

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 ۸۰/۴/۳۱، تاریخ تصویب ۸۱/۱/۲۴)

چکیده

مطالعات انجام شده بر روی اتصالات سازه خودرو نشان دهنده نقش تعیین کننده این اتصالات در پاسخ بدنه به بارهای استاتیکی و دینامیکی است. مقاله حاضر به بررسی رفتار الاستیک یک اتصال T شکل در بارگذاری استاتیکی می پردازد و یک روش برای ارزیابی مقدار سختی در این نوع اتصال ارائه می دهد. به وسیله این روش قسمتی از جابجائی کل نقطه اثر نیرو که مربوط به منطقه اتصال می شود اندازه گیری شده و سپس سختی منطقه اتصال براساس مقدار گشتاوری که باعث چرخش منطقه اتصال به اندازه یک رادیان می شود، محاسبه می گردد. در ادامه مقدار سختی یک اتصال T شکل از بدنه یک خودروی نمونه 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 منحصر به منطقه اتصال می شود، حاکی از اهمیت در نظر گرفتن سختی اتصال است. در پایان نیز به منظور ارزیابی پاسخهای بدست آمده مدل اجزاء محدود دقیقی از نمونه آزمایش با استفاده از یک نرم افزار اجزاء محدود ساخته شد و این مدل نیز تحت بارگذاری های مشابه آزمایشها قرار گرفت. مقایسه نتایج تجربی و تحلیل عددی نشان دهنده انطباق قابل قبولی می باشد.

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

مقدمه

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 گرفته است. مطالعات و تحقیقات انجام شده بر روی اتصالات سازه خودرو نشان دهنده این مطلب است که این اتصالات رفتار غیر صلب از خود نشان می دهند به این معنی که وقتی بدنه تحت بارگذاری یا اعمال جابجایی اجباری قرار می گیرد، قسمتی از پاسخ سیستم به محرک خارجی (بارگذاری یا اعمال جابجایی) مربوط به انعطاف پذیری اتصالات بین قطعات بدنه و مقدار این انعطاف پذیری است به طوریکه

سازه بدنه خودرو در حالت کلی از اتصالات قطعات مختلفی به یکدیگر ساخته می شود. این قطعات خود بوسیله انجام کار سردبر روی ورق ساخته شده از آلیاژ مخصوص با ضخامتهای مختلف ساخته می شوند. اتصال اجزاء تشکیل دهنده سازه بدنه خودرو عمدتاً با استفاده از روش نقطه جوش انجام می شود که در محل اتصال این اجزاء سازه‌ای به یکدیگر مفصل تشکیل می گردد. مجموعه قطعات تشکیل دهنده سازه بدنه باید نقش یک سیستم پیوسته^۱ را بازی کنند یعنی تمام نیروها و گشتاورها 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 می باشند. ساختار اتصالات سازه‌ای متصل کننده اعضاء سازه‌ای در حالت عمومی به سه نوع تقسیم می شوند [۱]:

توانسته است صدهای حاصل از لرزش و تغییر شکلهای ارتعاشی کوچک بدنه را بهبود بخشد [۶] Ida نیز تعریفی از ساختار منطقه اتصال را ارائه می دهد که در آن منطقه اتصال را به عنوان محل تقاطع عضوهای سازه ای تعریف می کند و سختی اتصال را بصورت تقریبی محاسبه می کند Inoda و Matsuo [۷] به ارائه یک روش برای ارزیابی مقدار سختی اتصال L شکل می پردازند و قسمتی از جابجایی را که منحصرًا مربوط به منطقه اتصال می شود در محاسبات منظور می نمایند.

Nicolidis و Gangadharan [۸] در سال ۱۹۹۰ در تحقیقی ضمن عنوان این مطلب که انعطاف پذیری در اتصالات یک فاکتور مهم در طراحی بدنه خودرو است، دو مدل سه بعدی کلی را (ساده و پیچیده) برای نشان دادن رفتار انعطاف پذیر اتصالات چند شاخه ای^۶ ارائه کرده اند. مدل ساده شامل فنرهای پیچشی برای اتصال شاخه ها به یکدیگر است و حرکت شاخه ها در صفحات مختلف مستقل از هم در نظر گرفته شده است به این معنی که از اثر پیچش هر شاخه در بارگذاری بر روی آن شاخه صرف نظر شده است. در ساخت

چشم پوشی از اثر انعطاف پذیری اتصالات و در نظر گرفتن آنها به عنوان اتصالات صلب، خطای بزرگی 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 در نظر گرفتن اتصالات سازه ای به عنوان یک اتصال صلب نتایج مفیدی در پی نخواهد داشت.

Chang [۴] مقاومت و سختی سازه بدنه خودرو را در مدل اجزا محدود ضمن در نظر گرفتن سختی اتصال محاسبه کرده و بر اهمیت در نظر گرفتن سختی اتصال تاکید می کند Kamada و Sakurai [۱] در تحقیقات خود نتایج محاسبه شده مربوط به خصوصیات استاتیکی (یعنی سختی خمشی و پیچشی) و ویژگیهای دینامیکی (یعنی فرکانس تشدید) را با نتایج تست مقایسه می کنند و نتیجه می گیرند که خصوصیات دینامیکی نیز تحت تاثیر سختی اتصال هستند. در همین راستا Rao [۵] گزارش داد که از یک تست دینامیکی برای بدست آوردن مقدار سختی بهینه اتصال سازه ای استفاده کرده است و از این طریق

بین جابجایی‌های 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.

