

## طراحی اولیه و تحلیل عملکرد دستگاه تست شوک نیم‌سینوسی با شتاب هدف ۳۰۰۰ جی

عباس ظهورین<sup>۱</sup>، کرامت ملک‌زاده فرد<sup>۲</sup>، سعید شکراللهی<sup>۳</sup>، علیرضا پورمویذ<sup>۴</sup>

۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲ استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، kmalekzadeh@mut.ac.ir

۳ دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۴ دانشجو دکتری هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مری دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸

### چکیده

در این مقاله علاوه بر طراحی مقدماتی دستگاه شوک، به منظور تحلیل عملکرد دستگاه از یک مدل جرم و فنر دو درجه آزادی برای تحلیل گسسته دستگاه شوک استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل تحلیلی و گسسته ارائه شده از نظر نتایج شتاب‌های خروجی حاصل از ارتفاع‌های مختلف تطابق خوبی با نتایج حاصل از آزمایش در منبع مذکور را دارند. با شبیه‌سازی رفتار دینامیکی دستگاه تست شوک با سیستم جرم و فنر می‌توان تأثیر متغیرها نظیر جرم میز تقویت‌کننده شوک را در شتاب خروجی بدون انجام آزمایش‌های متعدد، که هزینه‌بر هستند، به دست آورد. به همین منظور ابتدا معادلات مربوط به دستگاه با مدل جرم و فنر استخراج شده و این معادلات که نشان‌دهنده رفتار سیستم از جمله شتاب دستگاه می‌باشند در نرم‌افزار ویزوال نسترن دسکتاپ مدل‌سازی شده و کد متلب مربوط به سیستم نوشته شده است. سپس به منظور صحت‌گذاری بر این روابط نتایج با نتایج حاصل از دستگاه شوک در منبع مذکور مقایسه شده و تطابق نتایج صحت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. سپس برای تعیین رفتار دستگاه طراحی شده از دو نرم‌افزار المان محدود ال. اس. داینا و آباکوس استفاده شده است. بدین منظور نتایج خروجی از این دو نرم‌افزار، مخصوصاً شتاب، با یکدیگر مقایسه شدند که تطابق بسیار خوبی داشتند.

### واژگان کلیدی

دستگاه شوک نیم‌سینوسی، مدل جرم و فنر، طراحی اولیه، آباکوس، ال. اس. داینا

### ۱. مقدمه

سیستم‌های طراحی شده برای مقاصد فضایی و نظامی باید دارای قابلیت اطمینان بالا و عملکرد درست و بدون خرابی باشند. این سیستم‌ها ممکن است در شرایط دشوار و مختلفی قرار بگیرند. یکی از شرایطی که ممکن است سیستم‌های فضایی و نظامی با

آن روبرو شوند، قرار گرفتن آنها در معرض شوک است. این نوع محیط‌های مکانیکی، اگرچه در بازه‌های زمانی کوچکی (چند میلی ثانیه) اتفاق می‌افتد، اما اغلب شدید و آسیب‌رسان بوده و قابل چشم‌پوشی نمی‌باشند. این شرایط ممکن است در اثر به‌کارگیری سیستم در حین عملیات یا در هنگام حمل‌ونقل با وسایل نقلیه و یا توسط افراد و در حین تعمیرات، نگهداری و انبارداری و یا حتی موارد مشابه به‌وجود آید. این سیستم‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که در شرایط سخت و بدون وجود امکانات تعمیرات و نگهداری بتوانند مأموریت خود را انجام دهند. برای مقابله با آثار مخرب این شرایط، بعد از شناسایی و درک این مفهوم لازم است تدابیری همچون بسته‌بندی مناسب، تعریف شرایط سخت برای طراحی اجزاء در آن شرایط و مانند آن اندیشیده شود. سیستم‌هایی چون ابزارهای دقیق و مجموعه‌های الکترونیکی که برای شوک‌های معمولی و کم طراحی می‌شوند نیز نیازمند بسته‌بندی یا لایه‌گذاری می‌باشند تا از خرابی آنها در زمان ایجاد شوک یا در چرخه عمر آنها جلوگیری شود. برای به حداقل رساندن خرابی سیستم‌ها در اثر عدم وجود شرایط مناسب نگهداری یا قرار گرفتن در شرایط سخت مأموریتی به درک پدیده‌های مختلف شوک و اثر آن در چرخه کامل عمر سیستم نیاز است [۱]. آزمون شوک یا ضربه به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی شوک ناشی از برخورد،

شوک ناشی از شلیک یا شوک‌های حاصل در اثر حمل‌ونقل انجام می‌شود تا میزان مقاومت قطعات و مجموعه‌ها در برابر اعمال بار مکانیکی بررسی شود؛ به‌عبارت دیگر هدف از آزمون شوک کسب اطمینان از مقاومت و عملکرد قابل اطمینان یک مجموعه در برابر شوک‌های غیرتکراری یا ارتعاشات گذرای است که هنگام حمل‌ونقل یا شرایط عملیاتی مجموعه ممکن است به آن وارد شود. برای آزمون شوک راه‌های گوناگونی چون استفاده از سیلندره‌های ضربه، تفنگ‌های بادی، انرژی پتانسیل فنر، سقوط چکش و یا انرژی حاصل از سقوط آزاد وجود دارد که ساده‌ترین آنها استفاده از سقوط آزاد است. صدمات ناشی از تأثیر شوک روی دستگاه به‌صورت شکست قطعه یا قطعاتی از آن و یا بروز اختلال<sup>۱</sup> در عملکرد مجموعه ظاهر می‌شود. علت شکست اجزاء، پیدایش نیروهای مکانیکی یا تنش‌ها و تغییر طول‌های فراتر از حد تحمل آنهاست. شکست در اجزاء ممکن است در پی اولین مرتبه یا بعد از چند بار تکرار شرایط غیرقابل تحمل به‌وجود آید [۲-۳]. تست‌های اولیه شوک توسط نیروی دریایی آمریکا در سال ۱۹۱۷ م صورت پذیرفت. پیشرفت‌ها در زمینه شوک تا جنگ جهانی دوم آهسته بود و در سال ۱۹۴۰ م میلادی شتاب گرفت. جدول ۱ برخی از روزهای تاریخی مهم در زمینه شوک را ارائه می‌دهد [۴].

جدول ۱. تاریخچه تست شوک مکانیکی [۴]

سال	رویداد تاریخی
۱۹۳۲	انتشار اولین طیف پاسخ شوک به‌منظور مطالعه زمین‌لرزه
۱۹۳۹	اولین دستگاه شوک ضربه بالا (سقوط چکش آونگی) برای شبیه‌سازی آثار انفجار زیردریایی در تجهیزات
۱۹۴۱	توسعه روش آزمون سقوط آزاد از ارتفاع ۱۰ فوت
۱۹۴۵	تهیه پیش‌نویس اولین گواهی‌نامه برای تجهیزات هوایی تحت شرایط مختلف محیطی (گواهی‌نامه AF 410065)
۱۹۴۷	اندازه‌گیری محیطی در وسایل نقلیه زمین برای تهیه پیش‌نویس گواهی‌نامه
۱۹۴۷	استفاده از تفنگ هوا برای شبیه‌سازی شوک در قطعات الکترونیکی؛ تهیه پیش‌نویس از اولین گواهی‌نامه برای تجهیزات هوایی تحت شرایط مختلف
۱۹۴۸	ماشین سقوط آزاد در شن و ماسه، با نظارت بر دامنه و طول مدت شوک (نیروی هوایی آمریکا)
۱۹۵۵	استفاده از محرک <sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی شوک (تولید شوک با شکل ساده)
۱۹۶۴	با توجه به شوک ناشی از احتراق و مشکل شبیه‌سازی آن، توسعه امکانات خاص
۱۹۶۶	تحقیقات اولیه پیرامون شبیه‌سازی شوک روی محرک حاصل از یک طیف پاسخ؛ این روش به‌طور کامل در اواسط دهه ۱۹۷۰ م توسعه داده شد
۱۹۸۴	طیف پاسخ شوک معیاری برای تعریف گواهی‌نامه‌ها در استاندارد MIL-STD 810 شد

