و جابجایی کلی نقطه اثربارگذاری β نامیده می‌شود که به چهار بخش قابل تجزیه است:

۱ – جابجایی نقطه اثر بارگذاری به خاطر انعطاف پذیری ستون (سختی خمشی ستون) : β_1

۲ – جابجایی نقطه اثر بارگذاری تحت تاثیر انعطاف پذیری اتصال (سختی اتصال) : β_2

۳ – جابجایی نقطه اثر بارگذاری ناشی از انعطاف پذیری خمشی رکاب (سختی خمشی رکاب) : β_3

www.SID.ir

Archive of SID

٤ – جابجایی نقطه اثر بارگذاری به خاطر انعطاف پذیری محوری رکاب (سختی محوری رکاب) : β_4

یعنی

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 \quad (۷)$$

در این آزمایش هدف به دست آوردن مقدار β_2 یا قسمتی از جابجایی نقطه اثر نیرو است که مربوط نقطه اتصال می‌شود.

مشابه روشی که در بخش قبل توضیح داده شد برای بدست آوردن مقدار β_1 باید سختی خمشی ستون در جهت بارگذاری به دست آید. برای این منظور همانطور که از شکل (۳ – ب) دیده می‌شود ستون از منطقه اتصال جدا شده و انتهای آن مقیدمی‌شود و سپس در همان نقطه اثر نیرو، بار F_x وارد می‌شود. بدین ترتیب مقدار جایجایی نقطه اثر نیرو ناشی از انعطاف پذیری ستون یعنیβ_1 بدست می آید.

برای پیدا کردن مقادیر β_3 و β_4 که جابجایی های مربوط به رکاب هستند بار F_xبه نقطه اتصال منتقل می‌شود که نتیجه گشتاور M_y و نیروی محوری F'_x است.

گشتاور M_y باعث تابیدن رکاب حول منطقه اتصال می‌شود و نیروی $F'x$ باعث جابجایی منطقه اتصال در جهت محور xمی‌شود .ولی می توان از جابجایی ناشی از نیروی محوری F'_x صرف نظر کرد زیرا مقدار سختی رکاب در راستای x نسبت به‌سایر سختیها بسیار بالاست و جابجایی منطقه اتصال در اثر این نیرو بسیار ناچیز و قابل

صرفنظر کردن است (این موضوع درنتایج آزمایش مشاهده خواهد شد). برای این منظور رکاب از دو طرف مقید شده و سپس در نقطه اتصال، گشتاور M_y و نیروی F'_x اعمال می شود تا میزان پیچش منطقه اتصال در اثر گشتاور M_y به دست آید. در این صورت می‌توان مقدار β_3 و نیزمیزان جابجایی مربوط به نیروی F'_x را به دست آورد که این مقدار خود نشان دهنده β_4 است. شکلهای (۳ – د) و (۳ – ج) این مطلب را به صورت واضحتری نشان می دهند.

اگر خط مماس بر رکاب در نقطه اتصال به اندازه زاویه θ (برحسب رادیان) چرخش کند و طول

www.SID.ir

Archive of SID

ستون L فرض شود، آنگاه β_3 از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\beta_3 = L \times \theta \quad (۸)$$

و جابجایی β_2 نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\beta_2 = \beta - (\beta_1 + \beta_3 + \beta_4) \quad (۹)$$

با داشتن مقدار β_2 باید جابجایی زاویه‌ای متناظر با آن تعیین شود. این مقدار را که برحسب رادیان است، η نامیده که به‌طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{\beta_2}{L} \quad (۱۰)$$

و $k_{\theta y}$ اینگونه محاسبه می شود:

$$k_{\theta y} = \frac{M_y}{\eta} \quad (۱۱)$$

و با جایگزینی مقادیر M_y و η مقدار مطلوب خواهد بود:

$$k_{\theta y} = \frac{F_x \times L^2}{\beta_2} \quad (۱۲)$$

انجام آزمایشها

آماده سازی نمونه آزمایش

نمونه اتصال مورد استفاده در این تحقیق، اتصال ستون میانی به رکاب وکفی یک وانت دو کابین است (شکل ۵) که درداخل کشور طراحی و ساخته شده است .این اتصال از نوع اتصال T شکل است. ستون از سه قسمت رویه، آستر و تقویتی‌تشکیل شده و رکاب نیز با استفاده از سه قطعه رویه، آستر و لچکی ساخته شده است .ضخامت این اجزاء بین ۰/۸ تا ۱/۵میلیمتر است و جنس تمامی آنها ST12 می‌باشد (مدول الاستیسیته برابر با ۲۰۰ مگاپاسکال و ضرایب پواسون برابر ۰/۲۹).

