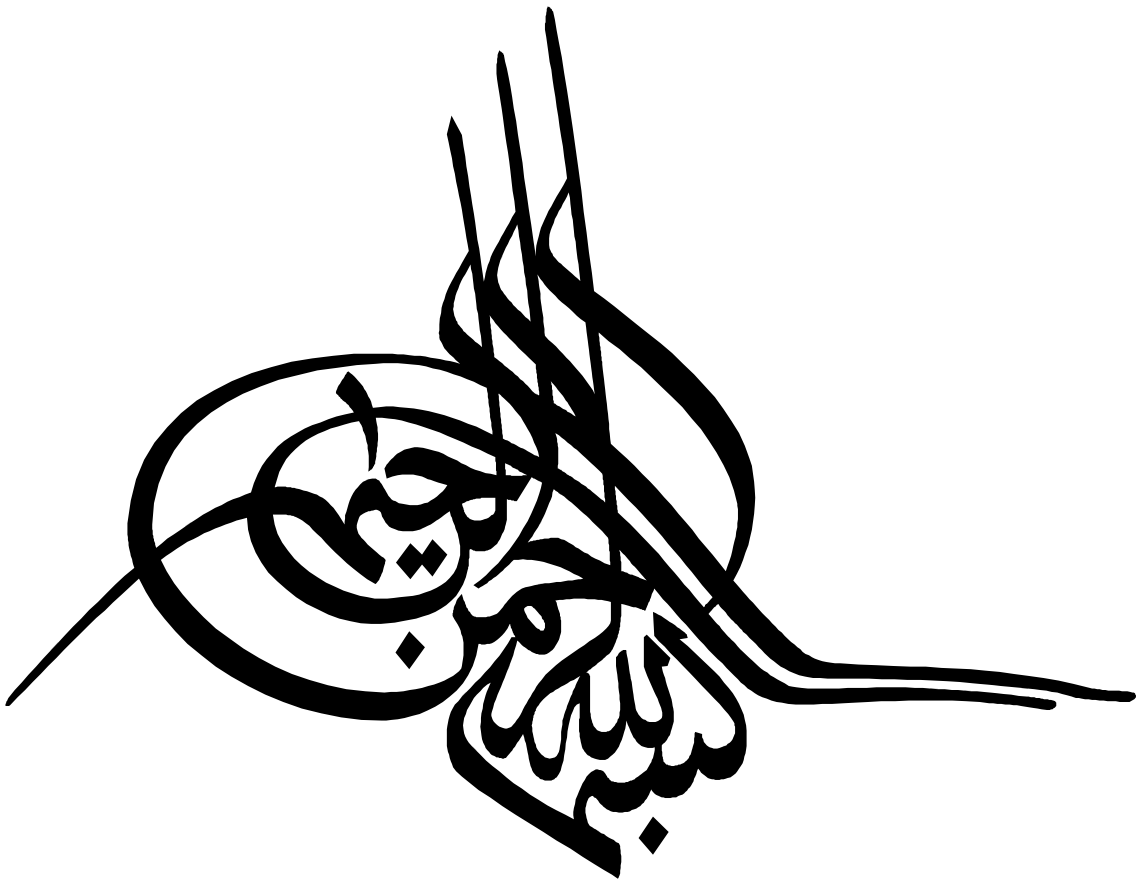
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه علم و صنعت ایران

مدلسازی و تحلیل تنش سر انسان در برخورد از مقابل
با
یک جسم تغییر فرم پذیر به روش المان محدود

نظام‌علی بختیاری

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک-بیومکانیک

استاد راهنما: دکتر سید محمد رجایی

دانشکده مهندسی مکانیک

بهار ۸۳

تقدیم به

صبر مادر و تلاش پدر که درخت جوانی ام را شکوفا نمودند

فداکاری و وفاداری همسرم که در طول این پایان نامه همواره یاورم بودند

و

غنچه همیشه خندان باغ زندگیمان نادیا

تقدیر و تشکر

با سپاس از الطاف بیکران الهی و تشکر از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر سید محمد رجایی به پاس راهنمایی‌های ارزشمند و حمایت‌های بی‌دریغ ایشان در انجام این پایان‌نامه، بر خود لازم میدانم که از آقایان دکتر مصطفی رستمی و دکتر مهدی نویدبخش که زحمت بازخوانی و داوری این پایان‌نامه را تقبل فرمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