بررسی‌های اولیه دربارهٔ پدیدهٔ شوک در سال ۱۹۳۰ م، به‌هنگام مطالعهٔ زمین لرزه‌ها و تاثیر آنها بر ساختمان‌ها انجام شد. این تحقیقات منجر به پیدایش مفهومی به نام طیف پاسخ شوک<sup>۳</sup> شد. آزمون شوک نیز روی تجهیزات مختلف در طول جنگ جهانی دوم آغاز شد. با ظهور لرزشگرها<sup>۴</sup> و تحریک‌کننده‌های مختلف و افزایش توان آنها، امکان انجام آزمون‌های شوک ترکیبی (ساختگی) فراهم گردید. در سال ۱۹۷۰ م، با توسعهٔ روش‌های کامپیوتری و افزایش توان کامپیوترها، امکان انجام مستقیم تست‌ها از طریق تحریک‌کننده‌های مختلف براساس یک طیف پاسخ شوک فراهم گردید. عوامل متنوعی سبب ایجاد شوک می‌شوند که از مهمترین آنها می‌توان به موارد ذکر شده در جدول ۲ اشاره کرد.

جدول ۲. عوامل ایجاد شوک مکانیکی [۵]

عوامل ایجاد شوک	شتاب ناشی از شوک (g)
شوک ناشی از حمل‌ونقل ریلی	۲
شوک ناشی از حمل‌ونقل جاده‌ای	کمتر از ۱۰
شوک ناشی از حمل‌ونقل دریایی	بین ۳۰ تا ۵۰
شوک ناشی از پرتاب موشک	حدود ۴۰۰
شوک ناشی از برخورد جعبه سیاه هواپیما	۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰

اولین ماشین‌های مخصوص انجام تست شوک، که در جنگ جهانی دوم توسعه یافتند، به دو دستهٔ عمدهٔ ماشین‌های آونگی مجهز به چکش و ماشین‌های سقوط بر شن تقسیم می‌شدند. چکش این نوع از ماشین‌ها بعد از سقوط در یک مسیر دایره‌ای، به یک صفحهٔ فولادی، که به نمونه تست متصل شده بود، برخورد می‌کرد (ماشین ضربه بالا<sup>۵</sup>). اولین نوع از این ماشین‌ها در سال ۱۹۳۹ م در انگلستان به‌منظور انجام تست روی تجهیزات سبک مربوط به کشتی‌های نیروی دریایی، که در معرض شوک‌های تولید شده توسط انفجارهای زیر آب قرار می‌گرفت (مین‌ها، اژدرها و جز این‌ها)، تولید شد. مدل‌های زیادی از این ماشین‌ها در امریکا و اروپا برای ایجاد شوک روی تجهیزات سنگین‌تر ساخته شدند. این نوع از ماشین‌ها امروزه هم مورد استفاده قرار می‌گیرند. ماشین‌های سقوط بر شن، از میزی که روی دو ستون راهنمای عمودی می‌لغزد و به‌طور آزادانه به داخل جعبه‌ای از شن سقوط می‌کند، تشکیل شده‌اند. مشخصات شوک به‌دست آمده از این نوع

ماشین‌ها تابعی از شکل، تعداد گوه‌های چوبی متصل به زیر میز و همچنین میزان دانه‌بندی<sup>۶</sup> شن موجود در جعبه شن می‌باشد [۶]. اما امروزه با توجه به گسترش نیاز به دستگاه‌های تست شوک در بازه‌های مختلف شتابی، این دستگاه‌ها در نوع‌ها و ابعادهای متفاوتی ساخته می‌شوند که از متداول‌ترین آنها می‌توان به ماشین‌های سقوط آزاد اشاره کرد. این دستگاه‌ها برگرفته از ماشین‌های سقوط بر شن می‌باشند. ضربه بر روی شبیه‌ساز<sup>۷</sup> (دیسک‌های الاستومری<sup>۸</sup>، قرص‌های سربی مخروطی یا استوانه‌ای<sup>۹</sup>، شبیه‌سازهای نیوماتیکی<sup>۱۰</sup> و جز این‌ها) مطابق با شکل شکل شوک خواسته شده وارد می‌شود. به‌منظور افزایش سرعت برخورد می‌توان ارتفاع سقوط را افزایش داد، همچنین می‌توان عملیات سقوط را توسط ریسمان‌های لاستیکی شتابدار کرد.

## ۲. تعریف مسئله

در ابتدا به طراحی مقدماتی دستگاه پرداخته می‌شود سپس با توجه به ساختار اصلی دستگاه، مدل جرم و فنر مربوط به دستگاه ارائه می‌شود. به‌طور کلی دستگاه باید شامل یک میز ضربه‌زن و یک سندان، که میز ضربه‌زن با آن برخورد می‌کند، باشد. طبق استاندارد، سندان با توجه به ضربات وارده به آن، هم از نظر ابعادی و هم از نظر جنس باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که بتواند ضربه و صدمات ناشی از آن را تحمل نماید. همچنین میز ضربه‌زن نیز باید توانایی تحمل ضربه ناشی از برخورد را داشته باشد، مخصوصاً قسمت‌هایی از میز که در برخورد دخیل هستند. با توجه طبیعت دستگاه، سازوکاری نیاز است که از انحراف میز در حالت سقوط جلوگیری نماید و آن را در مسیر مورد نظر تا لحظهٔ ضربه همراهی کند. در واقع میز باید به یک سیستم ایجادکنندهٔ مسیر خطی متصل شود تا چنین حرکتی در آن ایجاد شود. با توجه به اینکه آزمایش تست ضربه آزمایشی تکرارشونده است، باید سازوکاری طراحی شود که میز را به ارتفاع مورد نیاز جهت اعمال ضربه مورد نظر برساند. با توجه به ضربه ایجادشده توسط دستگاه، به‌منظور کاهش آثار این ضربه و کاهش آثار نیروی انتقال‌یافته از تجهیزات به سازه تکیه‌گاهی از سیستم ایزولاسیون شامل فنر بادی و جاذب‌های شوک استفاده می‌شود. در واقع ساختار کلی دستگاه طبق استاندارد ماشین‌های تست شوک شامل قطعاتی چون میز ضربه‌زن، سندان، سیستم ایجاد حرکت خطی عمودی مستقیم (میل راهنماها)، سیستم بالابر میز، سازوکار افزایشدهندهٔ شوک و

سرعت لحظه برخورد با برابر قراردادن انرژی پتانسیل جسم در لحظه برخورد با انرژی جنبشی به دست می آید:

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

با ساده سازی می توان نوشت:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

همچنین جابه جایی در لحظه اولیه صفر است:

$$x(0) = 0 \quad (3)$$

جابجایی با ثوابت  $a$  و  $b$  به صورت زیر در نظر فرض می شود:

$$x(t) = a \sin \omega_n t + b \cos \omega_n t \quad (4)$$

باید توجه داشت که معادله ۴ سیستم را نوسانی فرض می کند. جایی که فرکانس طبیعی برابر خواهد بود با:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