Zho و Nicolidis [۱۰] در سال ۱۹۹۴ 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 فیزیکی طرح مورد نیاز 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 در نظر 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 در نهایت اتصالاتی که کمترین جرم مصرفی را دارد و در عین حال محدودیتهای تولید و شکل دهی را در نظر می‌گیرد انتخاب می‌شود.

مدل پیچیده نیز اثر پیچش ذکر شده در نظر گرفته شده است. در ادامه با استفاده از یک روش آماری بر روی پاسخ سیستم به بارهای استاتیکی، پارامترهای مدلها تعیین می‌شود. در نهایت دو مدل ارائه شده از جهت توانایی 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 در نظر گرفتن انعطاف پذیری اتصال و اثر پیچش هر شاخه در صفحات دیگر، انحراف مرکز چرخش شاخه های اتصال را نیز در نظر می‌گیرد. پارامترهای این مدل شامل سختی فنر پیچشی، محل قرار گرفتن این فنرها و جهت گیری صفحاتی که فنرهای پیچشی در آن قرار می‌گیرند است. در ادامه عنوان می‌کنند که در بعضی حالات رفتار اتصال را می‌توان با استفاده از مدل‌های ساده‌تر به طور دقیق 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 پیچیدگی‌های مختلف ارائه شده است و با استفاده از یک روش آماری در کم کردن اختلاف

Piterson و Doebling [۱۱] در سال

۱۹۹۵ به اندازه گیری دقیق ماتریسهای سختی سازه از طریق انجام آنالیز مودال با استفاده از شکل مودها، فرکانس مودال و سختی اندازه گرفته شده پرداخته‌اند و به دلیل در نظر گرفتن سختی اتصال به نتایج بهتری 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 در نظر می‌گیرند و عنوان می‌کنند که بهینه‌سازی طرح بر اساس حداقل جرم مورد استفاده در بدنه و در نظر گرفتن ظرفیت میرایی مودهای ارتعاش آزاد سیستم^۷ انجام می‌شود.

مجموعه تحقیقات بالا نشان دهنده این مطلب است که اتصالات در بدنه خودرو رفتار غیر صلب دارند. سختی اتصالات نه تنها بر روی سختی‌های خمشی و پیچشی بدنه تاثیر می‌گذارد بلکه بر روی مقاومت بدنه و نیز بر روی پاسخهای ارتعاشی و رفتار 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 منحصرًا مربوط به منطقه اتصال می‌شود و نیز اندازه گیری مقدار سختی اتصال است. برای این منظور بارگذاریهایی در جهت های مهمترین بارهای وارده به این 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 از نمونه و اعمال قیدها و بارهای اعمالی پاسخ اتصال به بارگذاریهای انجام شده واقعی محاسبه شده و در نهایت به مقایسه نتایج پرداخته خواهد شد.

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

جوشها، الگوی نقطه جوش کاری، وضعیت تقویتی استفاده شده در منطقه اتصال اشاره کرد. در تحقیق انجام شده پارامترهای ذکر شده برای یک اتصال ثابت فرض می شوند و هدف فقط اندازه گیری مقدار سختی اتصال برای یک اتصال معین با شرایط و پارامترهای 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 کرده اند، در این تحقیق روشی برای اندازه گیری سختی اتصال T شکل ارائه می شود.

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 و نقطه اتصال نقطه ای است که در آن محورهای خنثی اجزاء سازه ای یعنی ستون و رکاب در منطقه اتصال همدیگر را قطع می کنند. در حالتی که محورهای خنثی

همدیگر را قطع نمی کنند، 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 می شود که تنها جابجایی حاصل از بارگذاری در دو جهت نشان داده شده حائز اهمیت است زیرا این بارگذاریها باعث اعمال گشتاورهای پیچشی قابل ملاحظه ای به منطقه اتصال می شوند. در صورتیکه نیروهای وارده در راستای ستون (F_z) به دلیل بالا بودن سختی محوری ستون و سختی خمشی رکاب باعث ایجاد تغییر مکان قابل ملاحظه ای نخواهد شد. به همین دلیل سختی اتصال مربوط به این دو جهت بارگذاری نیز مورد مطالعه قرار می گیرد. برای بدست آوردن سختی اتصال در این دو جهت، صفحاتی به دو سر رکاب جوش داده و رکاب در آن نقاط مقید می شود و در فاصله مشخصی از مرکز اتصال روی ستون، در دو جهت نشان داده شده بارگذاری انجام می شود.