در ابتدا منطقه اتصال (بخش مربوط به تعریف منطقه اتصال و نقطه اتصال) به همراه قسمتی از رکاب و ستون برش زده می‌شود. سپس‌دو سر رکاب از فاصله ۳۰ سانتیمتری از مرکز اتصال به صورت قائم بریده شد و قسمت اضافی طول ستون نیز با برش حذف شد. باتوجه به ابعاد سطح مقطع رکاب، صفحه‌های مناسبی طراحی و ساخته شد و به دو سر رکاب جوش داده

www.SID.ir

Archive of SID

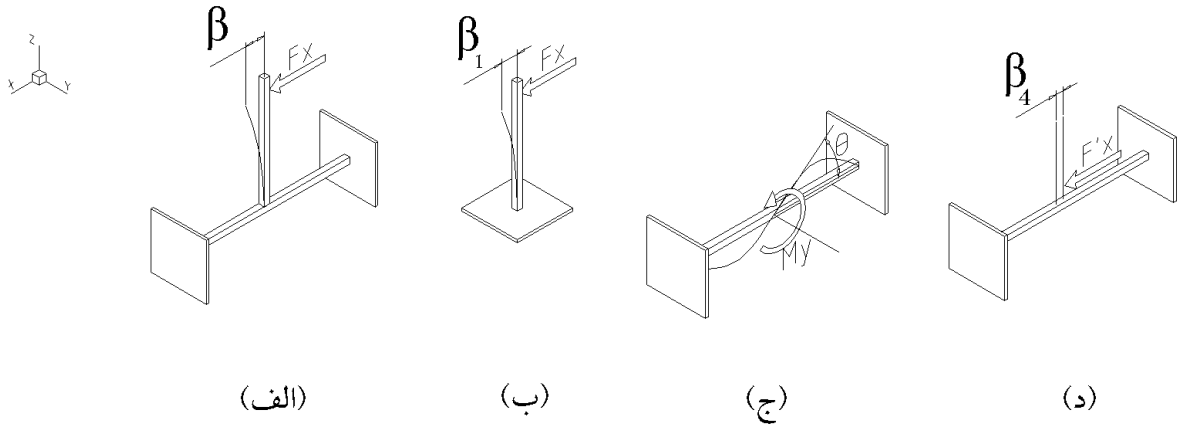
شد. نمونه برای بارگذاریهای ۳ و ٤ نیز با برش ستون از بالای محل اتصال و سپس با جوش دادن صفحه مشابه نمونه اول به انتهای بریده ستون‌ساخته شد .در هر دو مورد محل اتصال صفحه به نمونه به وسیله لایه های ورق نقطه جوش شده تقویت شد تا در جوشکاری مشکلی پیش نیاید.

انجام بارگذاریها

آزمایشی که برای اندازه گیری مقدار δ انجام می شود آزمایش شماره ۱ نامیده می شود. شکل (٤ – الف) شماره و موقعیت نمونه و سنجه های اندازه گیری در این بارگذاری را نشان می‌دهد. با دقت در این بارگذاری (شکل ۲) مشاهده می‌شود که با اعمال بار F_y به ستون، رکاب نیز در منطقه اتصال تحت تاثیر نیروی F'_y و گشتاور M_x قرار می‌گیرد و در این صورت می‌توان مقدار جابجایی ناشی از نیروی F'_y و مقدار پیچش رکاب ناشی از گشتاور M_x را نیز اندازه گرفت.

آزمایش مربوط به اندازه گیری مقدار β آزمایش شماره ۲ نامیده می‌شود که وضعیت نمونه، شماره و موقعیت سنجه‌های اندازه‌گیری در این بارگذاری در شکل (٤ – ب)دیده می‌شود.

در این آزمایش وقتی بار F_x به ستون اعمال می‌شود رکاب نیز در منطقه اتصال تحت تاثیر نیروی F'_x و

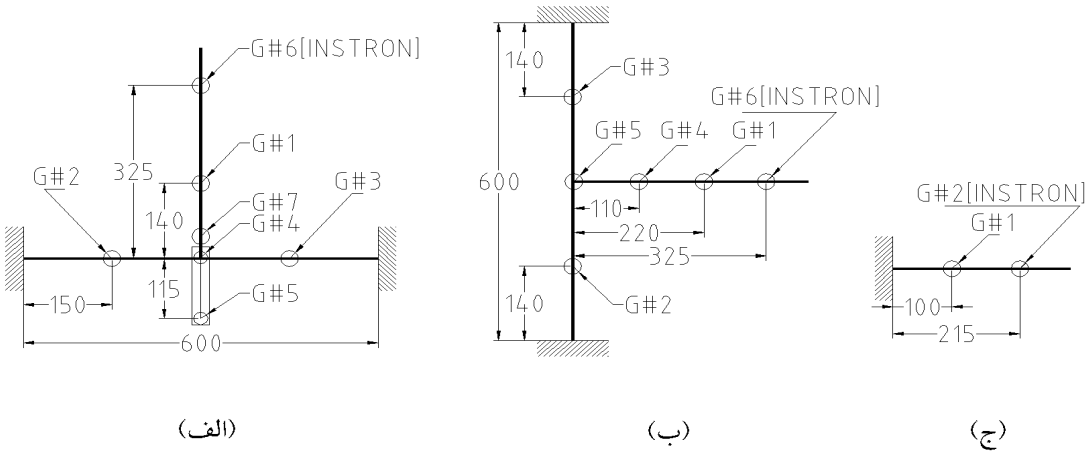


www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۳ : فرآیند به دست آوردن مقدار سختی $k_{\theta y}$.

