

تحلیل پاسخ شوک یک نانوماهواره هنگام جدایش از ماهواره بر در

حوزه زمان و فرکانس

مهدی نجاتی^۱، سعید شکرالهی^۲

مجتمع دانشگاهی هوافضا

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۰۹

تاریخ ارزیابی نهایی: ۱۳۹۱/۰۹/۱۰

چکیده

در این مقاله روشی تحلیلی برای ارزیابی میزان شوک انتقالی به نقاط مختلف یک نانوماهواره بدون شبیه‌سازی کامل آن ارائه شده است. این روش با توجه به ماهیت شوک و پیچیدگی مدل که تحلیل مبتنی بر روش اجزاء محدود مجموعه‌ی ماهواره را بسیار پیچیده و زمان‌بر می‌نماید، می‌تواند مفید واقع گردد. نانوماهواره مورد بررسی شامل زیر سیستم‌های حساس به شوک می‌باشد که تحت بارگذاری پیروشوک ناشی از جدایش ماهواره از ماهواره‌بر قرار دارد. از آنجایی که پیروشوک‌ها غالباً با طیف پاسخ آنها معرفی می‌گردند، ابتدا پیشینه شتاب - زمان^۱ پیروشوک ورودی از طیف پاسخ فرکانسی آن استخراج شده است. در این تحقیق سطح شوک انتقالی به زیر سیستم‌های حساس به شوک در دو حوزه زمان و فرکانس تعیین شده است. در حوزه زمان با داشتن پیشینه شتاب - زمان پیروشوک ورودی و با استفاده از مدل ساده شده‌ای که شامل تعداد محدودی از درجات آزادی می‌باشد، پاسخ زمانی زیر سیستم‌های حساس به شوک و یا نقاط مورد نظر به دست آمده‌اند. در حوزه فرکانس با داشتن طیف پاسخ شوک ورودی و ماتریس مودال مدل چند درجه آزادی، پیشینه پاسخ محتمل در هر زیر سیستم برآورد شده است. در نهایت با مقایسه پیشینه پاسخ به دست آمده از تحلیل در حوزه زمان و پیشینه پاسخ محتمل از طیف پاسخ پیروشوک ورودی ناشی از تحلیل در حوزه فرکانس برای زیر سیستم‌های مختلف، قابلیت و صحت فرایند انجام شده ارزیابی گردیده است. از نظر تئوری، پاسخ حاصل از طیف پاسخ شوک^۲ توانایی تعیین دقیق پاسخ را نداشته و تنها ارائه کننده حدود آن، جهت تجسم سریع رفتار دینامیکی سیستم است. بنابراین عدم تطبیق پاسخ‌ها در مقایسه دو روش ذکر شده از قبل محرز بوده و صحت سنجی براساس پوشش‌دهی مقادیر حاصل از تحلیل در حوزه زمان، توسط نتایج تحلیل در حوزه فرکانس استوار است.

کلیدواژه:

شوک، پیروشوک، طیف پاسخ شوک، پاسخ زمانی، حوزه زمان، حوزه فرکانس، نانوماهواره.

۱. مقدمه

روی ماهواره دارای محدودیت تحمل شوک می‌باشند. بنابراین جهت انتخاب مناسب هر زیر سیستم و یا در صورت نیاز به ایزولاتور مناسب جهت کاهش شوک، پی بردن به میزان شوک رسیده به محل نصب زیر سیستم الزامی و اجتناب ناپذیر است. با توجه به ماهیت شوک و پیچیدگی مدل، تحلیل نرم افزاری مجموعه ماهواره پیچیده و بسیار زمان‌بر می‌باشد. از طرفی حل تحلیلی آن نیز بدون ساده‌سازی مدل میسر نبوده و در ضمن پاسخ در تمامی مکان‌ها نیز مورد نیاز نیست. روش‌های مختلفی جهت برآورد سطح شوک انتقالی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به حل تحلیلی معادلات دینامیکی حرکت سیستم چند درجه آزادی معادل و یا استفاده از طیف پاسخ شوک اشاره نمود [۱].

طیف پاسخ شوک در میانه قرن بیستم ابداع گردید. در این روش طراحان جهت تعیین استحکام سازه‌ها، مطالعات خود را بجای

جدایش طبقات مختلف ماهواره‌بر و نیز جدایش ماهواره از طبقه آخر ماهواره‌بر بارهایی گذرا با دوره تناوب بسیار کوتاه در سازه داخلی ماهواره ایجاد می‌نماید که به بارهای شوک معروف بوده و معمولاً توسط مکانیزم‌های جدایش پیروتکنیکی ایجاد می‌گردند. اثر این نوع مکانیزم جدایش، شوک‌هایی با شدت و فرکانس بسیار بالا موسوم به پیروشوک‌ها می‌باشند. با وجود تاثیر ناچیز این شوک‌ها بر عضوهای سازه‌ای، تجهیزات الکترونیکی به دلیل حساسیت بالایی که نسبت به انرژی پیروشوک فرکانس بالا دارند به سادگی آسیب پذیرند. در بسیاری از موارد، تجهیزات نصب شده