در پایان از همسر گرامیم که زحمت تایپ قسمتی از پایان‌نامه را کشیدند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده:

بررسی آسیب‌های وارده به سر با توجه به وجود سیستم کنترل مرکزی در آن همواره مورد توجه بوده است. علت اکثر آسیب‌های وارده بر سر اصابت سر به یک جسم می‌باشد. میزان تنش وارده بر سر در برخورد با جسم خارجی به طبیعت آن جسم وابسته است به طوریکه هر چه جسم نرمتر باشد میزان تنش وارده بر سر کمتر می‌باشد. با تکیه بر این موضوع استفاده از موادی که کاهنده تنش هستند روز به روز در صنعت افزایش می‌یابد. آسیب‌های وارده به سر عمدتاً در حوادث رانندگی اتفاق می‌افتد، لذا کارشناسان می‌کوشند تا با استفاده از این مواد در ساختار اتومبیل‌ها خصوصاً در فضای داخلی آنها میزان نیروی وارده به سرنشین را حین برخورد کاهش دهند. فوم‌های فلزی، پلیمرها و فوم‌های پلیمری مواد تغییرفرم پذیری هستند که در صنعت به عنوان مواد جاذب انرژی به کار می‌روند. این مواد ضمن استحکام مطلوب دارای دانسیته پایینی هستند. در این مطالعه نیز پدیده برخورد، به منظور ارزیابی نقش مواد تغییر فرم پذیر در جذب انرژی مورد تحلیل واقع می‌شود. در پدیده برخورد، سر با سرعت ثابت ۶/۵ m/s به مانع برخورد می‌کند و به کمک کد LS-DYNA و به روش مقایسه‌ای بین آلومینیوم، آلولایت، آلپوراس، پلیمرABS و فوم انبساط یافته پلی‌پروپیلن انجام می‌پذیرد. مدل المان محدود سر با استفاده از داده‌های آناتومیکی و بر اساس شاخص ۵۰ درصدی مرد جامعه در نظر گرفته شد. روش مقایسه‌ای بر حسب بیشترین تنش وارده به سر، حداکثر کرنش و شتاب کاهشی انجام گرفت تا اثر این موانع بر سر مورد بررسی واقع شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد آلومینیوم بیشترین تنش را به سر وارد می‌کند در حالیکه فوم آلومینیومی آلپوراس کمترین تنش را به سر وارد می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر تنش، کرنش و شتاب کاهشی وارده به سر وابستگی مستقیم به دانسیته، تنش تسلیم و الاستیسیته موانع دارد. هر چه مانع دارای تنش تسلیم پایینتر ودانسیته کمتری باشد مقدار تنش و کرنش و شتاب کاهشی وارده به سر کمتر خواهد بود به طوریکه مقدار تنش وارده بر سر در برخورد با فوم آلپوراس با

دانسیته $۲۰۰-۲۵۰ Kg/m^3$ معادل ۲/۳MPa به دست آمد که در محدوده استاندارد و ایمن وجود دارد و نشان دهنده آنست که این فوم قسمت اعظم انرژی جنبشی حاصل از برخورد را جذب می‌کند و سر را در محدوده ایمن نگه می‌دارد.