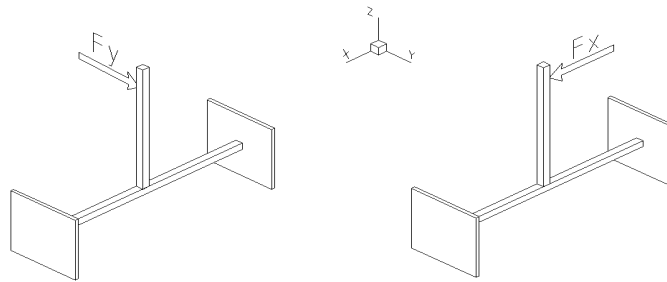
همدیگر را قطع نمی کنند، نقطه ای که مجموع فاصله آن تا هر محور خنثی کمترین باشد، نقطه اتصال نامیده می شود. اگر به بارهای وارده به این اتصال در شکل (۱) توجه شود، مشاهده می شود که تنها جابجایی حاصل از بارگذاری در دو جهت نشان داده شده حائز اهمیت است زیرا این بارگذاریها باعث اعمال گشتاورهای پیچشی قابل ملاحظه ای به منطقه اتصال می شوند. در صورتیکه نیروهای وارده در راستای ستون (F_z) به دلیل بالا بودن سختی محوری ستون و سختی خمشی رکاب باعث ایجاد تغییر مکان قابل ملاحظه ای نخواهد شد. به همین دلیل سختی اتصال مربوط به این دو جهت بارگذاری نیز مورد مطالعه قرار می گیرد. برای بدست آوردن سختی اتصال در این دو جهت، صفحاتی به دو سر رکاب جوش داده و رکاب در آن نقاط مقید می شود و در فاصله مشخصی از مرکز اتصال روی ستون، در دو جهت نشان داده شده بارگذاری انجام می شود.

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 و نقطه اتصال نقطه ای است که در آن محورهای خنثی اجزاء سازه ای یعنی ستون و رکاب در منطقه اتصال همدیگر را قطع می کنند. در حالتی که محورهای خنثی

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 و نقطه اتصال نقطه ای است که در آن محورهای خنثی اجزاء سازه ای یعنی ستون و رکاب در منطقه اتصال همدیگر را قطع می کنند. در حالتی که محورهای خنثی



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

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

۴ - جابجایی نقطه اثر بارگذاری ناشی از انعطاف پذیری خمشی رکاب (سختی خمشی رکاب): δ_4
یعنی:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$$

(۱)

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

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

وقتی در جهت نشان داده شده در شکل (۲- الف) به ستون بار وارد می شود سختی منطقه اتصال مربوط به این جهت بارگذاری $k_{\theta x}$ نامیده می شود. 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_2 (مجهول مسئله)

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:

$$\delta_3 = L \times \omega \quad (2)$$

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

$$\delta_2 = \delta - (\delta_1 + \delta_3 + \delta_4) \quad (3)$$

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:

$$\gamma = \frac{\delta_2}{L} \quad (4)$$

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 در همان 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 و δ_4 که جابجایی های مربوط به رکاب هستند بار F_y به نقطه اتصال منتقل می شود که نتیجه گشتاور M_x و نیروی F'_y است. برای این منظور رکاب از دو طرف کاملاً درگیر شده و سپس در منطقه اتصال گشتاور M_x و نیروی F'_y اعمال می شود تا بتوان میزان پیچش منطقه اتصال تحت اثر گشتاور M_x را ارزیابی کرده و از آن طریق مقدار δ_3 را محاسبه نمود. سپس جابجایی منطقه اتصال به خاطر نیروی F'_y را بدست آورده که این مقدار خود نشان دهنده δ_4 است. شکل‌های (۲ -

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.

اثر بارگذاری β نامیده می شود 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

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

$$k_{\theta x} = \frac{M_x}{\gamma} \quad (5)$$

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

$$k_{\theta x} = \frac{F_y \times L^2}{\delta_2} \quad (6)$$

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

گشتاور M_y باعث تابیدن رکاب حول منطقه اتصال می‌شود و نیروی F'_x باعث جابجایی منطقه اتصال در جهت محور X می‌شود. ولی می‌توان از جابجایی ناشی از نیروی محوری F'_x صرف نظر کرد زیرا مقدار سختی رکاب در راستای X نسبت به سایر سختیها بسیار بالاست و جابجایی منطقه اتصال در اثر این نیرو بسیار ناچیز و قابل

صرف نظر کردن است (این موضوع در نتایج 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 می‌شود تا میزان پیچش منطقه اتصال در اثر گشتاور M_y به دست آید. در این صورت می‌توان مقدار β_3 و نیز میزان 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 می‌دهند.

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

۴ - جابجایی نقطه اثر بارگذاری به خاطر انعطاف پذیری محوری رکاب (سختی محوری رکاب) : β_4 یعنی

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 \quad (7)$$

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 مقید می‌شود و سپس در همان نقطه اثر نیرو، بار F_x وارد می‌شود. بدین ترتیب مقدار جابجایی نقطه اثر نیرو ناشی از انعطاف پذیری ستون یعنی β_1 بدست می‌آید.