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد mah_nejati@yahoo.com

۲. استاد s_shokrollahi@yahoo.com

بررسی پالس‌های شوک ورودی، به پاسخ‌های سیستم تحت بار شوک معطوف نمودند. در دهه ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰، این عمل با استفاده از وسایل اندازه‌گیری (ریدر^۲) که ثبت‌های دائمی از شوک را به صورت مقدار پاسخ بر حسب فرکانس تولید می‌نمود، انجام گرفت. با رسم نمودار جابجایی بر حسب فرکانس طبیعی، اولین طیف پاسخ شوک به دست آمد [۲].

در سال ۱۹۳۲ م. ای. بیوت^۴ روشی را بنا نهاد که پس از آن به تحلیل همه نوع شوک تعمیم یافت. در این روش، شوک مفروض به سیستم مکانیکی استاندارد فرضی شامل N تکیه‌گاه و N تشدید کننده^۵ یک درجه آزادی وارد گردید. سپس با رسم پیشینه پاسخ هر یک از سیستم‌های یک درجه آزادی در فرکانس طبیعی مربوطه، طیف پاسخ انواع شوک ورودی به دست آمد.

در سال‌های ۱۹۳۳ و ۱۹۳۴ و سپس در سال‌های ۱۹۴۱ و ۱۹۴۳ اولین آثار مشتمل بر این طیف‌ها منتشر گردیدند. در این آثار طیف پاسخ شوک که در آن زمان طیف شوک نامیده می‌شد، به شکل امروزی نشان داده شده بود. از این طیف‌ها بیشتر در حوزه تست‌های محیطی در بازه سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۴۵ استفاده می‌شد که از آن جمله می‌توان به آثار جی.ام. فرانکلند^۶ در سال ۱۳۴۲، جی.پی. والش و آر. ای. بلیک^۷ در سال ۱۹۴۸، آر.ای. مایندلین^۸ سال ۱۹۴۵ اشاره نمود [۳].

در سال ۱۹۷۸ پیتیر کرایمی^۹ روشی تحلیلی ارائه نمود که در آن با مشخص بودن پاسخ در چند نقطه می‌توان پاسخ سازه بارگذاری شده توسط شوک را در نقاط دیگر محاسبه نمود. با استفاده از این روش پاسخ در سرتاسر سازه می‌تواند بدون متوسل شدن به شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل کامل پیش‌بینی گردد. این تحقیق همچنین روشی جهت ایجاد پیشینه شتاب زمان از طیف پاسخ شوک مشخص بیان گردیده است [۴].

در سال ۲۰۰۸ تاکاشی ایواسا، کینزانگ شی و می‌کی سای تو^{۱۰}، تحقیقی مبتنی بر انرژی کل پیشینه مدل یک درجه آزادی به منظور ارزیابی آسیب احتمالی سازه تحت بارگذاری پیرو شوک انجام دادند. این گروه مدعی هستند که انرژی پیشینه کل شامل انرژی جنبشی و انرژی کرنشی بعنوان شاخص مناسبی برای آسیب احتمالی سازه‌ها مطرح می‌باشند و طیف انرژی کل از آن‌ها استخراج می‌گردند [۵]. این گروه همچنین در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۷، مدل ساده شده‌ای مبتنی بر سیستمی یک درجه آزادی را جهت پیش‌بینی محیط پیرو شوک در مجاورت بسط نواری مکانیزم جدایش ارائه نمودند [۶].

در این مقاله به منظور بررسی میزان شوک انتقالی به نقاط مختلف یک نانوماهواره که تحت پیرو شوک ناشی از جدایش قرار گرفته، مدل ساده‌ای با تعداد محدودی از درجات آزادی ایجاد و به منظور بررسی تشابه رفتار دینامیکی مدل با نانوماهواره، فرکانس‌ها و مودهای طبیعی آنها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. پس از حصول اطمینان از رفتار دینامیکی مشابه، معادلات دینامیکی حرکت سیستم مدل شده استخراج می‌شوند. در این مرحله جهت ارزیابی پاسخ در هر یک از درجات آزادی دو روش ارائه شده است. روش اول مبتنی بر حل تحلیلی معادلات دینامیکی حرکت بوده که در آن با استفاده از پیشینه شتاب-زمان پیرو شوک ورودی و معادلات دینامیکی حرکت مدل ساده شده، پاسخ زمانی هر یک از درجات آزادی مطابق با زیر سیستم‌های حساس به شوک با حل تحلیلی دستگاه‌های کوپل معادلات دیفرانسیل حرکت به دست می‌آیند. از آنجاییکه غالباً شوک با طیف پاسخ آن توصیف می‌گردد، جهت بررسی پاسخ در حوزه زمان، ابتدا می‌بایست پیشینه شتاب-زمان آن استخراج گردد. روش دوم بر پایه طیف پاسخ شوک استوار است و تنها پیشینه پاسخ محتمل را بدون اشاره به زمان وقوع آن ارائه می‌نماید. در این روش از طیف پاسخ شوک ورودی به همراه ماتریس مودال سیستم مدل شده استفاده می‌گردد. در این روش می‌توان بدون حل معادلات دینامیکی حرکت پیشینه پاسخ محتمل را پیش‌بینی نمود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در روش طیف پاسخ شوک برای تخمین پاسخ، پیشینه پاسخ‌ها بدون توجه به علامت و زمان وقوع (با توجه به نگرش‌های مختلف جمع‌زنی) با یکدیگر ترکیب می‌شوند که اصولاً حد بالایی از پاسخ را ارائه می‌نماید. بنابراین زمانیکه هدف طراح تجسم سریع اثرات شوک بر روی سیستم فیزیکی باشد، استفاده از این روش مناسب است.