فهرست مطالب	صفحه

فصل۱: مقدمه و اهمیت موضوع ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- هدف ۴

۱-۳- اهمیت موضوع ۴

فصل۲: تعاریف و اصطلاحات ۶

۲-۱- تعاریف و اصطلاحات به کار رفته در این مطالعه ۷

۲-۱-۱- سازگاری خودرو ۷

۲-۱-۲- شدت تهاجم خودرو ۷

۲-۱-۳- شایستگی ایمنی خودرو ۷

۲-۱-۴- شدت وقوع حادثه ۸

۲-۱-۵- نسبت مرگ و میر ۸

۲-۱-۶- پاسخ سرنشین به صدمات و جراحات ۸

۲-۱-۷- AIS ۸

۲-۲- معیارهای استاندارد آسیب سر ۹

۲-۲-۱- معیار WSTC ۹

۲-۲2- معیار آسیب سر ۱۰

۲-۲-۳- معیار عملکرد ۱۱

۲-۲-۴- معیار ارزیابی خودرو ۱۱

۲-۳- فیلترهای CFC ۱۱

فصل۳: مروری بر کارهای انجام شده ۱۳

۳-۱- مقدمه ۱۴

۳-۲- تحقیقات و بررسی های انجام شده ۱۴

فهرست مطالب	صفحه

فصل۴: آناتومی و خواص سر ۳۴

۴-۱- مقدمه ۳۵

۴-۲- آناتومی‌سر ۳۵

۴-۳- فرایند استخوانی‌شدن ۴۰

۴-۴- مرز بین استخوان‌ها ۴۱

۴-۵- نقاط آنتروپومتری در سر ۴۲

۴-۶- شکلهای غیرطبیعی سر ۴۳

۴-۷- جمجمه و دوران رشد ۴۶

۴-۸- اندازه آناتومیکی سر ۴۸

۴-۹- خواص مکانیکی و مدل المان محدود سر ۵۰

فصل۵: مواد تغییر فرم پذیر ۵۶

۵-۱- مقدمه ۵۷

۵-۲- تعریف ۵۷

۵-۳- لزوم استفاده از مواد جاذب انرژی ۵۷

۵-۴- انواع فوم‌های مورد استفاده در صنعت ۵۹

۵-۴-۱- فوم‌های پلیمری ۶۰

۵-۴-۲- فوم‌های پایه فلزی: ۶۶

۵-۵- قائده کلی جذب انرژی و انتخاب ماده مناسب ۷۱

۵-۶- ارزیابی مشخصات مواد جاذب انرژی ۷۴

۵-۷- عوامل مؤثر بر خاصیت فوم‌ها ۸۰

فهرست مطالب	صفحه

۵-۸- فواید و تفسیر نتایج حاصل از تست فوم‌ها ۸۳

۵-۹- نحوه انتخاب مواد جاذب انرژی ۸۹

فصل۶: تئوری و مدلسازی پدیدهٔ برخورد ۹۲

۶-۱- مقدمه ۹۳

۶-۲- تئوری برخورد ۹۳

۶-۳- نرم افزارهای تحلیلی در زمینه بیومکانیک ۹۷

۶-۴- تئوری برخورد در LS-DYNA ۹۹

۶-۵- تحلیل به کمک LS-DYNA ۱۰۰

۶-۵-۱- صفحات برخورد ۱۰۱

۶-۵-۲- معادله دینامیکی حرکت یک سیستم با یک درجه آزادی ۱۰۳

۶-۵-۳- تعیین نوع مواد در LS-DYNA ۱۰۴

۶-۶- روش تحلیل در LS-DYNA ۱۰۶

۶-۶-۱- مدلسازی ۱۰۶

فصل۷: نتایج تحلیل، بحث و نتیجه‌گیری ۱۱۱

۷-۱- مقدمه ۱۱۲

۷-۲- نتایج حاصل از تحلیل ۱۱۲