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

انجام آزمایشها

آماده سازی نمونه آزمایش

نمونه اتصال مورد استفاده در این

تحقیق، اتصال

ستون میانی به رکاب و کفی یک وانت دو کابین است (شکل ۵) که در داخل کشور طراحی و ساخته شده است. این اتصال از نوع اتصال T شکل است. ستون از سه قسمت رویه، آستر و تقویتی تشکیل شده و رکاب نیز با استفاده از سه قطعه رویه، آستر و لچکی ساخته شده است. ضخامت این اجزاء بین ۰/۸ تا ۱/۵ میلیمتر است و جنس تمامی آنها ST12 می باشد (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 می شود. سپس دو 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، صفحه های مناسبی طراحی و ساخته شد و به دو سر رکاب جوش داده

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

$$\beta_3 = L \times \theta \quad (8)$$

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

$$\beta_2 = \beta - (\beta_1 + \beta_3 + \beta_4) \quad (9)$$

با داشتن مقدار β_2 باید جابجایی زاویه ای متناظر با آن تعیین شود. این مقدار را که برحسب رادیان است، η نامیده که به طریق زیر محاسبه می شود:

$$\eta = \frac{\beta_2}{L} \quad (10)$$

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

$$k_{\theta y} = \frac{M_y}{\eta} \quad (11)$$

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

$$k_{\theta y} = \frac{F_x \times L^2}{\beta_2} \quad (12)$$

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.

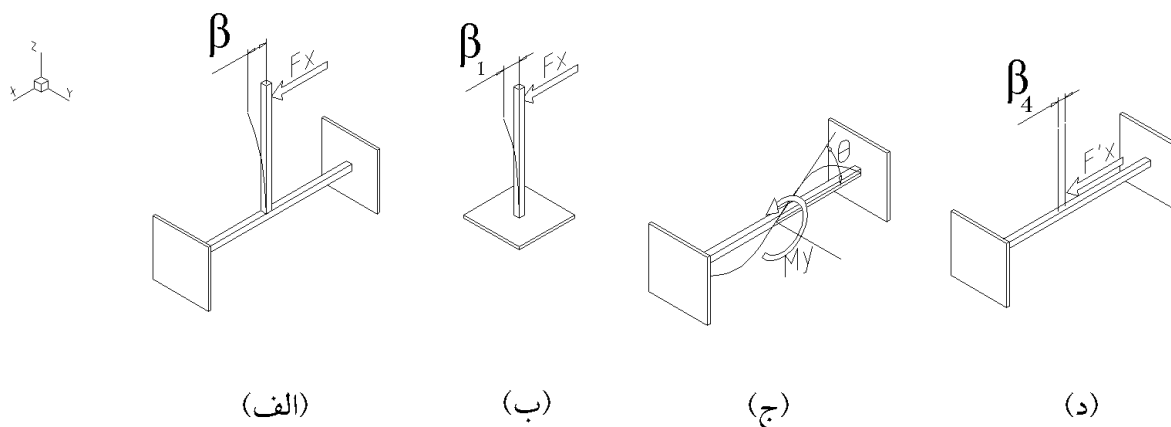
آزمایش مربوط به اندازه گیری مقدار β آزمایش شماره ۲ نامیده می‌شود که وضعیت نمونه، شماره و موقعیت سنج‌های اندازه‌گیری در این بارگذاری در شکل (۴-ب) دیده می‌شود.

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

شد. نمونه برای بارگذاریهای ۳ و ۴ نیز با برش ستون از بالای محل اتصال و سپس با جوش دادن صفحه مشابه نمونه اول به انتهای بریده ستون ساخته 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 می‌شود آزمایش شماره ۱ نامیده می‌شود. شکل (۴-الف) شماره و موقعیت نمونه و سنج‌های اندازه گیری در این بارگذاری را نشان می‌دهد. با دقت در این بارگذاری (شکل ۲)



(الف)

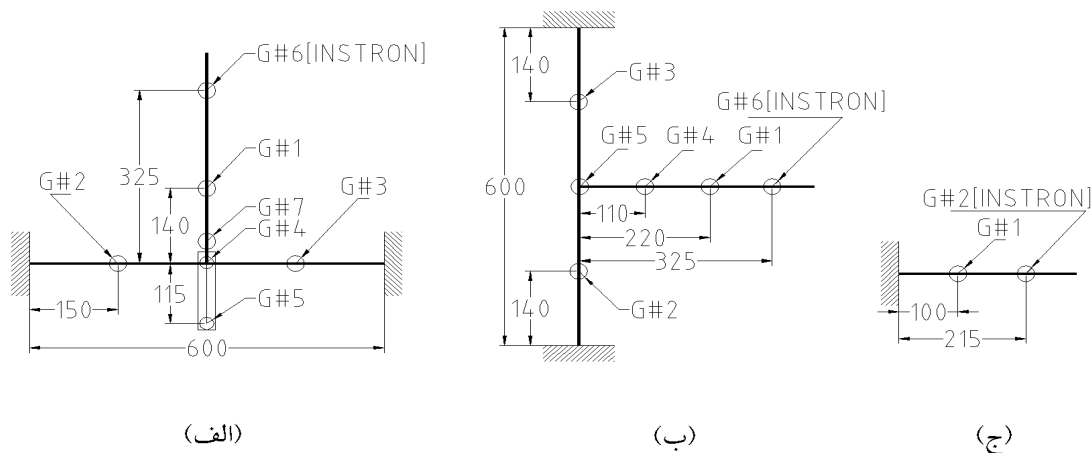
(ب)

(ج)

(د)

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

(الف و ب): آزمایشهای شماره ۲ و ۴، (ج و د): گشتاور و نیروی ناشی از بار F_x در آزمایش شماره ۲.