با توجه به شرایط اولیه در لحظه  $t=0$  جابه جایی برابر صفر خواهد بود:

$$x(0) = 0 \rightarrow b = 0 \rightarrow x(t) = a \sin \omega_n t \quad (6)$$

بنابراین سرعت از رابطه ۶ برابر خواهد بود با:

$$\dot{x}(t) = a\omega_n \cos \omega_n t \quad (7)$$

حال با تساوی روابط ۲ و ۷، ضریب  $a$  برابر خواهد بود با:

$$a = \left[ \sqrt{\frac{2gh}{\omega_n}} \right] \quad (8)$$

با قراردادن رابطه ۸ در رابطه ۶ جابه جایی برابر خواهد بود با:

$$x(t) = \left[ \sqrt{\frac{2gh}{\omega_n}} \right] \sin \omega_n(t) \quad (9)$$

با مشتق گیری از معادله ۹ معادله سرعت و شتاب برابر خواهد بود با:

$$\dot{x}(t) = \sqrt{2gh} \cos \omega_n t \quad (10)$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega_n \sqrt{2gh} \sin \omega_n t \quad (11)$$

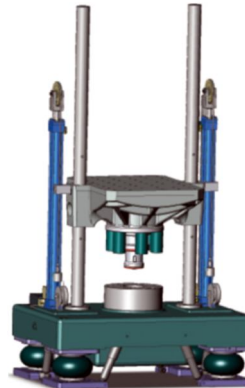
با توجه به رابطه ۱۱ شتاب بیشینه و سفتی بستر برابر خواهد بود با:

$$\ddot{x}(t) = \sqrt{\frac{2kgh}{m}}, k = \frac{x''^2 m}{2gh} \quad (12)$$

معادله دیفرانسیل برخورد میز به سندان، که به صورت سیستم یک درجه آزادی جرم و فنر مطابق شکل ۱ می باشد، با نادیده گرفتن ضریب میرایی به صورت زیر است:

$$m\ddot{x} + kx = mg \quad (13)$$

سیستم ایزولاسیون است [۷]. به منظور بررسی رفتار و عملکرد دستگاه، ابتدا برخورد میز اصلی و سندان توسط مدل یک درجه آزادی جرم و فنر مدل شده و کد نوشته شده مربوط با آن با نرم افزار ویزوال نسترن دسکتاپ مقایسه می شود. سپس با افزودن میز تقویت کننده شوک مدل دو درجه آزادی جرم و فنر لحاظ و شبیه سازی دینامیکی برخوردها در دستگاه کامل می شود.

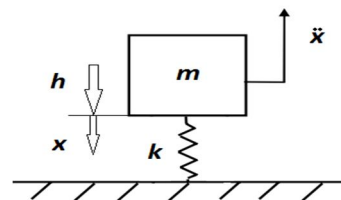


شکل ۱. نمونه ای از دستگاه تست شوک سقوط آزاد

## ۲-۱. تعیین معادله شتاب میز اصلی دستگاه و شبیه سازی

### نرم افزاری

برای بررسی شتاب لحظه برخورد میز به بستر (سندان) از مدل ساده جرم و فنر شکل ۲ استفاده شده است [۸].



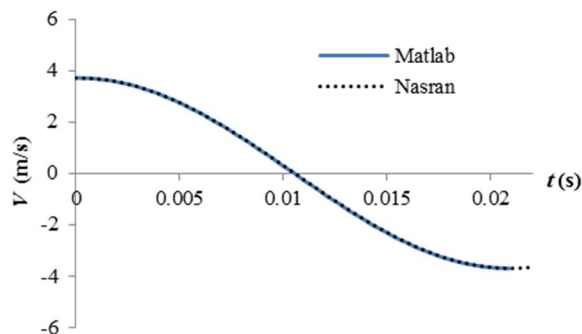
شکل ۲. سیستم جرم و فنر یک درجه آزادی بدون دمپر

به طوری که در این شکل  $m$  جرم میز دستگاه شوک،  $k$  ضریب سفتی بستر (سندان)،  $h$  ارتفاع سقوط و  $x$  جهت مثبت جابه جایی در راستای محور است. فرضیات مسئله نیز عبارت است از:

۱. میز دستگاه تست شوک می تواند به عنوان سیستم ۱ درجه آزادی جرم و فنر مدل شود. میز از حالت سکون رها می شود
۲. از اتلاف انرژی صرف نظر شده است و برخورد کاملاً الاستیک است
۳. پاسخ سیستم خطی است

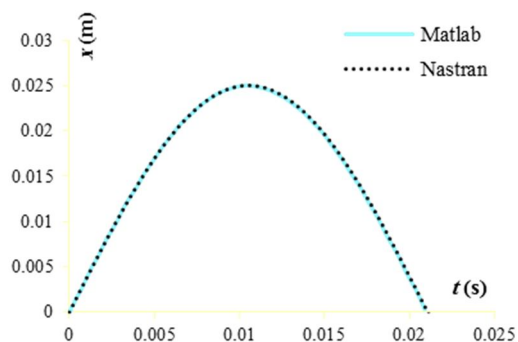
$$k = \frac{x^2 m}{2gh} = 3425526.478 \quad (14)$$

اکنون معادله ۱۳ توسط کد 45 ODE نوشته شده در متلب حل و با مدل جرم فنر شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ویژوال نسترن دسکتاپ مقایسه می‌شود.

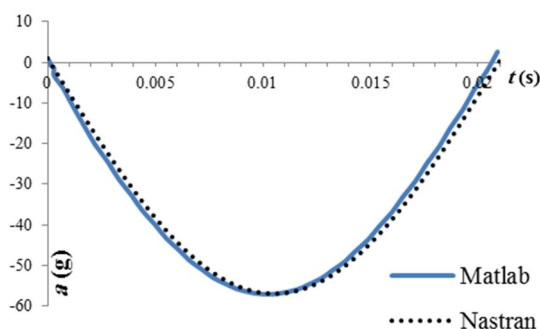


شکل ۴. نمودار سرعت زمان میز در سیستم یک درجه آزادی

حل معادله ۱۳ نیازمند به پارامترهای سفتی و جرم و از طریق حل عدی میسر است. بدین منظور جرم میز طبق آزمایش سقوط آزاد منبع [۹]، ۱۵۰ کیلوگرم و شتاب  $g$  حاصل ۵۷/۱ در نظر گرفته شد. با قراردادن این پارامترها در معادله ۱۲ مقدار سفتی برابر خواهد بود با:



شکل ۳. نمودار مکان زمان میز در سیستم یک درجه آزادی

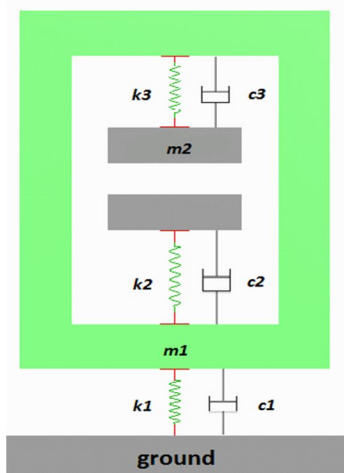


شکل ۵. نمودار شتاب زمان میز در مدل یک درجه آزادی

محقق خواهد شد. در شکل ۶ نمونه‌ای از این مکانیزم آورده شده است. برای شبیه‌سازی دینامیکی از مدل دو درجه آزادی جرم و فنر استفاده شده، که در شکل ۷ آمده است. در این شکل علائم به صورت زیر تعریف می‌شوند.  $m_1$  و  $m_2$  جرم میز اصلی و جرم میز تقویت کننده دستگاه شوک؛  $k_1$  و  $c_1$  ضریب سفتی و میرایی بستر میز اصلی دستگاه شوک؛  $k_2$  و  $c_2$  ضریب سفتی و میرایی بستر میز تقویت کننده شوک و نهایتاً  $k_3$  و  $c_3$  ضریب سفتی و میرایی سیستم تعلیق تقویت کننده شوک. برای به دست آوردن معادله حاکم بر سیستم جرم و فنر ابتدا دیاگرام آزاد هر جسم را رسم می‌شود تا نیروهای وارد بر آن مشخص گردد. ابتدا برای میز اصلی دیاگرام آزاد شکل ۸ رسم می‌شود.