۷-۲-۱- برخورد سر به آلومینیوم ۱۱۲

۷-۲-۲- برخورد سر به مانع آلپوراس ۱۱۹

۷-۲-۳- برخورد سر به مانع ABS ۱۲۲

۷-۲-۴- برخورد سر به مانع آلولایت ۱۲۴

۷-۲-۵- برخورد سر به مانع EPP31 ۱۲۷

۷-۲-۶- مقایسه رفتار موانع در برخورد ۱۲۹

فهرست مطالب	صفحه

۷-۳- نتیجه گیری ۱۳۲

۷-۴- پیشنهادات ۱۳۷

فهرست جدولها	صفحه

جدول ۲-۱: انواع مختلف CFC ۱۱

جدول ۳-۱: خواص مکانیکی سر به عنوان ماده ویسکوالاستیک ۲۰

جدول ۳-۲: مقایسه عمق تورفتگی نقاط مختلف در جلوی خودرو ۳۱

جدول ۳-۳: مقادیرشتاب سینه، نیروی وارد بر ران و مقدار معیار استاندارد سر ۳۲

جدول ۳-۴: خواص بعضی از اجزای سر ۳۳

جدول ۴-۱: اندازه‌های آناتومیکی سر ۴۹

جدول ۴-۲:اندازه سر ۴۹

جدول ۴-۳:خواص استخوان جمجمه ۵۲

جدول ۴-۴: خواص مکانیکی جمجمه یک کودک شش ماهه ۵۲

جدول ۴-۵:ضخامت جمجمه و خواص آن برای دو سن مختلف ۵۳

جدول ۴-۶:حد تحمل بعضی از استخوانهای سر ۵۴

جدول ۴-۷:خواص مکانیکی سر ۵۴

جدول ۴-۸: حد تحمل استخوانهای پیشانی و صورت ۵۵

جدول ۵-۱: معیار طراحی برای فوم‌های پلیمری با ساختار فشار پایین ۶۳

جدول ۵-۲: محدودیت فاکتور g ۷۱

جدول ۵-۳: خواص فیزیکی و مکانیکی فوم‌های مورد آزمایش ۷۹

جدول ۵-۴: خواص ضربه‌ای فوم پلی‌استیرن ۸۸

جدول ۶-۱:نرم افزارهای کاربردی در زمینه بیومکانیک ۹۸

جدول ۶-۲: مواد در نظر گرفته شده در تحلیل ۱۱۰

جدول ۷-۱: مقایسه داده‌های بحرانی حاصل از تحلیل جهت مقایسه ۱۳۲

فهرست شکلها و نمودارها	صفحه

شکل ۲-۱:معیار WSTC ۹

شکل ۳-۱: مدل برخورد خودر به مانع ۱۵

شکل ۳-۲: مدل برخورد دو وسیله نقلیه از مقابل ۱۵

شکل ۳-۳: مدل سرنشین بر روی صندلی و موقعیت آن ۱۸

شکل ۳-۴: مدل المان محدود سر ۱۹

شکل ۳-۵: شبیه سازی برخورد سر با سطح برخورد دارای اصطکاک ۲۰

شکل ۳-۶: برخورد قطار با مانع ۲۱

شکل ۳-۷: مقدار تورفتگی در قطار حین برخورد ۲۱

شکل ۳-۸: مقدار نیروی فشاری و مقدار نیروی ضربه(impulse) ۲۲

شکل ۳-۹: پاسخ سرنشین به برخورد (سرعت ۶/۷ متر بر ثانیه می باشد) ۲۳

شکل ۳-۱۰: میزان تهدید زندگی بر اساس معیار HIC ۲۵

شکل ۳-۱۱: مقدار جراحت سر بر اساس HIC ناشی از برخورد ثانویه وصندلی تغییر فرم پذیر ۲۶