۲. فرمولبندی

۲-۱. ایجاد پیشینه شتاب - زمان از طیف پاسخ شوک

پیشینه شتاب - زمان به صورت مجموعی از منحنی‌های سینوسی میرا شونده در نظر گرفته می‌شود [۴].

$$\ddot{z}(t) = \sum_{k=1}^{N_s} (-1)^k c_k e^{-\zeta_k \omega_k t} \sin(\omega_k t \sqrt{1-\zeta_k^2}), \quad k = 1: N_s \quad (1)$$

که در آن $\omega_k = 2\pi f_k$ فرکانس (رادیان بر ثانیه)، c_k ‌ها ثابت‌های تعریف شده در N_s نقطه و ζ_k (ضریب میرایی) یک پارامتر آزاد می‌باشد. کوچک‌تر شدن ζ_k منجر به افزایش زمان تحریک و در نتیجه افزایش حجم محاسبات جهت تعیین پاسخ می‌گردد. طبق بررسی انجام شده مقدار $\zeta_k = 0.1$ برای ارائه نتایج

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} \quad (7)$$

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} \quad (8)$$

که در آن \mathbf{M} و \mathbf{K} به ترتیب ماتریس جرم و سفتی می‌باشند. با جایگذاری انرژی‌های جنبشی، پتانسیل و نیروهای ناپایستار که در نبود نیروی خارجی منحصر به نیروهای حاصل از دمپرها هستند در رابطه (۶) و نظر به اینکه شوک وارده به صورت جابجایی تکیه‌گاه است، معادلات دیفرانسیل حرکت به صورت زیر به دست می‌آیند [۱].

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{T}\ddot{\mathbf{z}}(t) \quad (9)$$

که در آن \mathbf{C} ماتریس میرایی، \mathbf{T} بردار جسم صلب نسبت به پایه [۸] و $\ddot{\mathbf{z}}(t)$ شتاب تکیه‌گاه یا همان فصل مشترک ماهواره و ماهواره بر می‌باشد. لازم به ذکر است که میرایی به صورت میرایی سازه‌ای ($0.01 \leq \zeta_i \leq 0.1$) در معادلات حرکت لحاظ گردیده اند. مقادیر ویژه λ_i و مودهای وابسته $\{\varphi_i\}$ را می‌توان از مسئله مقدار ویژه نامیرای رابطه به دست آورد و جهت تحلیل مودال استفاده نمود. دستگاه معادلات (۹) با تغییر مختصات $q_i - z = w_i$ و تعریف بردار جابجایی نسبی $\{W\}$ به صورت زیر به مختصات اصلی یا مودال انتقال داده می‌شوند.

$$\{W\} = \sum_{i=1}^N \varphi_i \eta_i(t) = [\Phi] \{\eta\} \quad (10)$$

که $[\Phi]$ ماتریس مودال و $\{\eta\}$ بردار مختصات مودال می‌باشند. مودها نسبت به ماتریس جرم $[M]$ و ماتریس سفتی $[K]$ متعامد می‌باشند. اگر میرایی‌های مودال به صورت $c_i = 2\zeta_i \omega_i$ معرفی شوند، معادلات حرکت در مختصات مودال عبارتند از:

$$\ddot{\eta}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t) = -\Gamma_i \ddot{z}(t), \quad i = 1: N \quad (11)$$

که ζ_i نسبت میرایی مودال مربوط به مود i ام، ω_i فرکانس طبیعی مطابق با مود $\{\varphi_i\}$ و Γ_i ضریب مشارکت مودال تعریف شده با رابطه (۱۲)، می‌باشند.

$$\Gamma_i = -\frac{\{\varphi_i\}^T [M] \{T\}}{\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\}} \quad (12)$$