## ۲-۲. شبیه‌سازی دینامیکی دستگاه شوک دارنده مکانیزم افزایشده شوک

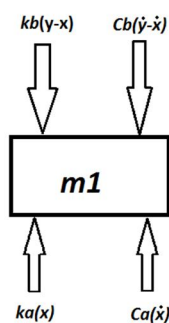
به منظور دستیابی به شتاب بالاتر، از مکانیزم افزایشده شوک استفاده می‌شود. در واقع اساس کار این مکانیزم بدین صورت است که یک میز کوچک دیگر روی میز اصلی سوار می‌شود. این میز کوچک در ابتدا هیچ‌گونه تماسی با میز اصلی ندارد و توسط فنرهایی از میز اصلی جدا می‌شود. در هنگام برخورد میز اصلی به سندان، این میز کوچک نیز با توجه به سفتی فنرها به سمت میز اصلی می‌رود و برخوردی نیز شکل می‌گیرد که با توجه به مکانیزم آن به مراتب شدیدتر از برخورد میز و سندان است و دستیابی به شتاب‌هایی به مراتب بالاتر که مدنظر دستگاه است



شکل ۷. مدل جرم و فنر دستگاه شوک با مکانیزم افزایشده شوک



شکل ۶. دستگاه شوک با مکانیزم افزایشده شوک [۱۰]



شکل ۸. دیاگرام آزاد میز اصلی

مبدا در نظر گرفته شده عبور می‌کند؛ یعنی جابه‌جایی آن صفر می‌باشد. همچنین در لحظه برخورد سرعت از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. با استفاده از این شرایط مرزی، حل تحلیلی این معادله امکان پذیر نمی‌باشد، بنابراین برای حل این معادله از روش‌های عددی موجود در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. همچنین مدل در نظر گرفته شده به صورت جرم و فنر همانند شکل ۷ در نرم‌افزار ویزوال نسترن دسکتاپ شبیه‌سازی شده تا با مقایسه نتایج خروجی از آن با نتایج خروجی متلب صحت مدل‌سازی تأیید گردد. طبق آزمایش سقوط آزاد منبع [۹]، فرض نامیرایی سیستم تعلیق تقویت‌کننده شوک و همچنین ضریب سفتی محاسبه شده در حالت سیستم یک درجه آزادی جرم و فنر، ضرایب معادلات ۱۷ و ۱۸ در ادامه آورده شده است. نتایج مربوط به این شبیه‌سازی‌ها در قالب نمودارهای شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ آورده شده است.

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 2.5 \text{ kg} & m_2 &= 150 \text{ kg} \\
 k_1 &= 3425526.4 \text{ (N/m)} & K_2 &= 60000 \text{ (N/m)} \\
 c_1 &= 1000 \text{ (Kg/s)} & C_2 &= 10000 \text{ (Kg/s)} \\
 K_3 &= 2060 \text{ (N/m)} & C_3 &= 0 \text{ (Kg/s)}
 \end{aligned}$$

یک‌ها در شکل ۸ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 k_a &= k_1 & , k_b &= k_2 + k_3 \\
 c_a &= k_1 & , c_b &= c_2 + c_3
 \end{aligned} \tag{۱۵}$$

در نتیجه معادله حاکم به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{aligned}
 m_1 x'' + k_a x + c_a x' - k_b (y - x) \\
 - c_b (y' - x') = m_1 g
 \end{aligned} \tag{۱۶}$$

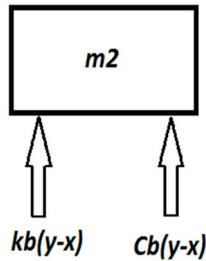
حال دیاگرام آزاد میز تقویت‌کننده شوک مطابق شکل ۹ رسم می‌شود. معادله دیفرانسیل حاکم بر میز تقویت‌کننده برابر خواهد بود با:

$$m_2 y'' + k_b (y - x) + c_b (y' - x') = m_2 g \tag{۱۷}$$

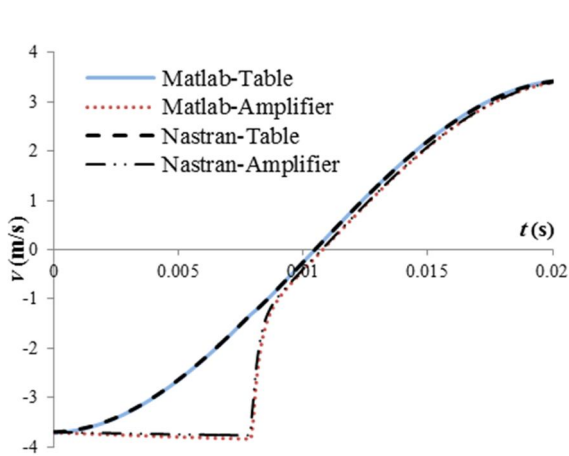
با توجه به روابط ۱۶ و ۱۷ معادلات حاکم بر سیستم برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned}
 m_1 x'' + k_a x + c_a x' - k_b (y - x) \\
 - c_b (y' - x') = m_1 g
 \end{aligned} \tag{۱۸}$$

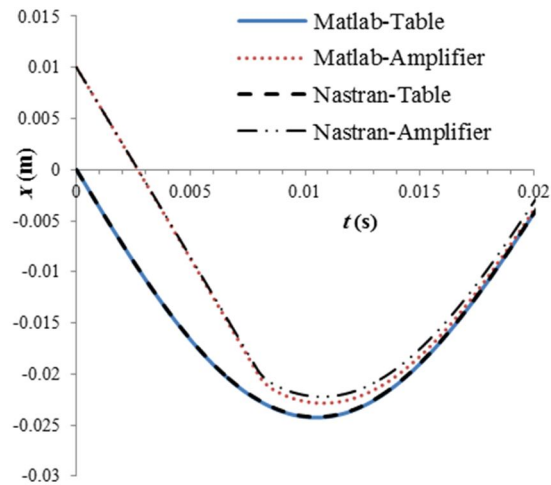
در این حالت میز از حالت سکون حرکت کرده بنابراین سرعت در لحظه اولیه برابر صفر خواهد بود و میز اصلی در این لحظه از