(الف و ب) : آزمایشهای شماره ۲ و ٤، (ج و د) : گشتاور و نیروی ناشی از بار F_x در آزمایش شماره ۲.



شکل ٤ : شماره و موقعیت سنجه های اندازه گیری بر روی نمونه برای (الف) : بارگذاری شماره ۱، (ب) : بارگذاری شماره ۲، (ج) : بارگذاری شماره ۳ و ٤.

گشتاور M_y قرارمی‌گیرد. پس می توان در این آزمایش مقدار جابجایی رکاب ناشی از نیروی F'_x و مقدار تابیدن آن ناشی از گشتاور M_y را نیز اندازه گرفت. اما انجام آزمایش بر روی ستون با انتهای گیردار باید به طور جداگانه انجام شود زیرا چنین شرایطی یعنی وجودانتهای درگیر در آزمایش شماره ۱ و یا ۲ وجود ندارد .به این ترتیب آزمایشهایی که برای بدست آوردن مقادیر θ_4 و β_4 انجام‌می‌دهیم،

www.SID.ir

Archive of SID

آزمایشهای شماره ۳ و ٤ نامگذاری می‌شود. شکل (٤ – ج) شماره و موقعیت سنجه های اندازه گیری در این دو بارگذاری را نشان می‌دهد.

نمودارهای مربوط به نقطه اثر نیرو حاصل از بارگذاری پله‌ای در هر آزمایش به ترتیب در شکل (٦ - الف (برای بارگذاری شماره۱، (٦ – ب) برای بارگذاری شماره ۲،

(٦ – ج) برای بارگذاری شماره ۳، (٦ – د) برای بارگذاری شماره ٤، دیده می‌شوند. پس ازپایان بارگذاریها اهرم بارگذاری به نقطه صفر بازگردانده شده و مشاهده شد که تمام سنجه ها جابجایی صفر را نشان می‌دهند. این مطلب نشان دهنده انجام بارگذاری در محدوده برگشت پذیر یا الاستیک است. به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج، هر بارگذاری حداقل سه بار تکرار شده است و نتایج بارگذاریها انطباق بسیار خوبی را نشان می دهد که در نمودارهای شکل (٦) نشان داده می‌شود.

بررسی نتایج و تعیین مقادیر سختی

بررسی نتایج آزمایشها

در بررسی نتایج آزمایشهای انجام شده این موارد مشاهده می‌شود:

همانطور که انتظار می‌رفت نتایج به دست آمده مربوط به تغییرات جابجایی برحسب نیروی وارده که در شکل (٦) نشان داده شده‌اند با تقریب خوبی یک روند خطی را نشان می‌دهند و تائید می کنند که بارگذاری در محدود الاستیک انجام شده است و اندازه‌گیریها از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. پس از باربرداری نیز مشاهده شد که سنجه‌ها بر روی عدد صفر باز می‌گردند و این تائید مجددی بر عدم وجود تغییر شکل پلاستیک است.

از طرف دیگر مشاهده می شود که تکرار آزمایشها، نتایج مشابهی را نشان می دهد که این علاوه بر اینکه نشان می‌دهد که جابجاییها از محدوده الاستیک خارج نشده است، بیان کننده تکرار پذیر بودن آزمایشهاست.

محاسبه مقادیر سختی

در این بخش براساس روشهای ارائه شده در بخش ۲، نتایج محاسبه سختی‌های پیچشی حول محورهای طولی و

www.SID.ir

Archive of SID

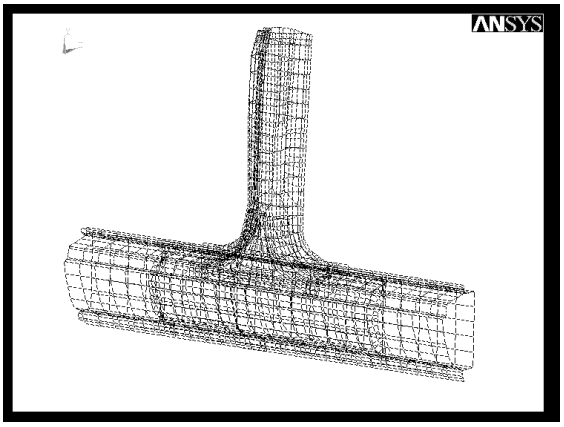
عرضی‌خودرو ($k_{\theta y}$, $k_{\theta x}$) نشان داده می‌شود.