۲-۲-۱. تحلیل در حوزه زمان

تحلیل پاسخ در حوزه زمان روشی مبتنی بر حل معادلات دیفرانسیل حرکت است که با استفاده از آن می‌توان پاسخ زمانی واقعی هر زیر سیستم را تحت شوک ورودی به دست آورد. این پاسخ‌ها می‌توانند بر حسب نیاز به صورت تغییر مکان، سرعت و یا شتاب در مدت اعمال شوک یا پس از آن باشند. پس از مدل‌سازی ماهواره با سیستمی از درجات آزادی محدود، معادلات دیفرانسیل حرکت

منطقی مقرون به صرفه می‌باشد. رابطه (۱) بدلیل تشابه پاسخ شوک سازه‌های واقعی به مجموعی از منحنی‌های سینوسی میرا انتخاب شده است.

اگر $S(f)$ طیف شوک شتاب متناظر با $\ddot{z}(t)$ باشد که در آن S بیشینه شتاب بر حسب g و فرکانس بر حسب هر تتر است، باید طیف شوک ایجاد شده از $\ddot{z}(t)$ در N_s نقطه با فرکانس‌های $f_1 \dots f_{N_s}$ از $S(f)$ مطابقت داشته باشد. مقادیر ضرایب در رابطه (۱) به صورت بازگشتی به دست می‌آیند. اگر $S_c(c_1, c_2, 0, \dots, c_{N_s}, f)$ طیف شوک $\ddot{z}(t)$ باشد در گام اول هر ثابت با لحاظ نمودن مقدار واحد برای یک ثابت در حالیکه بقیه ثابت‌ها صفر هستند به دست می‌آید [۴].

$$c_1^{(1)} = \frac{S_{f_1}}{s_c(1, 0, \dots, 0, f_1)}, \quad c_2^{(1)} = \frac{S_{f_2}}{s_c(0, 1, \dots, 0, f_2)}, \quad \dots \quad (2)$$

سپس با استفاده از مشتقات شبه جزئی S_c برای تصحیح c_k ‌ها روند تکرار انجام می‌شود. جهت اجتناب از واگرایی عددی از ضریب وزنی f_w استفاده شده است. رابطه تکرار و پارامترهای موجود در آن عبارتند از [۴]:

$$c_k^{(n+1)} = c_k^{(n)} + f_w \left[\frac{S(f_k) - S_c^{(n)}(f_k)}{\hat{S}(f_k) - S_c^{(n)}(f_k)} \right] \Delta c_k \quad (3)$$

$$S_c^{(n)}(f_k) = S_c(c_1^{(n)}, c_2^{(n)}, \dots, c_{N_s}^{(n)}; f_k) \quad (4)$$

$$\hat{S}_c(f_k) = S_c(c_1^{(n)}, c_2^{(n)}, \dots, c_k^{(n)} + \Delta c_k, \dots, c_{N_s}^{(n)}; f_k) \quad (5)$$

که Δc_k کسر مشخصی از $c_k^{(n)}$ بوده و مقدار ۰/۵ برای آن، جوابهای قابل قبولی را ارائه می‌نماید.

۲-۲-۲. معادلات حرکت مدل دینامیکی

همانطور که بیان شد به دلیل پیچیدگی مدل اصلی و همچنین عدم نیاز به محاسبه پاسخ در کل سازه که منجر به بالا رفتن حجم محاسبات می‌گردد، مدلی با درجات آزادی محدود که رفتار دینامیکی مدل اصلی را شبیه سازی نموده و نیز در برگیرنده زیر سیستم‌های حساس به شوک می‌باشد ایجاد می‌گردد. این سیستم چند درجه آزادی شامل مجموعه‌ای از جرم‌ها، فنرها و دمپرها می‌باشد. جهت به دست آوردن معادلات حرکت این سیستم از معادلات لاگرانژ استفاده می‌شود [۷].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad (6)$$

که در آن اگر Q, V, T به ترتیب انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل، نیروهای ناپایستار و مختصه تعمیم یافته می‌باشند. انرژی‌های جنبشی و پتانسیل سیستم از روابط زیر حاصل می‌گردند.

$$F = \{\varphi_i\}^T [M] \{T\} \quad (15)$$

$$\langle m_i \rangle = \{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\} \quad (16)$$

حل تحلیلی معادله دیفرانسیل فوق در نبود شرایط اولیه

به صورت زیر است:

$$\eta_i(t) = \frac{F_i}{\langle m_i \rangle \omega_{d_i}} \sum_{k=1}^{N_i} (-1)^{k+1} c_k I_k(t) \quad (17)$$

که در آن $I_k(t)$ عبارت است از:

$$I_k(t) = \int_0^t e^{-\zeta_i \omega_i t + (\zeta_i \omega_i - \zeta \omega_k) \tau} \sin(\omega_{d_k} t) \sin(\omega_{d_i} (t - \tau)) d\tau, \quad \omega_{d_i} = \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} \quad (18)$$