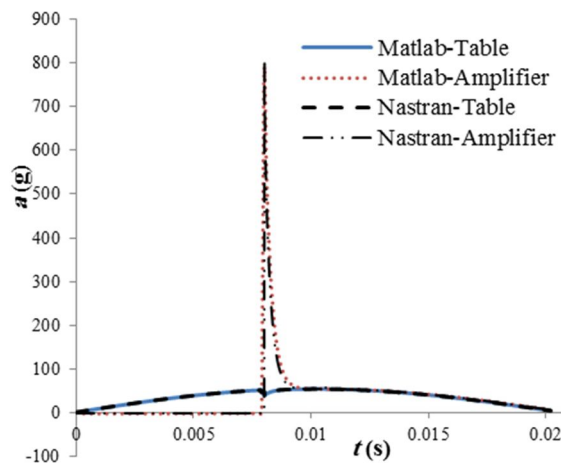
شکل ۹. دیاگرام آزاد میز تقویت کننده



شکل ۱۱. نمودار سرعت زمان میز و میز افزاینده در مدل دو درجه آزادی



شکل ۱۰. نمودار مکان زمان میز و میز افزاینده در مدل دو درجه آزادی



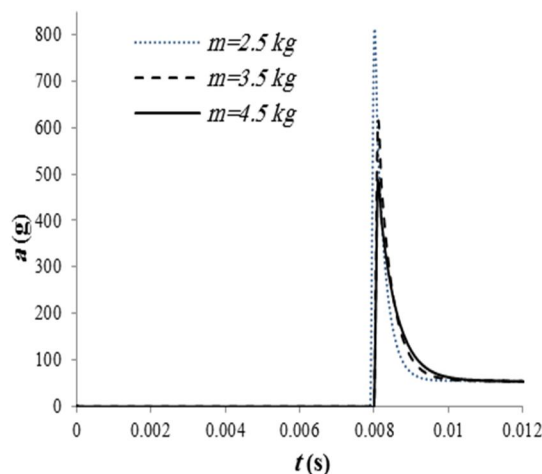
شکل ۱۲. نمودار شتاب زمان میز و میز افزاینده در مدل دو درجه آزادی

### ۲-۳. بررسی تأثیر جرم میز مکانیزم افزاینده شوک بر شتاب پیشینه

در ادامه میز مکانیزم افزاینده شوک با سه جرم متفاوت ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ کیلوگرم در نظر گرفته شده است تا تأثیر آن مورد ارزیابی قرار گیرد. نکته حائز اهمیت در این شبیه‌سازی تأثیر بسیار زیاد جرم میز تقویت‌کننده بر شتاب پیشینه است؛ به طوری که با افزایش یک کیلوگرمی میز تقویت‌کننده شوک، شتاب پیشینه با کاهش

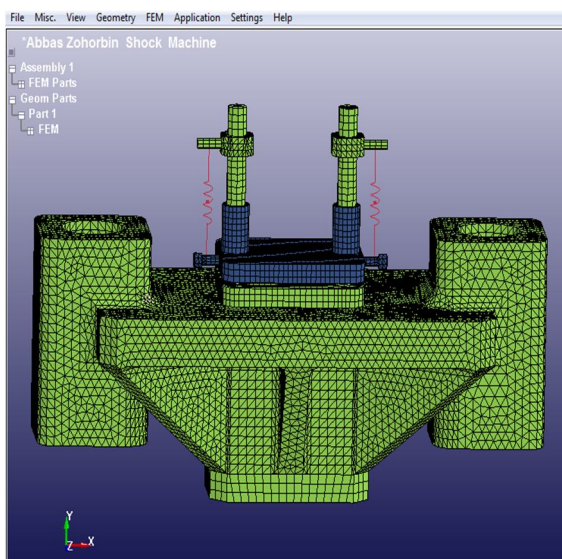
همان‌طور که از شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشاهده می‌شود، نمودارهای جابه‌جایی سرعت و شتاب تطابق بسیار خوبی با شکل حاصل از نرم‌افزار متلب دارد. پیشینه شتاب حاصل از نرم‌افزار متلب ۷۹۷/۸۰۷۵ جی و خروجی پیشینه شتاب نرم‌افزار ویژوال نسترن دسکتاپ ۷۹۵/۸۸ جی می‌باشد که تطابق خوبی با شتاب پیشینه حاصل از آزمایش منبع [۹]، که ۸۰۰ جی است، دارد. این امر صحت شبیه‌سازی را تأیید می‌کند.

چشم‌گیر تقریباً یک‌سومی مواجه می‌شود. چنانچه به شتاب‌های بسیار بالا برای انجام تست نیاز باشد، این پارامتر بسیار تأثیرگذار خواهد بود.



شکل ۱۳. نمودار شتاب افزایشی شوک به ازای جرم‌های متفاوت

آسیب به دستگاه وجود دارد؛ زیرا تنش ون‌مایرز حاصل به تنش تسلیم جسم رسیده که خطرناک می‌باشد. به این دلیل در مرحله بعد از ضربه‌گیر برای رفع این مورد استفاده شده است. ضربه‌گیر علاوه بر بهبود تنش‌های حاصل به شکل شتاب حاصل کمک می‌کند تا به صورت نیم‌سینوسی تبدیل شود. به همین منظور برای تعیین اندازه مناسب از شبیه‌سازی با ضربه‌گیر استفاده شده و اندازه مناسب المان استخراج شده است. در جدول ۳ اندازه المان میز و تأثیر آن بر حل مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. گفتنی است تخمین رنج و اندازه ابتدایی المان‌ها نیز امری تجربی و وابسته به تجربه فرد است، لذا از آوردن اندازه‌های بیش از حد بزرگ و کوچک پرهیز شده است. با توجه به جدول ۳ اندازه المان ۱۰ میلی‌متر که بیشینه تنش در آن اتفاق می‌افتد و حالت بحرانی آنالیز می‌باشد در نظر گرفته شد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اندازه المان‌ها تأثیری در اندازه شتاب خروجی نداشت.



شکل ۱۴. مدل المان محدود میز و تعریف المان فنر

جدول ۳. تأثیر اندازه المان بر تنش بیشینه

ردیف	اندازه المان (میلی‌متر)	تنش بیشینه (مگاپاسکال)
۱	۲۰	۲۵۱/۸
۲	۱۵	۲۶۴/۵
۳	۱۲	۲۹۷/۷
۴	۱۰	۲۹۵/۶
۵	۸	۲۸۷/۳

برای اعمال شرایط مرزی درجه آزادی در جهت سقوط؛ یعنی راستای  $Y$  صفحه زیرین سندان بسته شده است. برای کاهش

## ۲-۴. شبیه‌سازی برخورد دستگاه به کمک المان محدود

مدلسازی در نرم‌افزار سالیدورک انجام و مدل مونتاژی آن وارد نرم‌افزارهای آباکوس و ال. اس. داینا شده تا مورد ارزیابی قرار گیرد. واحدها در این مدل میلی‌متر می‌باشند، در نتیجه جرم برحسب تن و تنش‌ها بر حسب مگاپاسکال خواهند بود. در حل مسئله برخورد از روش صریح و در انتخاب المان‌ها از خانواده محیط پیوسته که برای تحلیل تنش مناسب می‌باشند استفاده شده است. با انتخاب فنر، المانی از نوع فنر بین دو نقطه ایجاد می‌شود که دیگر نیاز به انتخاب نوع المان برای فنر در قسمت مش‌بندی نمی‌باشد. در شکل ۱۴ مدل مش‌بندی شده میز و المان فنر آورده شده است. با توجه به هندسه شکل‌های موجود تا حد ممکن از المان C3D8R که المانی مکعبی شکل از خانواده محیط پیوسته، سه‌بعدی، دارای ۸ گره با ۳ درجه آزادی در هر گره و از انتگرال کاهش یافته استفاده می‌کند استفاده شده است و در مابقی از المان C3D4 که المانی هرمی شکل از خانواده محیط پیوسته، سه‌بعدی و دارای ۴ گره می‌باشد و هر گره دارای ۳ درجه آزادی بوده، استفاده شده است.