همانطور که مشهود است مقدار سختی در یک سازه دارای رفتار خطی و الاستیک، کمیتی مستقل از مقدار بار یا مقدارجابجایی است و تنها سازه در مقابل باری که به آن وارد می‌شود یک جابجایی متناظر با آن بار از خود نشان می‌دهد .برای‌اندازه‌گیری سختی، جابجایی های متناظر با یک بار ۲۰۰ نیوتنی از روی نمودارهای رسم شده برای جابجایی مربوط به هرسنجه به دست می‌آید. در هر مرحله از میانگین داده‌های نزدیک به هم به عنوان مقدار جابجایی متناظر با بار N ۲۰۰ استفاده‌می‌شود.

محاسبه سختی پیچشی حول محور x ها (م حور طولی خودرو)

همانطور که در قبل توضیح داده شد از مقادیر به دست آمده از آزمایشهای شماره ۱ و ۳ برای به دست آوردن کمیتهای لازم‌برای محاسبه مقدار $k_{\theta x}$ استفاده می‌شود که این کمیتها به قرار زیر هستند:

$\delta = 3.5336\times10^{-3}$ (meter)
$\delta_1 = 0.2566\times10^{-3}$ (meter)
$\delta_3 = 1/9337\times10^{-3}$ (meter)
$\delta_4 = 63.8\times10^{-6}$ (meter)



شکل ۵ : مدل نهایی اجزاء محدود اتصال.

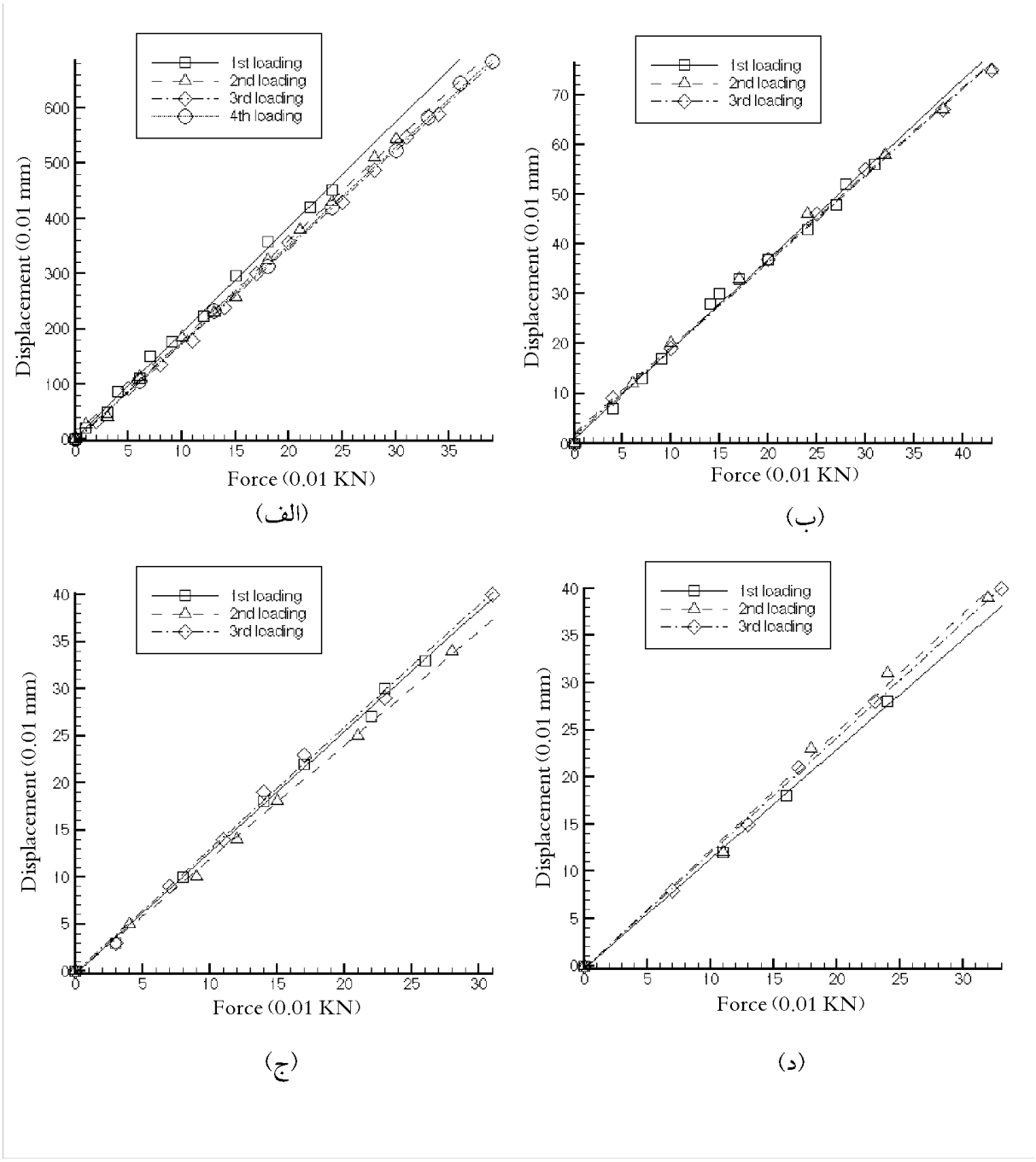
حال می‌توان جابجایی δ_2 را با استفاده از رابطه شماره ۳ بدست آورد:

$\delta_2 = 1.2795\times10^{-3}$ (meter)

مقایسه مقدار این جابجایی با جابجایی کل و جابجایی مربوط به سایر قسمتهای نمونه نشان دهنده این است که قسمت قابل توجهی از جابجایی کلی در نقطه اثر نیرو (۶۳/۸ درصد از مقدار δ) مربوط به منطقه اتصال است که

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٦ : مقایسه نتایج بارگذاریهای مختلف نشان داده در نقطه اثر نیرو . (الف) : بارگذاری شماره ۱، (ب) : بارگذاری شماره ۲، (ج): بارگذاری شماره ۳ ، (د) : بارگذاری شماره ٤ (برای توضیح بارگذاریهای به بخش روش محاسبه سختی پیچشی رجوع شود).

www.SID.ir

Archive of SID

این خود نشان دهنده‌اهمیت درنظر گرفتن آن است .حال محاسبه $k_{\theta x}$ موردنظر قرار می‌گیرد.

چون سختی مورد بحث از نوع پیچشی است پس باید گشتاور وارده به منطقه اتصال (M_x) و نیز مقدار جابجایی زاویه‌ای دراین منطقه نیز به دست آید. اگر γ تغییر

زاویه‌ای منطقه اتصال و L فاصله منطقه اتصال تا نقطه

اثر نیرو باشد در این‌صورت:

$$M_x = F_y \times L = 65 \quad (Nm)$$

$$\gamma = \frac{\delta_2}{L} = 3.94 \times 10^{-3} \quad (rad)$$

و با جایگذاری در رابطه ۷ مقدار سختی $k_{\theta x}$به دست می‌آید:

$$k_{\theta x} = \frac{M_x}{\gamma}$$
$$= \frac{65}{3.94 \times 10^{-3}}$$
$$= 16497.5 \quad (Nm/rad)$$
$$= 16.50 \quad (KNm/rad)$$

محاسبه سختی پیچشی حول محورy ها (محور عرضی خودرو)

در مورد این سختی هم مقادیر به دست آمده از آزمایشهای شماره ۲ و ٤ کمیتهای لازم برای محاسبه مقدار سختی $k_{\theta y}$به‌دست می دهد که این مقادیر از این قرارند:

$$\beta = 0.3666 \times 10^{-3} \quad (meter)$$
$$\beta_1 = 0.2446 \times 10^{-3} \quad (meter)$$
$$\beta_3 = 42 \times 10^{-6} \quad (meter)$$
$$\beta_4 = 0$$

و در نهایت β_2 با جایگذاری در رابطه ۹ به دست می آید:

$$\beta_2 = 80 \times 10^{-6} \quad (meter)$$

مانند قبل باید مقدار گشتاور وارده به منطقه اتصال (M_y) تغییر مکان زاویه‌ای نقطه اثر نیرو محاسبه می‌شود. اگر این تغییرمکان زاویه‌ای η نامگذاری شود خواهیم داشت:

$$M_y = F_x \times L \qquad (۱۳)$$

$$\eta = \frac{\beta_2}{L} \qquad (۱٤)$$

و با جایگذاری در رابطه ۱۲ مقدار سختی $k_{\theta y}$به دست می‌آید:

$$k_{\theta y} = 264062.5 \quad (Nm/rad)$$
$$= 264.06 \quad (KNm/rad)$$

ساخت مدل اجزاء محدود و شبیه‌سازی بارگذاریها

از آنجا که به دلیل پیچیدگی سازه و نحوه اتصال قطعات تشکیل دهنده آن قطعات روش تحلیلی برای حل مساله