فیزیکی با در نظر گرفتن اثر تمامی مودها تعیین می گردد. از آنجاییکه سازه چندین مود دارد که به طور هم زمان توسط شوک تحریک می شوند، پاسخ از جمع جبری پاسخ های مودهای تحریک شده به دست می آید. از روی طیف پاسخ شوک می توان بزرگ ترین پاسخ هر یک از این مودها را تعیین نمود. اما نمی توان هیچ اطلاعی درباره لحظه وقوع این بیشینه ها داشت. از آنجاییکه نسبت های فازی میان مودهای گوناگون حفظ نمی شوند، شناسایی روش دقیقی برای ترکیب مودها به سادگی امکان پذیر نیست. به علاوه طیف پاسخ شوک برای یک مقدار معلوم میرایی در همه محدوده فرکانسی ترسیم می شود، در حالی که این میرایی از یک مود به مود دیگر در سازه تغییر می کند. بنابراین چگونگی ترکیب این پاسخ های اولیه برای به دست آوردن پاسخ کلی عامل تعیین کننده ای می باشد. در این مقاله سه روش جمع زنی با روابط (۲۳)،

(۲۴) و (۲۵) ارائه شده است. [۳]

$$SRS_A(\ddot{u}) = \sum_{i=1}^N |SRS(\ddot{u}, \omega_i)| \quad (23)$$

$$SRS_R(\ddot{u}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \{SRS(\ddot{u}, \omega_i)\}^2} \quad (24)$$

$$SRS_p(\ddot{u}) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \{SRS(\ddot{u}, \omega_i)\}^2 + p \sum_{i=1}^N |SRS(\ddot{u}, \omega_i)|}}{p+1} \quad (25)$$

که p ضریب وزنی بوده و در این تحقیق برابر یک فرض شده

است.

۳. تحلیل پاسخ ماهواره مفروض به پیرو شوک وارده

پس از بیان تمامی روابط مورد نیاز، به مطالعه اثر شوک بر یک نانوماهواره مفروض تحت پیرو شوک ناشی از جدایش آن از

استخراج شده و به مختصات مودال انتقال داده می شوند. برای حل معادلات حرکت ابتدا رابطه (۱۲) به صورت زیر بازنویسی می گردد.

$$\ddot{\eta}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t) = -\frac{1}{\langle m_i \rangle} f_i(t) \quad (13)$$

که در آن $f_i(t)$ نیروی موثر و $\langle m_i \rangle$ جرم مودال می باشند که با روابط (۱۴) و (۱۶) بیان می گردند.

$$f_i(t) = F_i \sum_{k=1}^{N_i} (-1)^k c_k e^{-\zeta \omega_k t} \sin(\omega_{d_k} t), \quad \omega_{d_k} = \omega_k \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (14)$$

خاطر نشان می گردد که در این تحقیق ضریب میرایی به ترتیب در میرایی سازه و تابع شوک برابر ۰/۰۵ و ۰/۱ در نظر گرفته شده است ($\zeta_i = 0.1$ و $\zeta_k = 0.05$). پس از محاسبه پاسخ در مختصات مودال، پاسخ زمانی هر یک از درجات آزادی به صورت شتاب نسبی و یا مطلق از روابط (۱۹) و (۲۰) به دست می آیند [۹].

$$\{\dot{W}(t)\} = [\Phi] \{\ddot{\eta}(t)\} \quad (19)$$

$$\ddot{U}(t) = \ddot{W}(t) + \ddot{z}(t) \quad (20)$$

$\ddot{U}(t)$ و $\ddot{W}(t)$ به ترتیب بردار شتاب نسبی (نسبت به پایه) و مطلق هر زیر سیستم و $\ddot{z}(t)$ پیرو شوک ورودی می باشد. تمامی مراحل ذکر شده در نرم افزار مطلب کد نویسی شده و با مشخص شدن پارامترهای ورودی پاسخ هر یک از زیر سیستم ها به صورت نمودار شتاب-زمان داده می شود [۱].

۲-۲-۲. محاسبه پاسخ با استفاده از طیف پاسخ شوک

رابطه (۱۱) مشابه معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی تحت تحریک پایه می باشد که تنها عبارت Γ_i به آن اضافه شده است. بدین ترتیب می توان استنباط نمود که در هر مود بیشینه پاسخ با طیف پاسخ شوک ورودی متناسب است و ضریب تناسب همان Γ_i می باشد. بنابراین طیف پاسخ شوک شتاب مختصات تعمیم یافته $\ddot{\eta}_i$ با رابطه زیر داده می شوند [۸].