شبیه‌سازی در نرم‌افزار در دو حالت صورت گرفته است. ابتدا میز اصلی مستقیماً به سندان برخورد کرده و نتایج تنش و شتاب آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با توجه به اینکه برخورد فلز با فلز اتفاق افتاده، نتایج حاصل از تنش‌ها نشان داده که امکان

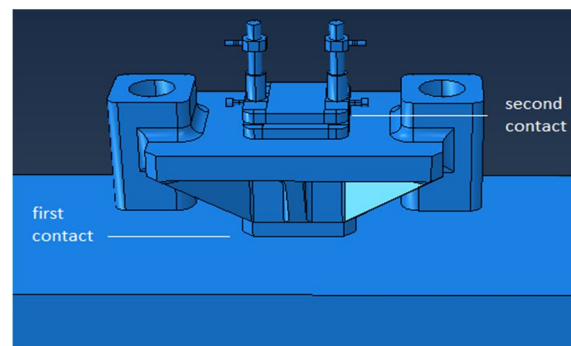


زمان حل مسئله بهتر است به جای اینکه میز از ارتفاع ۲ و ۳ متری رها شود سرعت برخورد حاصل از سقوط از این دو ارتفاع محاسبه شود و جسم با سرعت ثابت به سندان برخورد کند. بدین ترتیب با توجه به اینکه بازه‌های زمانی لحاظ شده در مورد ضربه بسیار کوچک و در حد میکرو ثانیه است و رهاکردن جسم مورد نظر از ارتفاع‌های ذکر شده با این بازه زمانی، مدت حل مسئله را تا ۱ هفته افزایش خواهد داد، این روش جایگزین بسیار خوبی برای شبیه‌سازی سقوط آزاد می‌باشد که صرفه‌جویی مناسبی در مدت زمان حل مسئله می‌کند. البته به‌منظور شبیه‌سازی دقیق مسئله شتاب گرانشی زمین در جهت سقوط که همان محور  $z$  می‌باشد لحاظ شده است. میز به سندان نجسبیده و در فاصله‌ای کمتر از یک میلی‌متری میز قرار گرفته است. با توجه به واحد میلی‌متر، سرعت‌های برخورد ناشی از ارتفاع‌های ۲ و ۳ متری به ترتیب برابر با ۶۲۶۰ و ۷۶۷۰ میلی‌متر بر ثانیه خواهند بود که این مقادیر با توجه به شکل به قسمت‌های متحرک دستگاه اعمال می‌شود.

زمان حل مسئله بهتر است به جای اینکه میز از ارتفاع ۲ و ۳ متری رها شود سرعت برخورد حاصل از سقوط از این دو ارتفاع محاسبه شود و جسم با سرعت ثابت به سندان برخورد کند. بدین ترتیب با توجه به اینکه بازه‌های زمانی لحاظ شده در مورد ضربه بسیار کوچک و در حد میکرو ثانیه است و رهاکردن جسم مورد نظر از ارتفاع‌های ذکر شده با این بازه زمانی، مدت حل مسئله را تا ۱ هفته افزایش خواهد داد، این روش جایگزین بسیار خوبی برای شبیه‌سازی سقوط آزاد می‌باشد که صرفه‌جویی مناسبی در مدت زمان حل مسئله می‌کند. البته به‌منظور شبیه‌سازی دقیق مسئله شتاب گرانشی زمین در جهت سقوط که همان محور  $z$  می‌باشد لحاظ شده است. میز به سندان نجسبیده و در فاصله‌ای کمتر از یک میلی‌متری میز قرار گرفته است. با توجه به واحد میلی‌متر، سرعت‌های برخورد ناشی از ارتفاع‌های ۲ و ۳ متری به ترتیب برابر با ۶۲۶۰ و ۷۶۷۰ میلی‌متر بر ثانیه خواهند بود که این مقادیر با توجه به شکل به قسمت‌های متحرک دستگاه اعمال می‌شود.

$$v = \sqrt{2gh} \quad , \quad h = 2 \rightarrow v = 6.26 \left( \frac{m}{s} \right) \quad (19)$$

برای معلق نگه‌داشتن میز متحرک تقویت‌کننده، از فنر استفاده شده است. ثابت فنر با توجه به واحد میلی‌متر برابر با ۰/۵۸۱ نیوتن بر میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. تماس از نوع سطح به سطح می‌باشد که در این شبیه‌سازی ابتدا میز اصلی به سندان برخورد می‌کند سپس برخورد دوم بین میز تقویت‌کننده شوک و بستر آن صورت می‌گیرد که این دو نوع برخورد در شکل ۱۵ آمده است. در ادامه نیز نتایج حاصل از برخورد در هر دو نرم‌افزار در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۱۵. محل برخوردها در دستگاه شوک

## ۲-۶. شبیه‌سازی دینامیکی دستگاه شوک به کمک نتایج حاصل از نرم‌افزار المان محدود در نرم‌افزارهای متلب و ویژوال نسترن

باتوجه به نتایج شتاب بیشینه حاصل از نرم‌افزارهای ال. اس. داینبا و آباکوس مشاهده می‌شود که نتایج حاصل بسیار نزدیک به هم می‌باشند و اختلاف زیر ۵ درصدی با هم دارند. حال با در نظر گرفتن شتاب بیشینه حاصل از نرم‌افزار المان محدود، به شبیه‌سازی دینامیکی رفتار دستگاه تست شوک به‌وسیله جرم و فنر در نرم‌افزارهای ویژوال نسترن و متلب پراخته می‌شود.

۲-۶-۱. شبیه‌سازی سقوط از ارتفاع ۲ متر بدون ضربه‌گیر در ادامه با توجه به نمودار شتاب زمان حاصل از شبیه‌سازی به روش المان محدود در نرم‌افزار ال. اس. داینبا، در این قسمت سعی می‌شود با استفاده از مدل جرم و فنر شبیه‌سازی شده در نرم‌افزارهای نسترن و متلب نیز همان نتایج تکرار شود تا صحت شبیه‌سازی آشکار گردد. با توجه به شتاب بیشینه میز اصلی و رابطه ۱۲ سفتی بستر زیرین میز اصلی برابر خواهد بود با:

$$k = \frac{x^2 m}{2gh} = 3425526.478 \quad (14)$$

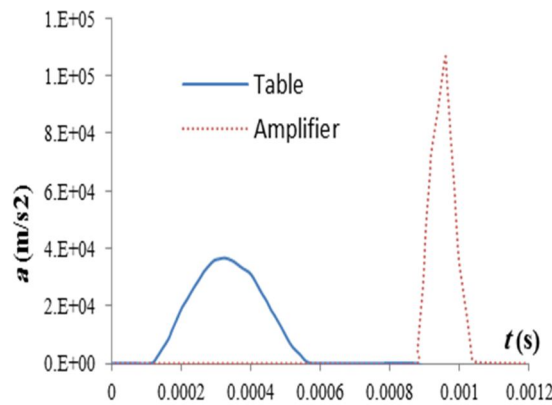
منحنی نیم‌سینوسی حاصل از برخورد میز اصلی با سندان تطابق خوبی با نمودار شتاب حاصل از نرم‌افزار ال. اس. داینبا دارد. بیشینه شتاب میز تقویت‌کننده تقریباً با شتاب حاصل از نرم‌افزار ال اس داینبا برابر می‌باشد ولی شکل آنها کمی با هم متفاوت می‌باشد که این امر به دلیل ماهیت ضربه در دو مدل المان محدود و جرم و فنر می‌باشد. با توجه به اینکه نرم‌افزارهای المان محدود برای شبیه‌سازی نیاز به مدت زمان طولانی و اطلاع دقیق از

## ۲-۵. استفاده از ضربه‌گیر در شبیه‌سازی دینامیکی

با توجه به نزدیک بودن تنش‌های حاصل از برخورد به تنش تسلیم میز و شکل مثلی نمودار شتاب زمان، شکل ۱۷ باید از

دهد که نمونه آن در مورد جرم تقویت کننده بود که در قسمت‌های قبل بررسی شد. شکل ۱۸ نمودار شتاب زمان خروجی از نرم‌افزارهای متلب و نسترن را نشان می‌دهد که تطابق خوبی با هم دارند.