www.SID.ir

Archive of SID

وجـود نـدارد از تحلیـل بـه روش اجـزاء محـدود بـرای ارزیـابی صـحت جوابهـای تجربی استفاده می‌شود. برای ساخت مـدل اجزاء محدود سازه‌موردنظر دو راه معمـول است : ۱ - استفاده از المانهای تیـر ۲ - استفاده از المانهای پوسته‌ای. المانهای تیـر قادر به ارائه مدل‌حقیقی از اتصال نیستند و مناسبترین نوع المان، المان پوسته‌ای است. در این تحلیل با استفاده از المان SHELL 63یک‌مدل اجزاء محدود از نمونـه مـورد آزمـایش در نـرم‌افـزار اجـزاء محـدود ANSYS5.4سـاخته شـد و پـس از سـاخت مـدل، فعالیتهـای معمـول کنتـرل کیفیت مدل شامل کنترل مشخصات المانها و اتصال صحیح آنها انجام شد .در مرحلـه بعد پس از مونتاژ قطعات بر روی یکدیگر با یکسان گرفتن درجات آزادی گرههـا در محلهای نقطه جوش، مـدل اتصـالات نیـز ساخته شد.

شکل (۵) تصویری از مدل اجـزاء محـدود نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد .مـدل نمونـه مـورد اسـتفاده بـرای آزمایشـهای شماره۳ و ٤ نیز به راحتـی از مـدل کامـل نمونه با برش زدن ستون از محلـی کـه در نمونه مورد آزمایش بـرش خـورده اسـت، ساخته‌می‌شود.

اعمال شرایط مرزی و انجام بارگذاری

پس از شبیه سازی شـرایط آزمـایش برای هرکدام از بارگذاریهای شماره ۱ تا ٤ به انجـام بارگـذاری هـای مشـابه شـرایط آزمایش‌پرداخته می‌شود. برای این منظور بر روی مدل، درجات آزادی گره ها در محل اتصال به قیدها برابر صفر قرار داده می‌شود. بـار وارده نیـز مطـابق شـرایط انجـام هـر آزمایش و در همان محل بارگذاری اعمـال می‌شود. در مورد بارگذاری‌های شماره ۱ و ۳ بار برروی گرههـایی کـه در زیـر اهـرم بارگذاری قرار داشتند وارد شد و در مـورد بارگذاری‌های شماره ۲ و ٤ماننـد شـرایط آزمایش که بارگذاری گسترده بود، بـار بـر روی سطوحی متناظر به صورت بار فشاری وارد شد.

مقایسه نتایج تحلیل عددی وکار آزمایشگاهی

حال نتایج به دسـت آمـده از انـدازه گیری‌های آزمایشگاهی و نتایج تحلیـل بـه روش اجزاء محدود مقایسه می‌شـود. ایـن

www.SID.ir

Archive of SID

عمل برای هرکدام از چهار حالت بارگذاری به تفکیک انجام شده و جابجایی‌های به دست آمده توسط ساعتهای اندازه‌گیری در هرآزمایش را با جابجایی‌های به دست آمده برای گرههای متناظر بر روی مدل مورد مقایسه قرار می‌گیرند. مانند قبل مقایسه‌برای مقدار بار ۲۰۰ نیوتن انجام می‌گیرد.

در مورد اعداد مربوط به سنجه های اندازه گیری، این اعداد به وسیله میانگین گرفتن بین اعداد به دست آمده برای مقدار بار۲۰۰ نیوتن در هرکدام از تکرارهای بارگذاری از روی نمودارهای رسم شده برای هر ساعت محاسبه می‌شود. جدول (۱) نشان‌دهنده جابجایی های به دست آمده از نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش شماره ۱، جدول (۲) نشان دهنده جابجایی های به‌دست آمده از نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش شماره ۲، جدول (۳) نشان دهنده جابجایی های به دست آمده از نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش شماره ۳، جدول (٤) نشان دهنده جابجایی های به دست آمده از نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش شماره ٤ برای بار۲۰۰ نیوتن در مقایسه با مقادیر به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود برای مقدار بار و موقعیت گرهی متناظراست. مقایسه نتایج به دست آمده از کار آزمایشگاهی و تحلیل عددی نشان دهنده انطباق قابل قبولی است (به استثناء دومورد که راجع به آن توضیح داده خواهد شد). در ساخت مدل مجموعه اتصال با مدل کردن هر قطعه به طور جداگانه و سپس مدل کردن صحیح نقطه جوشها در واقع سختی اتصال در مدل سازی در نظر گرفته شد و مشاهده شد که در نظر گرفتن این‌سختی نتایج مفیدی در پی دارد که همان همخوانی بین نتایج آزمایش و تحلیل عددی است.

بررسی علت اختلاف نتایج در مورد نقطه اثر بارگذاری در آزمایش شماره ۳

همانگونه که در جدولهای (۱) و (۳) دیده می شود تفاوتهایی بین مقادیر تجربی و محاسباتی وجود دارد. این قسمت اختصاص به بررسی این اختلافها و حتی‌المقدور تبیین آنها دارد.