شکل ۴: شماره و موقعیت سنجه های اندازه گیری بر روی نمونه برای (الف): بارگذاری شماره ۱، (ب): بارگذاری شماره ۲، (ج): بارگذاری شماره ۳ و ۴.

به طور جداگانه انجام شود زیرا چنین شرایطی یعنی وجود انتهای درگیر در آزمایش شماره ۱ و ۲ وجود ندارد. به این ترتیب آزمایشهایی که برای بدست آوردن مقادیر θ_4 و β_4 انجام می دهیم،

گشتاور M_y قرار می گیرد. 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

در بررسی نتایج آزمایشهای انجام شده این موارد مشاهده می شود:

همانطور که انتظار می رفت نتایج به دست آمده مربوط به تغییرات جابجایی برحسب نیروی وارده که در شکل (۶) نشان داده شده اند با تقریب خوبی یک روند خطی را نشان می دهند و تائید می کنند که بارگذاری در محدود الاستیک انجام شده است و اندازه گیریها از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. پس از باربرداری نیز مشاهده شد که سنجها بر روی عدد صفر باز می گردند 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 می دهد 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

آزمایشهای شماره ۳ و ۴ نامگذاری می شود. شکل (۴ - ج) شماره و موقعیت سنجه های اندازه گیری در این دو بارگذاری را نشان می دهد.

نمودارهای مربوط به نقطه اثر نیرو حاصل از بارگذاری پله ای در هر آزمایش به ترتیب در شکل (۶ - الف) (برای بارگذاری شماره ۱، (۶ - ب) برای بارگذاری شماره ۲،

(۶ - ج) برای بارگذاری شماره ۳، (۶ - د) برای بارگذاری شماره ۴، دیده می شوند. پس از پایان بارگذاریها اهرم بارگذاری به نقطه صفر بازگردانده شده و مشاهده شد که تمام سنجها جابجایی صفر را نشان می دهند. 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 (۶) نشان داده می شود.

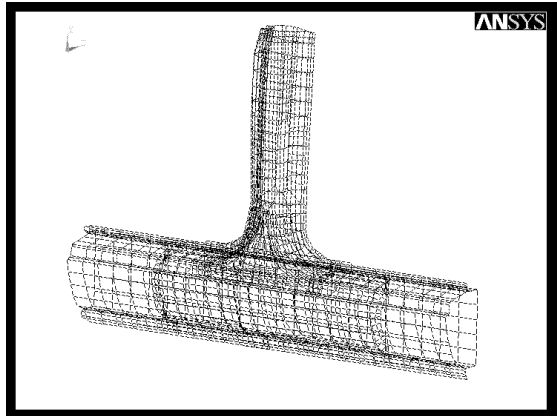
بررسی نتایج و تعیین مقادیر سختی بررسی نتایج آزمایشها

$$\delta = 3.5336 \times 10^{-3} \text{ (meter)}$$

$$\delta_1 = 0.2566 \times 10^{-3} \text{ (meter)}$$

$$\delta_3 = 1/9337 \times 10^{-3} \text{ (meter)}$$

$$\delta_4 = 63.8 \times 10^{-6} \text{ (meter)}$$



شکل ۵: مدل نهایی اجزاء محدود
اتصال.