نحوه مدل کردن اجسام و شرایط مرزی و جز این‌ها دارند، استفاده از مدل جرم و فنر می‌تواند موجب تسریع رسیدن به جواب مورد نظر شود و اثر تأثیر پارامتر را در مدت زمان بسیار کمتری ارائه



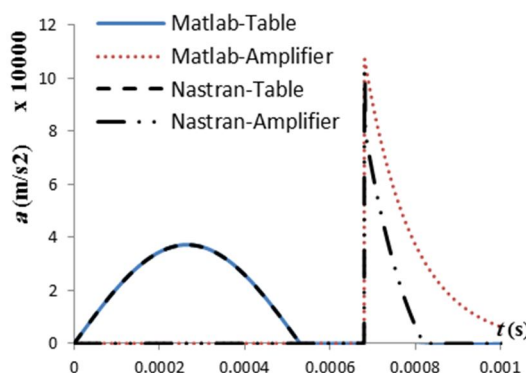
شکل ۱۶. نمودار شتاب زمان سقوط از ارتفاع ۲ متری در ال. اس. داینا بدون ضربه گیر

جدول ۴. مقایسه شتاب‌های بیشینه افزاینده شوک در نرم‌افزارهای المان محدود مختلف

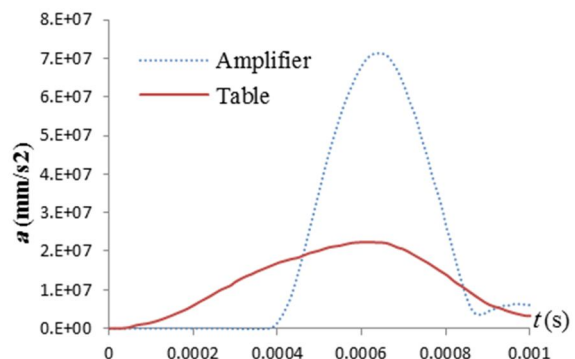
ارتفاع (متر)	شتاب بیشینه (g) در ال. اس. داینا	شتاب بیشینه (g) در آباکوس	درصد اختلاف
۲	۱۰۹۱۱	۱۱۲۱۷	۲/۷
۳	۱۶۳۱۶	۱۵۶۱۲	۴/۳

جدول ۵. خصوصیات مکانیکی پلی اتیلن و پلی یورتان

ماده	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	ضریب پواسون ( $\mu$ )	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
پلی اتیلن	۹۵۰	۰/۴	۰/۹۰۰	۲۳
پلی یورتان	۱۲۵۰	۰/۳۹	۰/۰۳	۵۱



شکل ۱۸. نمودار شتاب زمان خروجی متلب و نسترن در حالت بی‌ضربه گیر



شکل ۱۷. نمودار شتاب زمان سقوط از ۲ متری در آباکوس با ضربه گیر

بسیار به هم نزدیک‌اند که این امر صحت شبیه‌سازی‌ها را تأیید می‌کند.

در ادامه بیشینه شتاب حاصل از شبیه‌سازی‌ها به منظور مقایسه در جدول ۶ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج

## ۲-۶-۲. شبیه‌سازی سقوط از ارتفاع ۲ متر با وجود ضربه‌گیر

مانند قسمت قبل با استفاده از نتایج نمودار شتاب زمان حاصل از نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی جرم و فنر آغاز می‌گردد. شتاب بیشینه میز متحرک تقویت‌کننده شوک طبق شکل ۱۷ برابر با ۷۳۰۸ جی و شتاب بیشینه میز اصلی ۲۲۹۵ جی می‌باشد. با توجه به شتاب بیشینه میز اصلی و فرمول ۱۲ سفتی بستر زیرین میز اصلی برابر خواهد بود با:

$$k = \frac{x^2 m}{2gh} = 1788327483 \text{ N/m} \quad (21)$$

میرایی سسیتم تعلیق؛ یعنی فنر صفر و سفتی آن  $k=581$  (N/m) در نظر گرفته شده است. ابتدا در نرم‌افزارهای نسترن و متلب شبیه‌سازی جرم و فنر صورت می‌گیرد که نتیجه این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۱۹، که نمودار شتاب زمان می‌باشد، آورده شده است. نتایج شتاب حاصل از این ۲ نرم‌افزار تطابق بسیار خوبی همانند حالت بدون ضربه‌گیر با یکدیگر دارند که نشان‌دهنده صحت شبیه‌سازی‌های دینامیکی در این پژوهش است. تمامی شبیه‌سازی‌ها به‌منظور دستیابی به هدف پروژه؛ یعنی شتاب ۳۰۰۰ جی با شکل نیم‌سینوسی و اطلاع از نحوه عملکرد دستگاه صورت پذیرفت. از لحاظ استحکام با وجود ضربه‌گیر و ارتفاع ۲ متر، تنش بیشینه حاصل از ضربه یک‌سوم تنش تسلیم در میز بود. در سندان و مکانیزم افزایشنده شوک نیز به ترتیب تقریباً یک‌دهم و یک‌پنجم تنش تسلیم بود که این نتایج دارابودن استحکام کافی دستگاه در برابر ضربه را نشان می‌دهد.

## ۳. نتیجه‌گیری

دستیابی به شتاب ۳۰۰۰ جی و بالاتر نیازمند افزایش ارتفاع سقوط دستگاه و یا استفاده از مکانیزم افزایشنده شوک می‌باشد که در این پژوهش با توجه به محدودیت‌های ارتفاعی محل استقرار دستگاه حداکثر ارتفاع سقوط ۲ متر در نظر گرفته شد و مکانیزم افزایشنده متناسب با شتاب مورد نظر طراحی گردید. مکانیزم افزایشنده شوک قادر است شتابی بیش از ۱۰ برابر شتاب دستگاه تست شوک ایجاد

کند و به‌صورت قسمتی جدا از دستگاه در صورت نیاز به دستگاه متصل شود. جرم میز تقویت‌کننده تأثیر بسیار زیادی بر شتاب بیشینه دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش یک کیلوگرمی میز تقویت‌کننده شوک، شتاب بیشینه تقریباً یک‌سوم می‌شود که اگر نیاز به شتاب‌های بسیار بالا برای انجام تست باشد این پارامتر بسیار تأثیر گذار خواهد بود. با توجه به ساده و متداول بودن دستگاه‌های نوع سقوط آزاد، اساس عملکرد دستگاه از نوع سقوط آزاد انتخاب شد. به‌منظور شبیه‌سازی المان محدود دستگاه، از دو نرم‌افزار آباکوس و ال. اس. داینا استفاده شد که اهداف مورد نظر از این شبیه‌سازی‌ها که همان استحکام دستگاه در برابر ضربه و ایجاد شتاب فراتر از ۳۰۰۰ جی بود در هردو نرم‌افزار تحقق یافت. نتایج حاصل از این دو نرم‌افزار بسیار نزدیک بود که این امر صحت شبیه‌سازی‌ها را تأیید می‌نمود. به‌منظور ساده‌سازی عملکرد دستگاه از مدل جرم و فنر استفاده شد که معادلات حاصل از این شبیه‌سازی استخراج و در دو نرم‌افزار متلب و ویژوال نسترن دستکناپ مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصل از این دو نرم‌افزار نیز یکسان بوده و صحت روابط و مدلسازی جرم و فنر تأیید شد. یکی از مهمترین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها وابستگی شکل موج سینوسی به استفاده از الاستومرها بود که علاوه بر شکل‌دهی به شکل موج حاصل از ضربه، تنش دینامیکی حاصل از ضربه را نیز در دستگاه به‌شدت کاهش می‌داد که این امر استفاده از این مواد؛ یعنی الاستومرها را در این نوع دستگاه‌ها را ضروری نموده است. ضریب اطمینان دستگاه با توجه به مواد به‌کار رفته به‌عنوان ضربه‌گیر، ضخامت آنها و همچنین ارتفاع سقوط بیشینه ممکن؛ یعنی ۲ متر که در شبیه‌سازی لحاظ گردیده، ۲/۳۲ می‌باشد که می‌تواند با توجه به پارامترهای گفته‌شده تغییر کند و ایمن‌تر گردد. بخش‌های مختلف دستگاه در جدول ۷ آمده است. مانند تمام دستگاه‌های موجود در بازار مشخصات کلی دستگاه که در قالب کاتالوگ ارائه می‌شود که این امر برای دستگاه طراحی‌شده در جدول ۸ آمده است و سپس شکل نهایی دستگاه در شکل ۲۰ ارائه شده است.