شکل ۳-۱۲: مدل المان محدود خودرو ۲۷

شکل ۳-۱۳: مدل المان محدود کیسه هوا ۲۸

شکل ۳-۱۴: مدل المان محدود انسان ۲۹

شکل ۳-۱۵: شبیه سازی مراحل مختلف برخورد به مانع ۳۰

شکل ۳-۱۶: موقعیت‌های مختلف تورفتگی در جلوی خودرو ۳۱

شکل ۳-۱۷: بررسی نتایج شتاب سر حاصل از شبیه سازی و تست برخورد ۳۲

شکل ۴-۱: استخوانهای سر ۳۷

شکل ۴-۲:لایه بیرونی(۱۱)، لایه درونی (۱۳) و لایه دیپلوئی(میانی) (۱۲) ۳۸

شکل ۴-۳: نمای برش عرض از سر ۳۸
شکل ۴-۴: سایر اجزای سر در یک تصویر CT در نمای برش عرضی ۳۸
شکل ۴-۵:درزهای بین استخوانی ۳۹
شکل ۴-۶: سایر درزهای بین استخوانی ۴۰
شکل ۴-۷: ملاجهای سر در دوران کودکی ۴۱
شکل ۴-۸: بعضی از نقاط آنتروپومتری در سر ۴۳
شکل ۴-۹: نقاط آنتروپومتری و شکلهای غیرطبیعی سر ۴۵
شکل ۴-۱۰: تغییرات سر بهنگام رشد ۴۶
شکل ۴-۱۱: جمجمه سر کودک (استخوانها، درزها، ملاجها) ۴۷
شکل ۴-۱۲: ملاجهای سر یک کودک ۴۸
شکل ۵-۱: اثر دانسیته بر استحکام فشاری فوم‌های صلب ۶۱
شکل ۵-۲:اثر دانسیته بر مدول فشاری فوم‌های صلب ۶۲
شکل ۵-۳:بار فشاری بر حسب درصد تغییرفرم فشاری فوم‌ها ۶۳
شکل ۵-۴:کاربرد فوم‌ها در فضای داخلی اتومبیل جهت راحتی و تزئینات ۶۵
شکل ۵-۵: استفاده از فوم برای پوشش دهی ستون B در خودرو ۶۶
شکل ۵-۶: به کارگیری جعبه ضربه در ریل جلویی اتومبیل ۶۸
شکل ۵-۷: فوم آلومینیوم استفاده شده در جعبه کاهش ضربه خودرو وسیله نقلیه ۶۹
شکل ۵-۸: نمودار تنش-کرنش فوم آلومینیوم در دانسیته‌های متفاوت ۷۰
شکل ۵-۹: نمودار تنش-کرنش یک ماده ایده‌آل جاذب انرژی ۷۲
شکل ۵-۱۰: نمودار تنش-تغییر فرم فوم پلی‌اورتان ۷۵