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

$$\delta_2 = 1.2795 \times 10^{-3} \text{ (meter)}$$

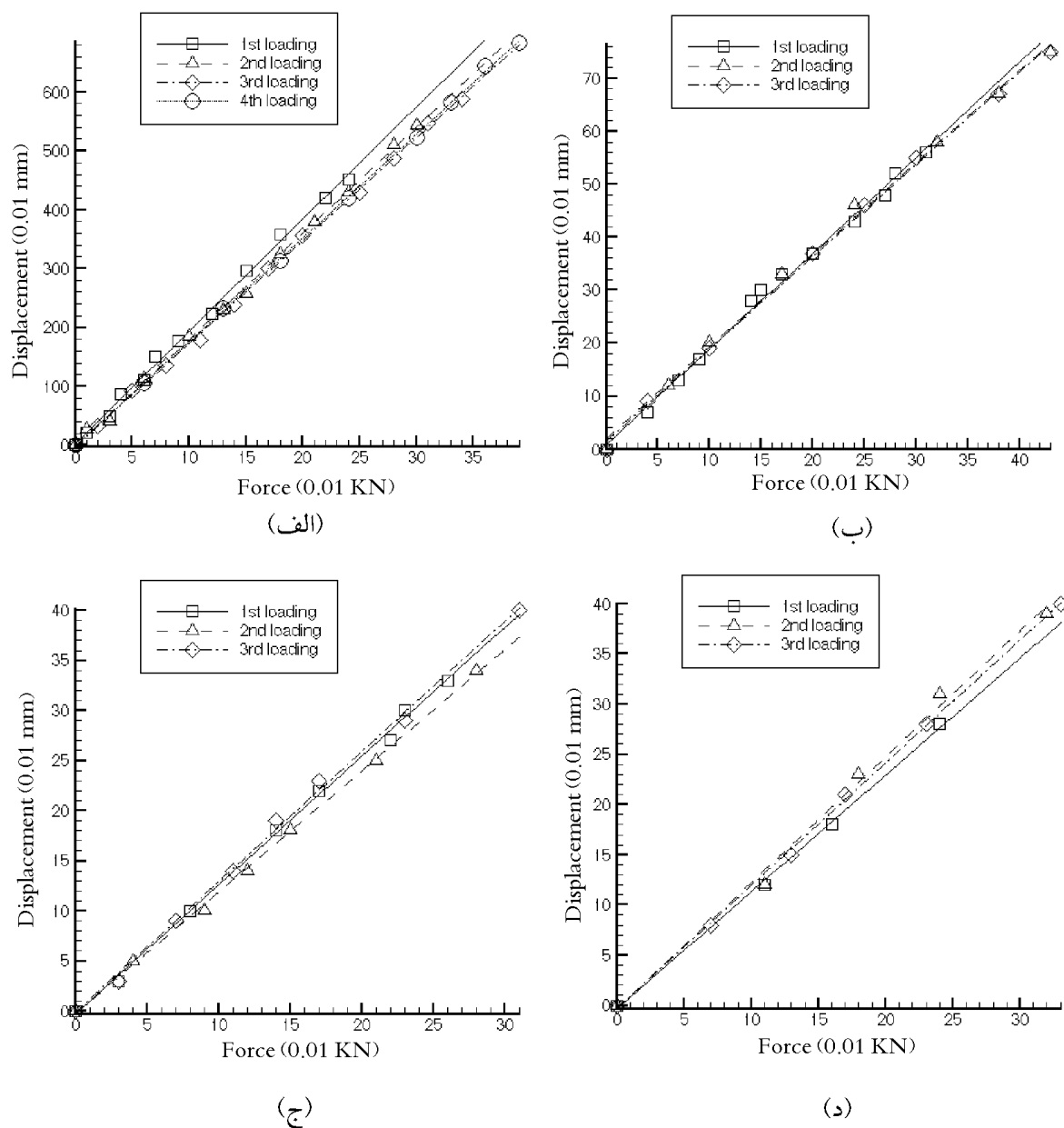
مقایسه مقدار این جابجایی با جابجایی کل و جابجایی مربوط به سایر قسمت های نمونه نشان دهنده این است که قسمت قابل توجهی از جابجایی کلی در نقطه اثر نیرو (۶۳/۸ درصد از مقدار δ) مربوط به منطقه اتصال است که

عرضی خودرو ($k_{\theta y}$, $k_{\theta x}$) نشان داده می شود.

همانطور که مشهود است مقدار سختی در یک سازه دارای رفتار خطی و الاستیک، کمیتی مستقل از مقدار بار یا مقدار جابجایی است و تنها سازه در مقابل باری که به آن وارد می شود یک جابجایی متناظر با آن بار از خود نشان می دهد. برای اندازه گیری سختی، جابجایی های متناظر با یک بار ۲۰۰ نیوتنی از روی نمودارهای رسم شده برای جابجایی مربوط به هر سنج به دست می آید. در هر مرحله از میانگین داده های نزدیک به هم به عنوان مقدار جابجایی متناظر با بار ۲۰۰ N استفاده می شود.

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

همانطور که در قبل توضیح داده شد از مقادیر به دست آمده از آزمایش های شماره ۱ و ۳ برای به دست آوردن کمیت های لازم برای محاسبه مقدار $k_{\theta x}$ استفاده می شود که این کمیتها به قرار زیر هستند:



شکل ۶ : 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 ۴ (برای توضیح بارگذاریهای به بخش

روش محاسبه سختی پیشگی رجوع شود).

$k_{\theta y}$ به دست می دهد که این مقادیر از این قرارند:

$$\beta = 0.3666 \times 10^{-3} \quad (\text{meter})$$

$$\beta_1 = 0.2446 \times 10^{-3} \quad (\text{meter})$$

$$\beta_3 = 42 \times 10^{-6} \quad (\text{meter})$$

$$\beta_4 = 0$$

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

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

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

$$M_y = F_x \times L$$

(۱۳)

$$\eta = \frac{\beta_2}{L}$$

(۱۴)

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

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

$$= 264.06 \quad (\text{KNm/rad})$$

ساخت مدل اجزاء محدود و شبیه سازی بارگذاریها

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

این خود نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن آن است. حال محاسبه $k_{\theta x}$ مورد نظر قرار می گیرد.

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

زاویه ای منطقه اتصال و L فاصله منطقه اتصال تا نقطه اثر نیرو باشد در این صورت:

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

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

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

$$k_{\theta x} = \frac{M_x}{\gamma}$$

$$= \frac{65}{3.94 \times 10^{-3}}$$

$$= 16497.5 \quad (\text{Nm/rad})$$

$$= 16.50 \quad (\text{KNm/rad})$$

محاسبه سختی پیچشی حول محور Y ها (محور عرضی خودرو)

در مورد این سختی هم مقادیر به دست آمده از آزمایشهای شماره ۲ و ۴ کمیت های لازم برای محاسبه مقدار سختی

نمونه مورد آزمایش برش خورده است، ساخته می‌شود.