جدول ۶. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها در حالت بدون ضربه‌گیر

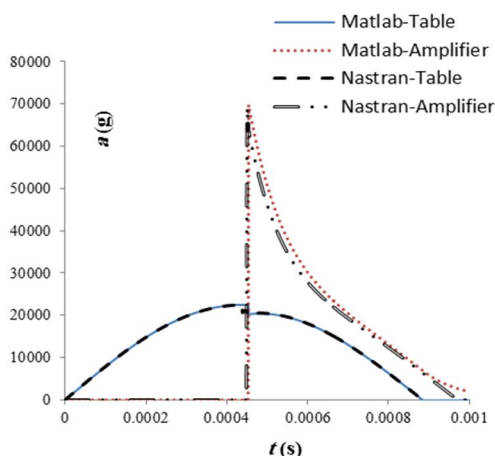
نرم‌افزار	شتاب بیشینه میز اصلی $(m/s^2) \times (e4)$	شتاب بیشینه میز امپلی (افزاینده) $(m/s^2) \times (e5)$
آباکوس	۳/۵۱	۱/۱
ال. اس. داینا	۳/۷۲	۱/۰۷
متلب	۳/۷۱۹	۱/۰۷۲۰
نسترن	۳/۷۱۵۳	۱/۰۲۲۴

جدول ۷. بخش‌های مختلف دستگاه تست شوک

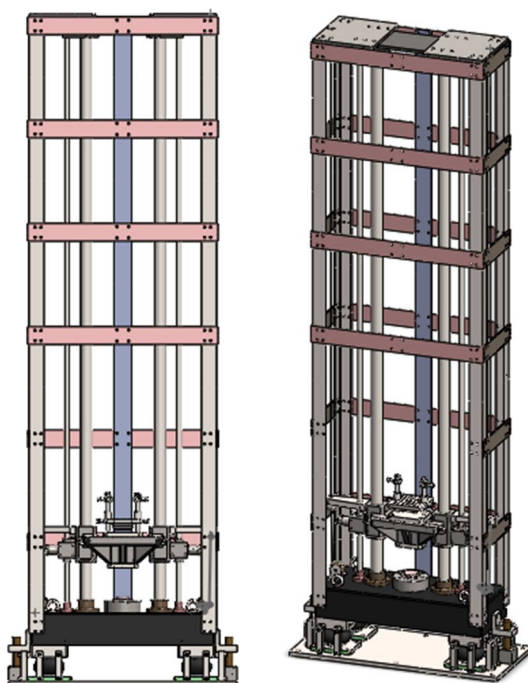
ماده	تعداد	بخش‌های مختلف دستگاه	
چدن	۱	سندان	
فولاد آلیاژی	۱	میز اصلی	میز
	۱	ضربه‌زن فولادی	
فولاد زنگ‌نزن	۲	بوش	
فولاد ساختمانی st37	۲	میله راهنما	سیستم بالابری
-	۱	موتور وینچ	
-	۱	گیربکس	
-	۲	قرقره	
فولاد ساختمانی st37	۲	سیم بکسل	
-	۲	ترمز بادی	سیستم ترمز
فولاد ساختمانی st37	۲	میله راهنما	
آلومینیم 7075	۱	صفحه ثابت	میز افزایش‌دهنده شوک
آلومینیم 7075	۱	صفحه متحرک	
آلومینیم 7075	۲	میله‌های راهنما	
فولاد آلیاژی	۲	فنر	
-	۴	فنر بادی	سیستم تعلیق
-	۸	کمک فنر	
فولاد ساختمانی st37	۴	ماتینگ	
فولاد کربنی	۴	پایه	
فولاد ساختمانی st37	۴	فسس اطراف دستگاه	

جدول ۸. مشخصات کلی دستگاه تست شوک

جرم نمونه	جرم نمونه	جرم نمونه کمتر از ۱ کیلوگرم	مشخصات
۲۰ تا ۵۰ کیلوگرم	۲۰ تا ۱ کیلوگرم		نوع ماشین تست شوک ساخته شده
	میز سقوط آزاد		بازه زمانی شوک ایجاد می‌شود (میلی ثانیه)
	۵۰ تا ۰/۵		بازه شتاب پالس شوک وارده به نمونه با جرم حداکثر (g)
۱۰۰ تا ۱۰۰۰	۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰	> ۳۰۰۰	شکل پالس شوک
	نیم سینوسی		حداکثر جرم نمونه (کیلوگرم)
	۵۰		حداکثر ارتفاع رهاش (متر)
	۲		جرم میز سقوط (کیلوگرم)
	۱۳۸		جرم سندان (کیلوگرم)
	۹۹۲		جرم کل دستگاه (کیلوگرم)
	≈ ۳۰۶۰		



شکل ۱۹. نمودار شتاب زمان خروجی متلب و ناسترن در حالت وجود ضربه گیر



شکل ۲۰. طراحی نهایی دستگاه تست شوک

#### ۴. مآخذ

- [1] R. A. Tekade, C. V. Patil, Structural And Modal Analysis Of Shock Absorber Of Vehicle - A Review, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, Vol. 2, No.3, pp. 120-126, 2014.
- [2] P. Poornamohan, Design And Analysis of A Shock Absorber, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 1, No.4, pp. 578-592, 2012.
- [3] S. Martande, Y. N. Jangale, N.S. Motgi, Design and Analysis of Shock Absorber, *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management*, Vol. 2, No.3, pp. 195-199, 2013.
- [4] C. Lalanne, *Mechanical Vibration and Shock Analysis- Mechanical Shock*, 2<sup>nd</sup> Edition, Vol. 2, pp. 371, London, Hoboken: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [5] C. M. Harris, *Shock and vibration handbook*, McGraw HILL, 1961.
- [6] C. Lalanne, *Mechanical Vibration and Shock Analysis-Mechanical Shock*, Second Edition, Vol. 2, pp.213, London, Hoboken: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2009.

[7] ISO-8568, *Mechanical shock - Testing machines - Characteristics and performance*, International Standard, First edition, 1989.

[8] T. Irvine, Simple drop shock revision D, [www.vibrationdata.com](http://www.vibrationdata.com), accessed February 12, 2004.

[۹] م. بحیرایی، طراحی، ساخت و تحلیل تجربی و تئوری مکانیزم دو جرمی افزاینده شاک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، مرکز تحقیقات فضایی، دانشگاه مالک اشتر، ۱۳۸۵.

[10] Mass Shock Amplifiers For High Intensity Shock Testing, L. A. B. Equipment, Inc, [www.labequipment.com](http://www.labequipment.com), accessed February 12, 2004.

## پی‌نوشت

- 
1. degradation
  2. exciters
  3. shock response spectrum
  4. shakers
  5. high-impact machine
  6. granularity
  7. programmer
  8. elastomer disks
  9. conical or cylindrical lead pellets
  10. pneumatic programmers