شکل ۵-۱۱: نمونه‌ای از دستگاه تست دینامیکی ضربه ۷۸

شکل ۵-۱۲: ساختار چهار نمونه فوم انتخاب شده جهت آزمایش ۷۸

شکل ۵-۱۳: دستگاه تست فشاری بر روی فوم‌ها ۸۰

شکل ۵-۱۴:نمودار تنش-کرنش فومEPS در نرخ کرنش‌های متفاوت ۸۱

شکل ۵-۱۵: نمودار تنش-کرنش فوم EPS در درصد رطوبت‌های مختلف ۸۱

شکل ۵-۱۶:نمودار تنش-کرنش فوم EPS در پیش‌بار فشاری مختلف ۸۲

شکل ۵-۱۷: دیاگرام انرژی فوم در دانسیته‌های مختلف ۸۳

شکل ۵-۱۸: دیاگرام انرژی جذب شده فوم در دانسیته‌های مختلف ۸۵

شکل ۵-۱۹: راندمان فوم در دانسیته‌های مختلف ۸۶

شکل ۵-۲۰: نمودار تنش-کرنس فوم پلی‌استیرن ۸۸

شکل ۵-۲۱:انتخاب مواد جاذب انرژی بر اساس کمترین حجم ۹۰

شکل ۵-۲۲:انتخاب فوم‌ها تا کرنش ۲۵ درصد بمنظور جذب انرژی ۹۱

شکل ۵-۲۳:نمودار اتخاب فومها بر اساس دانسیته و محدودیت جذب انرژی ۹۱

شکل ۶-۱:مکانیزم برخورد ۹۴

شکل ۶-۲:: مکانیزم برخورد جسم به مانع و نمودار شتاب کاهشی بر حسب زمان ۹۶

شکل ۶-۳: نمودار معیار حداکثر شتاب در مکانیزم برخورد ۹۷

شکل ۶-۴: نمودار ماده الاستیک خطی- کار سختی شده ۱۰۵

شکل ۶-۵: نمودار تنش-کرنش یک ماده الاستیک- پلاستیک ۱۰۶

شکل ۶-۶: دیاگرام تحلیل در LS-DYNA ۱۰۷

شکل ۶-۷: مدل المان محدود سر با مانع ۱۰۹

شکل ۶-۸: نمای المان محدود سر از نمای دیگر ۱۰۹

شکل ۷-۱:شکل تغییر یافته سر حین برخورد با مانع آلومینیومی..... ۱۱۳

شکل ۷-۲: فرم تغییر شکل یافته مانع آلومینیومی ۱۱۳

شکل ۷-۳:تنش ماکزیمم در سر در لحظه برخورد در ناحیه برخورد..... ۱۱۴

شکل ۷-۴:ماکزیمم تنش در مانع در لحظه برخورد(t=4 msec)..... ۱۱۴

شکل ۷-۵: نمودار تنش معادل بر حسب زمان در ناحیه برخورد در مانع آلومینیومی..... ۱۱۵

شکل ۷-۶: نمودار کرنش بر حسب زمان در مانع ۱۱۵

شکل ۷-۷: نمودار تنش بر حسب زمان در ناحیه برخورد سر..... ۱۱۶

شکل ۷-۸: نمودار تغییر فرم در جهت x نسبت به زمان در ناحیه برخورد..... ۱۱۷

شکل ۷-۹: نمودار شتاب کاهشی در سر در بازه زمانی برخورد..... ۱۱۸

شکل ۷-۱۰: نمودار مقدار کرنش سر در برخورد با مانع آلومینیومی..... ۱۱۸

شکل ۷-۱۱: نمودار تغییر سرعت سر در برخورد با مانع آلومینیومی..... ۱۱۸

شکل ۷-۱۲: نمودار کاهش شتاب سر در برخورد با مانع آلپوراس ۱۲۰

شکل ۷-۱۳: تغییر فرم معادل در سر در برخورد با مانع آلپوراس ۱۲۰

شکل ۷-۱۴: سرعت خطی سر در برخورد با فوم آلپوراس..... ۱۲۰

شکل ۷-۱۵: جابجایی ناحیه ماکزیمم تنش در سر مدت زمانهای مختلف برخورد ۱۲۲

شکل ۷-۱۶: رفتار مانع آلپوراس در برخورد و چگونگی جذب انرژی به هنگام تغییر شکل پلاستیک ۱۲۲