مقایسه نتایج تجربی و محاسباتی مربوط به سنجه شماره ۳ در بارگذاری شماره ۱ (جدول ۳) حدود ٤۰ درصد اختلاف را نشان‌می‌دهد .این اختلاف به خاطر تفاوتهای بین مدل تحلیلی و نمونه

www.SID.ir

Archive of SID

آزمایشگاهی است. رویه رکاب از دو قسمت طولی تشکیل‌شده است که به روش نقطه جوش متصل می‌شوند. تعداد نقطه جوشها در این محل کافی نیست و بار را به خوبی منتقل‌نمی‌کند. به دلیل بسته بودن رکاب امکان افزایش نقطه جوشها وجود نداشته و برای رفع این مشکل سراسر محل اتصال جوش‌داده شد. این جوش فقط روی سطح خارجی قابل انجام است و به وسیله آن نمی‌توان سطوح داخلی را متصل نمود. در نتیجه به دلیل عدم اتصال کامل، تقارن رکاب در دو طرف ستون از میان رفته و پیچش حاصل از بارگذاری به صورت یکنواخت به‌طرفین منتقل نمی‌شود .از سوی دیگر شبیه‌سازی دقیق اتصال دو قطعه رکاب نیز در مدل تحلیلی مقدور نیست و باعث ایجادخطا شده است.

در بررسی نتایج بارگذاری شماره ۳ اختلافی معادل ٤٧ درصد بین نتایج تحلیل عددی برای سنجه شماره ۲ (محل اعمال بار) دیده می‌شود. از سوی دیگر اعداد مربوط به سنجه شماره ۱ که از محل اعمال بار فاصله دارد با تقریب خوبی منطبق هستند که موید انتقال نیرو و گشتاور از نقطه اثر بارگذاری به سایر قسمتهای سازه است. مقایسه نتایج بارگذاری شماره ٤ نیز که مربوط به همین قید و نمونه است انطباق مناسبی را نشان می دهد که تایید مجددی بر کارکرد مناسب قید و نمونه است. ذکر این نکته مهم است که روش بارگذاری در بارگذاری شماره ۳ و ٤ متفاوت است یعنی در بارگذاری شماره ۳ به صورت متمرکز و دربارگذاری شماره ٤ بدلیل محدودیتهای هندسی محل وارد کردن بار، به صورت گسترده است. از سوی دیگر مقایسه اعداد به‌دست آمده در نقطه اثر بارگذاری شماره ۱ با نقطه مشابه در بارگذاری شماره ۳ نشان می دهد که جابجایی در حالت اخیر برای میزان بار یکسان (۲۰۰ نیوتن) بسیار کمتر است. این موضوع به دلیل بالا بودن سختی در بارگذاری شماره ۳ و بالا بودن مقاومت ستون در مقابل بار وارده است. این مقاومت بالا

باعث ایجاد تمرکز تنش زیاد در محل اعمال بار و در نتیجه بروز جابجائیهای موضعی می‌شود. طبق اصل سنت ونان با دور شدن از نقطه بارگذاری، همخوانی خوبی بین نتایج تجربی و محاسباتی دیده می‌شود زیرا در آزمایش شماره ٤،

www.SID.ir

Archive of SID

بارگـذاری گسـترده باعـث جلـوگیری از تمرکز تنش و جابجائی‌های موضعی شده و انطباق کلیه نتایج را دربر دارد.

بررسی این اختلاف بر درنظر گرفتن اصـل سنت ونان در تفسیر نتایج تجربی و تحلیل عددی تاکید می‌کند. در زمانی که مقدار بار و یـا سـختی نمونـه در جهـت بارگـذاری

جدول ۱ : مقایسه نتایج برای بارگذاری شماره ۱.

شماره سنجه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷
نتایج آزمایش شماره ۱ (0.01 mm)	۱۳۱/٤	۱/۲	٥/۸٤	۸/٥	-٦٤	۳٥۳/۳٦	۲٦/٤۸
نتایج تحلیل اجزاء محدود (0.01 mm)	۱۲٦	۱/۰۹	۳/٤۸	*	*	۳۰۷	۲۲/۸
درصد اختلاف	٤/۱	۹/۲	٤۰/٤	____	____	۱۳/۱	۱۳/۹

* : برای این نقاط داده اجزاء محدود نداریم.

جدول۲ : مقایسه نتایج برای بارگذاری شماره ۲.

شماره سنجه	۱	۲	۳	٤	٥	٦
نتایج آزمایش شماره ۲ (0.01 mm)	۱۳/٦۱	۲/۳٥	۱/۸۲	٤/٦٦	۰/۰	۳٦/٦٦
نتایج تحلیل اجزاء محدود (0.01 mm)	۱۳/٤۹	۲/۱٥	۱/۸٤	۳/٦٦	۰/۲۲	۳٥/٥۲
درصد اختلاف	۰/۹	۸/٥	-۱/۱	۲۱/٥	____	۳/۱

جدول۳ : مقایسه نتایج برای بارگذاری شماره ۳.