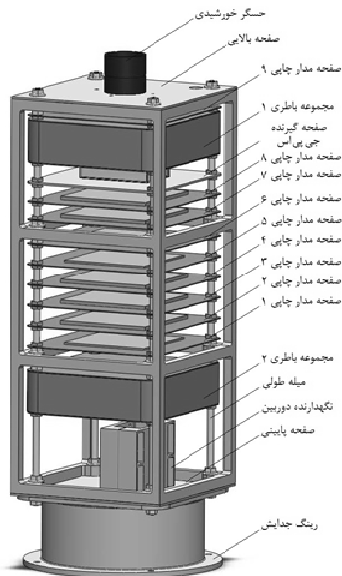
$$SRS(\ddot{\eta}_i) = \Gamma_i SRS(\ddot{z}) \quad (21)$$

سهم مودال برای طیف پاسخ شوک هر یک از درجات آزادی در مختصات فیزیکی عبارت است از [۸]:

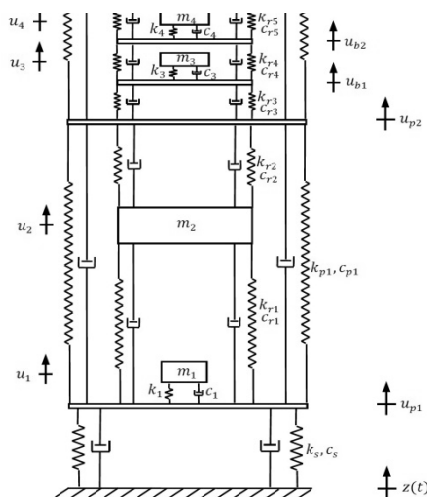
$$SRS(\ddot{w}, \omega_i) = \{\varphi_i\} SRS(\ddot{\eta}_i) \quad (22)$$

و در نهایت پاسخ هر یک از درجات آزادی در مختصات

گردیده‌اند و بدلیل تشابه هندسی و جرمی به دو گروه با جرم کلی ۱۵۰ و ۲۵۰ گرم تقسیم‌بندی شده که به اختصار تجهیزات ۱ و ۲ نامیده می‌شوند. سازه نانو ماهواره یکپارچه و از جنس آلایاز آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد. صفحاتی که زیر سیستم‌ها روی آنها قرار گرفته‌اند توسط چهار پیچ متری، جداکننده^{۱۳} و مهره به سازه اولیه متصل شده‌اند. پیچ و مهره‌های استفاده شده همگی از جنس فولاد نگیر می‌باشند. در قسمت پایینی نیز رینگ جدایش که عضو واسط نانو ماهواره و ماهواره‌بر است، قرار دارد و پیروشوک ناشی از جدایش از این قسمت به مجموعه ماهواره انتقال می‌یابد. جنس صفحات نگهدارنده دوربین، جی‌پی‌اس، حسگر خورشیدی و همچنین رینگ جدایش از آلایاز آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشند. جهت ساده سازی مدل اصلی در مدل‌سازی سیستم گسسته از اثرات آنتن‌ها و صفحات جانبی صرف‌نظر شده است. پیکربندی و چیدمان زیرسیستم‌های نانو ماهواره‌ی مورد تحلیل در مدل جرمی آن با شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. مدل جرمی نانو ماهواره مورد بررسی

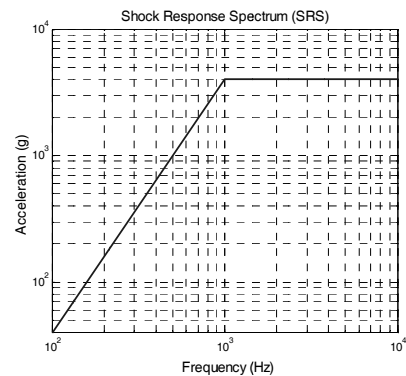


شکل ۴. قسمتی از مدل چند درجه آزادی نانو ماهواره

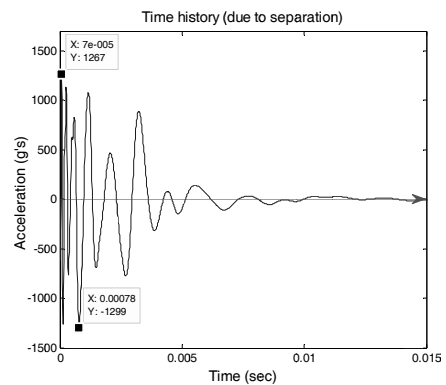
ماهواره بر پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا مشخصات شوک و نانو ماهواره ارائه می‌گردد.

۱-۳. طیف پاسخ پیروشوک

معمولاً شتاب ناشی از انفجار تجهیزات پیروتکنیک وارد بر نشیمنگاه ماهواره، به صورت طیف پاسخ شوک از طرف گروه پرتابگر ارائه می‌شود. این طیف بر اساس اطلاعات مندرج در کتابچه سازگاری ماهواره و ماهواره‌بر به صورت شکل (۱) داده شده است. تحت این پیروشوک، بیشینه شتاب در فرکانس هزار هرتز به $g4000$ می‌رسد. یاد آوری می‌گردد که جهت تحلیل پاسخ در حوزه زمان، بایستی نمودار شتاب - زمان از این طیف استخراج گردد. بدین منظور از روابط بخش ۲.۱ استفاده و نتایج آن در بخش ۴.۱ آورده شده است.