اعمال شرایط مرزی و انجام بارگذاری

پس از شبیه سازی شرایط آزمایش برای هر کدام از بارگذاریهای شماره ۱ تا ۴ به انجام بارگذاری های مشابه شرایط آزمایش پرداخته می‌شود. برای این منظور بر روی مدل، درجات آزادی گره ها در محل اتصال به قیدها برابر صفر قرار داده می‌شود. بار وارده نیز مطابق شرایط انجام هر آزمایش و در همان محل بارگذاری اعمال می‌شود. در مورد بارگذاریهای شماره ۱ و ۳ بار بر روی گرههایی که در زیر اهرم بارگذاری قرار داشتند وارد شد و در مورد بارگذاریهای شماره ۲ و ۴ مانند شرایط آزمایش که بارگذاری گسترده بود، بار بر روی سطوحی متناظر به صورت بار فشاری وارد شد.

مقایسه نتایج تحلیل عددی و کار

آزمایشگاهی

حال نتایج به دست آمده از اندازه گیریهای آزمایشگاهی و نتایج تحلیل به روش اجزاء محدود مقایسه می‌شود. این

وجود ندارد از تحلیل به روش اجزاء محدود برای ارزیابی صحت جوابهای تجربی استفاده می‌شود. برای ساخت مدل اجزاء محدود سازه مورد نظر دو راه معمول است: ۱ - استفاده از المانهای تیر ۲ - استفاده از المانهای پوسته‌ای. المانهای تیر قادر به ارائه مدل حقیقی از اتصال نیستند و مناسبترین نوع المان، المان پوسته‌ای است. در این تحلیل با استفاده از المان SHELL 63 یک مدل اجزاء محدود از نمونه مورد آزمایش در نرم افزار اجزاء محدود ANSYS 5.4 ساخته شد و پس از ساخت مدل، فعالیتهای معمول کنترل کیفیت مدل شامل کنترل مشخصات المانها و اتصال صحیح آنها انجام شد. در مرحله بعد پس از مونتاژ قطعات بر روی یکدیگر با یکسان گرفتن درجات آزادی گرهها در محلهای نقطه جوش، مدل اتصالات نیز ساخته شد.

شکل (۵) تصویری از مدل اجزاء محدود نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد. مدل نمونه مورد استفاده برای آزمایشهای شماره ۳ و ۴ نیز به راحتی از مدل کامل نمونه با برش زدن ستون از محلی که در

عمل برای هر کدام از چهار حالت بارگذاری به تفکیک انجام شده و جابجایی های به دست آمده توسط ساعتهای اندازه گیری در هر آزمایش را با جابجایی های به دست آمده برای گرههای متناظر بر روی مدل مورد مقایسه قرار می گیرند. مانند قبل مقایسه برای مقدار بار

۲۰۰ نیوتن انجام می گیرد.

در مورد اعداد مربوط به سنجه های اندازه گیری، این اعداد به وسیله میانگین گرفتن بین اعداد به دست آمده برای مقدار بار ۲۰۰ نیوتن در هر کدام از تکرارهای بارگذاری از روی نمودارهای رسم شده برای هر ساعت محاسبه می شود. جدول (۱) نشان دهنده جابجایی های به دست آمده از نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش شماره ۱، جدول (۲) نشان دهنده جابجایی های به دست 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 (۴) نشان دهنده جابجایی های به دست آمده از نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش شماره ۴ برای بار ۲۰۰ نیوتن در مقایسه با مقادیر به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود برای

مقدار بار و موقعیت گرهی متناظر است. 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 این سختی 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 تفاوتی بین مقادیر تجربی و محاسباتی وجود دارد. این قسمت اختصاص به بررسی این اختلافها و حتی المقدور تبیین آنها دارد. مقایسه نتایج تجربی و محاسباتی مربوط به سنجه شماره ۳ در بارگذاری شماره ۱ (جدول ۳) حدود ۴۰ درصد اختلاف را نشان می دهد. این اختلاف به خاطر تفاوتی بین مدل تحلیلی و نمونه

آزمایشگاهی است. رویه رکاب از دو قسمت طولی تشکیل شده است که به روش نقطه جوش متصل می‌شوند. تعداد نقطه جوشها در این محل کافی نیست و بار را به خوبی منتقل نمی‌کند. به دلیل بسته بودن رکاب امکان افزایش نقطه جوشها وجود نداشته و برای رفع این مشکل سراسر محل اتصال جوش داده 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 به طرفین منتقل نمی‌شود. از سوی دیگر شبیه‌سازی دقیق اتصال دو قطعه رکاب نیز در مدل تحلیلی مقدور نیست و باعث ایجاد خطا شده است.