شماره سنجه	۱	۲
نتایج آزمایش شماره ۳ (0.01 mm)	٤/۰۹	۲٤/٤٦

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج تحلیل اجزاء محدود (0.01 mm)	٤/٠٥	١٢/٩٦
درصد اختلاف	١	٤٧

جدول٤ : مقایسه نتایج برای بارگذاری شماره٤.

شماره سنجه	**١**	**٢**
نتایج آزمایش شماره ٤ (0.01 mm)	٤/٣٧	٢٥/٦٦
نتایج تحلیل اجزاء محدود (0.01 mm)	٤/٢٥	٢٤/٨٥
درصد اختلاف	٢/٧	٣/١

زیاد باشد ایـن موضـوع اهمیـت بیشـتری می‌یابد.

خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله رفتار الاستیک یک سازه Tشکل بدنه خودرو مـورد بررسـی قـرار گرفت و یک روش بـرای ارزیـابی مقـدار سختی دراین نوع اتصال ارائه گشت. برای اطمینان از صحت پاسخهای بدسـت آمـده شبیه سازی آزمـایش بـا اسـتفاده از روش اجزاءمحدود انجام شد. بارگـذاری و حـل یک مدل اجزاء محدود نشان داد که نتـایج عددی و نتایج تجربی انطباق قابل قبولی را به‌همراه دارند .بررسی نتایج به دست آمده نشان داد که در نظر گرفتن انعطاف پذیری اتصالات در رفتار کلـی سـازه بسـیار مهـم است و صرفنظر کردن از آن خطای بزرگی را ایجاد می‌نماید. اگر بـه سـهم جابجـایی های مربـوط بـه منطقـه اتصـال نسـبت بـه جابجایی کل نقطـه اثـر نیـرو توجـه شـود مشاهده می‌گردد که درصد قابل توجهی از ایـــــــــــــــــن جابجایی ها مربوط بـه ایـن منطقـه اسـت وحتی در یک تحلیل اجمالی بدنـه نیـز در نظر گرفتن آن الزامی به نظر مـی‌رسـد. در صورتیکه ارزیابی دقیقی از وضعیت رفتـار

www.SID.ir

Archive of SID

بدنه تحت بارگذاری‌های مختلف مطلوب باشد، درنظر گرفتن این موضوع اهمیت بیشتری خواهد یافت.

تقدیر و تشکر

انجام این تحقیق بدون استفاده از کمکهای مالی دانشکده فنی دانشگاه تهران از طریق طرح پژوهشی به شماره ٦١٨/١/٥٣١ و امکانات آزمایشگاهی و نمونه‌سازی گروه بهمن میسر نبود. نویسندگان سپاسگزاری خود را برای برخورداری از این مساعدتها اعلام می دارند.

مراجع

1 - Sakurai, T. and Kamada, Y. (1988). "Structural joints stiffness of automotive body." *SAE Technical Paper Series,* P.No. 880550.

2 - Kamal, Mounir, M. and Wolf, J. A. (1982). *Modern automotive structural analysis,* Van Nostrad Reinhold Company, New York.

3 - Shigeta, Nakajima and Tanabe. (1966). "Analysis of body side-structure with flexible joint."*Journal of SAE,* Vol. 20, No. 2.

4 - Chang, D. C. (1974). "Effects of flexible connections on body structural response." *SAE Transaction,* Vol. 83, P.No. 740041, PP. 233-244.

5 - Rao, M. K. et al. (1983). "Automotive body joint analysis for improved vehicle response." *ISATA,* PP. 953-973.

6 - Ida, and Matsuo. (1985). "Stiffness characteristics of thin walled joint." *Preprint of JSAE,* P.No.851038, P. 851.

www.SID.ir

Archive of SID

7 - Inoda, K. and Matsuo, M. (1985). "Flexible characteristics of thin walled frame joints." *JSAE,* Vol.7, No. 1.

8 - Gangadharan, S. (1990). *Statistical system identification of structures with flexible joints,* Ph.D.Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

9 - Lee, K. (1992). *Modeling and identification of flexible joints in vehicle structure,* Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

10 - Zhu, M. (1994). *Design of automotive joint: Using optimization to translate performance criteria to physical design parameters finite element, neural network,* Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

11 - Doebling, S. (1995). *Measurment of structural flexibility matrices for experiments with incomplete reciprocity,* Ph.D. Dissertation, University of Colorado at Boulder.

12 - Sergeyev, O. and Morz, Z. (1998). "Optimal joint position and stiffness distribution for minimum mass frames with damping constraints." *Structural Optimization,* Vol. 16, No. 4, PP.231-245.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Continuous

2 - Rocker

3 - Front Pillar

www.SID.ir

Archive of SID

4 - Center Pillar

5 - Roof Rails

7 - Damping Capacity of Free Vibration Modes

www.SID.ir