شکل ۱. طیف پاسخ پیروشوک ورودی



شکل ۲. بیشینه شتاب - زمان ایجاد شده از SRS ماهواره بر

۲-۳. نانو ماهواره

نانو ماهواره‌ی مورد مطالعه، ماهواره‌ای با جرم تقریبی ده کیلوگرم و ابعاد $۱۶۰ \times ۱۶۰ \times ۴۵۰$ میلی‌متر می‌باشد. زیرسیستم‌های مهم و حساس به شوک که در این مقاله مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از: دوربین، دو مجموعه باتری، تعداد نه مجموعه تجهیزات الکترونیکی، گیرنده جی‌پی‌اس^{۱۱} و حسگر خورشیدی. تجهیزات الکترونیکی بر روی ۹ تخته صفحه مدار چاپی^{۱۲} نصب

۳-۳. استخراج نمودار شتاب- زمان از طیف پاسخ داده شده همانطور که اشاره گردید جهت تحلیل پاسخ در حوزه زمان نیاز به نمودار شتاب- زمان در تحریک پایه می‌باشد. در این قسمت با توجه به فرمول‌بندی و طیف پاسخ شوک ارائه شده، نمودار

جدول ۱. اطلاعات مربوط به فرکانس و شتاب متناظر در نقاط مختلف از نمودار طیف پاسخ شوک

k	واحد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
f_k	هرتز	۱۰۰	۱۵۸	۲۵۰	۴۰۰	۵۰۰	۷۰۰	۸۵۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰
$S(f_k)$	g	۴۰	۱۰۰	۲۵۰	۶۵۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۹۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰

بخش ۱. محاسبه می‌گردند. با استفاده از برنامه کد نویسی شده و اعمال ورودی‌ها، این ضرایب مطابق جدول (۲) به دست می‌آیند. روند تکرار برای محاسبه این ضرایب تا بیست بار جهت حصول خطای مجاز انجام شده است.

توجه شود که انتخاب نقاط کم باعث تقریبی شدن نمودار شتاب- زمان و انتخاب زیاد نقاط باعث بالا رفتن حجم محاسبات خواهد شد. اگر پیشینه شتاب - زمان به صورت مجموعی از توابع میراثونده توصیف شده با رابطه (۱) باشد، ضرایب c مطابق روابط

جدول ۲. ضرایب پیشینه شتاب- زمان ایجاد شده برای طیف داده شده ماهواره بر (g)

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
۰/۰۶	۰/۴۶	۰/۹۳	۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۹۹	۰/۵۰	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۴۱
-۶۱	-۳۰	۱۷	۱۲۸۱	۱۲۵۲	۹۳۷	۱۱۶۲	۱۲۶۲	۱۵۶۴	۱۳۳۱

۳- میرایی در کل سازه به صورت میرایی سازه‌ای با ضریب میرایی ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که مقادیر Δc_k و f_{wv} به ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۵ فرض شده‌اند. نمودار شتاب زمان طیف پیرو شوک داده شده با رسم نمودار رابطه (۱) با ضرایب موجود در جدول (۲) به دست می‌آید که در شکل (۲) نشان داده شده است.

۴- از آنتن‌ها و صفحات جانبی در مدل‌سازی صرف نظر شده است.

جرم، هندسه و پیکربندی تجهیزات الکترونیکی، گیرنده جی‌پی‌اس و دوربین مطابق مدل جرمی نانوماهوره انتخاب شده‌اند.

۴-۳. مدل‌سازی نانوماهوره

از آنجایی که تنها روش مدل‌سازی گسسته معادل نمودن سیستم پیوسته با سیستمی متشکل از جرم، فنر و دمپر است، مدلی چند درجه آزادی از اجزاء ذکر شده ایجاد گردیده که دارای رفتار دینامیکی مشابه با مدل اصلی است. در ادامه قبل از توصیف مدل ریاضی ایجاد شده، فرضیات منظور شده در مدل‌سازی بیان می‌گردند.