در بررسی نتایج بارگذاری شماره ۳ اختلافی معادل ۴۷ درصد بین نتایج تحلیل عددی برای سنج شماره ۲ (محل اعمال بار) دیده می‌شود. از سوی دیگر اعداد مربوط به سنج 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 ۴ نیز که مربوط به همین قید و نمونه است انطباق مناسبی را نشان می‌دهد که تایید مجددی بر کارکرد مناسب قید و نمونه است. ذکر این نکته مهم است که روش بارگذاری در بارگذاری شماره ۳ و ۴ متفاوت است یعنی در بارگذاری شماره ۳ به صورت متمرکز و در بارگذاری شماره ۴ بدلیل محدودیتهای هندسی محل وارد کردن بار، به صورت گسترده است. از سوی دیگر مقایسه اعداد به دست آمده در نقطه اثر بارگذاری شماره ۱ با نقطه مشابه در بارگذاری شماره ۳ نشان می‌دهد 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 و نان با دور شدن از نقطه بارگذاری، همخوانی خوبی بین نتایج تجربی و محاسباتی دیده می‌شود زیرا در آزمایش شماره ۴،

بارگذاری گسترده باعث جلوگیری از تمرکز تنش و جابجائی‌های موضعی شده و انطباق کلیه نتایج را دربر دارد.

بررسی این اختلاف بر در نظر گرفتن اصل سنت ونان در تفسیر نتایج تجربی و تحلیل عددی تاکید می‌کند. در زمانی که مقدار بار و یا سختی نمونه در جهت بارگذاری

جدول ۱: مقایسه نتایج برای بارگذاری شماره ۱.

شماره سنجه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
نتایج آزمایش شماره ۱ (0.01 mm)	۱۳۱/۴	۱/۲	۵/۸۴	۸/۵	-۶۴	۳۵۳/۳۶	۲۶/۴۸
نتایج تحلیل اجزاء محدود (0.01 mm)	۱۲۶	۱/۰۹	۳/۴۸	*	*	۳۰۷	۲۲/۸
درصد اختلاف	۴/۱	۹/۲	۴۰/۴	—	—	۱۳/۱	۱۳/۹

*: برای این نقاط داده اجزاء محدود نداریم.

جدول ۲: مقایسه نتایج برای بارگذاری شماره ۲.

شماره سنجه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
نتایج آزمایش شماره ۲ (0.01 mm)	۱۳/۶۱	۲/۳۵	۱/۸۲	۴/۶۶	۰/۰	۳۶/۶۶
نتایج تحلیل اجزاء محدود (0.01 mm)	۱۳/۴۹	۲/۱۵	۱/۸۴	۳/۶۶	۰/۲۲	۳۵/۵۲
درصد اختلاف	۰/۹	۸/۵	-۱/۱	۲۱/۵	—	۳/۱

جدول ۳: مقایسه نتایج برای بارگذاری شماره ۳.

شماره سنجه	۱	۲
نتایج آزمایش شماره ۳ (0.01 mm)	۴/۰۹	۲۴/۴۶

۱۲/۹۶	۴/۰۵	نتایج تحلیل اجزاء محدود (0.01 mm)
۴۷	۱	درصد اختلاف

جدول ۴: مقایسه نتایج برای بارگذاری شماره ۴.

شماره سنج	۱	۲
نتایج آزمایش شماره ۴ (0.01 mm)	۴/۳۷	۲۵/۶۶
نتایج تحلیل اجزاء محدود (0.01 mm)	۴/۲۵	۲۴/۸۵
درصد اختلاف	۲/۷	۳/۱

زیاد باشد این موضوع اهمیت بیشتری می‌یابد.

خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله رفتار الاستیک یک سازه T شکل بدنه خودرو مورد بررسی قرار گرفت و یک روش برای ارزیابی مقدار سختی در این نوع اتصال ارائه گشت. برای اطمینان از صحت پاسخهای بدست آمده شبیه سازی آزمایش با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شد. بارگذاری و حل یک مدل اجزاء محدود نشان داد که نتایج عددی و نتایج تجربی انطباق قابل قبولی را

به همراه دارند. بررسی نتایج به دست آمده نشان داد که در نظر گرفتن انعطاف پذیری اتصالات در رفتار کلی سازه بسیار مهم است و صرف نظر کردن از آن خطای بزرگی را ایجاد می‌نماید. اگر به سهم جابجایی های مربوط به منطقه اتصال نسبت به جابجایی کل نقطه اثر نیرو توجه شود مشاهده می‌گردد که درصد قابل توجهی از این

جابجایی ها مربوط به این منطقه است و حتی در یک تحلیل اجمالی بدنه نیز در نظر گرفتن آن الزامی به نظر می‌رسد. در صورتیکه ارزیابی دقیقی از وضعیت رفتار

از طریق طرح پژوهشی به شماره ۶۱۸/۱/۵۳۱ و امکانات آزمایشگاهی و نمونه‌سازی گروه بهمن میسر نبود. نویسندگان سپاسگزاری خود را برای برخورداری از این مساعدتها اعلام می‌دارند.

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

تقدیر و تشکر

انجام این تحقیق بدون استفاده از کمک‌های مالی دانشکده فنی دانشگاه تهران

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.

- 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 - Doebbling, 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
-

4 - Center Pillar

5 - Roof Rails

7 - Damping Capacity of Free Vibration Modes