شکل ۷-۱۷: نمودار کاهش شتاب سر در برخورد با مانع ABS..... ۱۲۳

شکل ۷-۱۸: نمودار تغییرات سرعت سر در برخورد با مانع ABS..... ۱۲۳

شکل ۷-۱۹: نمودار کرنش معادل در سر در ناحیه برخورد و تابع تخمین نمودار ۱۲۴

شکل ۷-۲۰: رفتار آلولایت در برخورد ۱۲۵

شکل ۷-۲۱: نمودار شتاب کاهشی سر در برخورد با مانع آلولایت..... ۱۲۶

شکل ۷-۲۲: نمودار تغییرات سرعت سر در برخورد با مانع آلولایت ۱۲۶

شکل ۷-۲۳: نمودار کرنش وارده بر سر در برخورد با مانع آلولایت..... ۱۲۶

شکل ۷-۲۴: نمودار کاهش شتاب سر در برخورد با مانع EPP31 ..... ۱۲۷

شکل ۷-۲۵: نمودار تغییرات سرعت سر در برخورد با مانع EPP31..... ۱۲۸

شکل ۷-۲۶: نمودار کرنش وارده به سر در برخوررد با مانع EPP31..... ۱۲۸

شکل ۷-۲۷: نمودار تنش-کرنش فوم EPP31 در برابر بار وارده ۱۲۹

شکل ۷-۲۸: نمودار کاهش شتاب سر بر حسب موانع مختلف در ۵ میلی ثانیه اول ۱۳۰

شکل ۷-۲۹: تنش وارده بر سر برحسب موانع مختلف ۱۳۰

شکل ۷-۳۰: کرنش وارده بر سر بر حسب موانع مختلف ۱۳۱

شکل ۷-۳۱:تغییرات سرعت سر در برخورد با موانع مختلف..... ۱۳۱

شکل ۷-۳۲: اثر دانسیته بر ماکزیمم شتاب کاهشی ۱۳۳

شکل ۷-۳۳: اثر دانسیته بر میزان ماکزیمم تنش وارده بر سر..... ۱۳۳

شکل۷-۳۴: اثر دانسیته بر میزان ماکزیمم کرنش سر..... ۱۳۴

شکل ۷-۳۵: اثر الاستیسیته بر میزان حداکثر شتاب کاهشی سر..... ۱۳۴

شکل ۷-۳۶: اثر الاستیسیته بر میزان حداکثر تنش وارده بر سر..... ۱۳۵

شکل ۷-۳۷:اثر الاستیسیته بر میزان حداکثر کرنش وارده بر سر..... ۱۳۵

شکل ۷-۳۸: اثر استحکام تسلیم بر میزان حداکثر شتاب کاهشی سر..... ۱۳۵

شکل ۷-۳۹: اثر استحکام تسلیم بر میزان حداکثر تنش وارده بر سر..... ۱۳۶

شکل ۷-۴۰: اثر استحکام تسلیم بر میزان حداکثر کرنش وارده بر سر..... ۱۳۶

فصل ۱: مقدمه و اهمیت موضوع

۱-۱- مقدمه

علم بیومکانیک یکی از شاخه‌های جدید مهندسی پزشکی می‌باشد که با استفاده از اصول و قواعد مکانیک؛ سیستمهای موجود در بدن انسان را مورد مطالعه و تحلیل قرار می‌دهد. علم بیومکانیک در ارگونومی؛ علوم پزشکی؛ و علوم پزشکی قانونی کاربردهای فراوانی دارد. به نوعی می‌توان گفت بخشی از زندگی امروز انسانها در علم بیومکانیک نهفته و تعریف شده‌است. آنالیز راه رفتن، حرکات ورزشی ورزشکاران . علوم پزشکی قانونی مرتبط با آسیب‌ها، شبیه سازی و مدلسازی قسمتهای متحرک بدن ، شبیه سازی پمپ قلب، شش، و ... ، همه و همه امروزه هر کدام شاخه‌ای از علم بیومکانیک شده‌اند که تحقیق در هر کدام از این شاخه‌ها در تکمیل کردن علم بیومکانیک کارساز می‌باشد. از طرفی دینامیک بدن یا علم بیودینامیک امروزه اهمیت فراوان و نقش غیرقابل انکاری در تحلیل و رفتارهای دینامیکی اعضا دارد که به کمک آن می‌توان حرکات بدن را تعریف کرد، شبیه سازی نمود و در نهایت تحلیل کرد. از جمله شاخه‌های مهم علم بیودینامیک که آسیب‌های وارده به انسان را مورد تحلیل قرار می‌دهد می‌توان به تحلیل دینامیکی سر و گردن(head injury and Whiplash) اشاره کرد.

از ضایعات و صدمات شایع می‌توان به ضایعات مغزی و ناحیه سر نام برد که در نوع خود بسیار حائز اهمیت است. منشأ این ضایعات عبارتست از: برخورد سر با اجسام مختلف اعم از گلوله، سنگ، موانع صلب، و غیره. امروزه عمده‌ترین ضایعات ناحیه سر در حوادث رانندگی رخ می‌دهد. موضوع جهانی مرگ و میر بر اثر سوانح رانندگی در بین بیماری‌های شایع در جهان در رتبه نهم قرار دارد. سالانه تعداد زیادی در اثر تصادف جان خود را از دست می دهند یا متحمل خسارات جبران ناپذیری می‌شوند. برای افراد جوان زیر ۴۵ سال تناوب مرگ حاصل از تصادف شش برابر مرگهای ناشی از سرطان می‌باشد. در اروپا نیز حوادث رانندگی دومین عامل مرگ و میر در بین عوامل دیگر است در این کشورها فقط سرطان است که از آن پیشی گرفته است[۱]. نگاهی به آمار و ارقام تصادف در کشور ما ایران نیز نشان