۴-۳-۲. مدل ریاضی

مدل ریاضی جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی مدل اصلی، سیستمی با درجات آزادی محدود شامل جرم، فنر و دمپر می‌باشد. در شکل (۴) به طور نمونه قسمتی از مدل چند درجه آزادی نشان داده شده است. با توجه به فرضیات بیان شده، سازه و میله‌ها با فنری‌هایی معادل شده‌اند که تنها سفتی طولی را شامل می‌شوند و سفتی صفحات نگهدارنده شامل مود اول خمشی آنها به عنوان مود غالب می‌باشد. به دلیل صلیب بالای مجموعه‌های باطری، آنها به صورت جرم متمرکز بر روی فنرهای شبیه‌سازی شده از میله‌ها قرار داده شده‌اند. جهت تعیین جرم‌ها و سفتی‌های معادل از از تئوری ارتعاشات (ارتعاش اجزاء طولی و صفحات) و مدل‌سازی اجزاء در

۴-۳-۱. فرضیات مدل‌سازی [۱]

- در تحلیل پاسخ، تنها مودهای طولی سازه در نظر گرفته شده‌اند. یعنی از مودهای عرضی سازه (خمشی) صرف نظر شده است.
- در تحلیل صفحات نگهدارنده تنها مود اول خمشی (مود غالب) در نظر گرفته شده است.

استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند. فرکانس‌ها و موده‌های طبیعی مدل جرمی ماهواره توسط نرم‌افزار به‌دست آمد. این فرکانس‌ها و موده‌های طبیعی برای سیستم چند درجه آزادی مدل شده با نوشتن معادلات حرکت و مقادیر به‌دست آمده برای جرم و سفتی‌های معادل در حل مسئله نامیرا نیز محاسبه شدند. پس از مقایسه این پارامترهای دینامیکی که معرف فیزیک سیستم می‌باشند و مقایسه آنها با یکدیگر صحت مدل‌سازی تایید گردید. در این مقایسه مشخص گردید که در محدوده‌های فرکانسی مشابه (فرکانس‌های طبیعی)، زیر سیستم‌های مشابه در هر دو مدل، دارای سهم حرکتی غالب می‌باشند. به‌طور مثال در محدوده فرکانسی ۴۵۷ هرتز، بیشینه حرکت در هر دو مدل مربوط به گیرنده جی پی اس است.

نرم افزار استفاده گردید. در مورد اجزاء طولی (از قبیل سازه نانوماهواره و میله‌های نگهدارنده زیر سیستم‌ها)، سفتی معادل با توجه به ارتعاش طولی تیرها در مود اول استخراج شده اند. در مورد صفحات نگهدارنده زیر سیستم‌ها، سفتی‌ها با توجه به مود غالب خمشی آنها و حداکثر خیز تحت اعمال باری مشخص تحت شرایط تکیه گاهی واقعی تعیین گردیدند. از آنجاییکه در سازه مذکور میرایی از جنس سازه‌ای می‌باشد، ضریب میرایی به‌طور ثابت برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است [۷]. در جدول ۳ جرم‌ها و سفتی‌های معادل آورده شده‌اند.

پس از تعیین جرم‌ها و سفتی‌های معادل نوبت به بررسی تشابه رفتار دینامیکی دو سیستم می‌رسد. بدین منظور فرکانس‌ها و موده‌های طبیعی هر دو سیستم که نمایانگر رفتار دینامیکی آنها است،

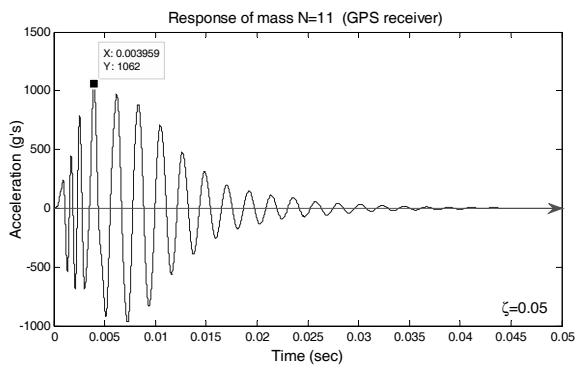
جدول ۳. جرم‌ها و سفتی‌های معادل

ردیف	مجموعه	جرم معادل m_{eq} (kg)	سفتی معادل k_{eq} (kg/m)
۱	دوربین و صفحه نگهدارنده	۰/۴۷۰	۵۴۴۸۷۰۰
۲	مجموعه باتری شماره ۱	۱/۷۴۶	-
۳	صفحه مدار چاپی شماره ۱	۰/۱۴۰	۱۰۵۰۱۱
۴	صفحه مدار چاپی شماره ۲	۰/۲۴۸	۱۷۳۹۲۸
۵	صفحه مدار چاپی شماره ۳	۰/۲۴۸	۱۷۳۹۲۸
۶	صفحه مدار چاپی شماره ۴	۰/۲۴۸	۱۷۳۹۲۸
۷	صفحه مدار چاپی شماره ۵	۰/۱۴۰	۱۰۵۰۱۱
۸	صفحه مدار چاپی شماره ۶	۰/۱۴۰	۱۰۵۰۱۱
۹	صفحه مدار چاپی شماره ۷	۰/۲۴۸	۱۷۳۹۲۸
۱۰	صفحه مدار چاپی شماره ۸	۰/۲۴۸	۱۷۳۹۲۸
۱۱	گیرنده جی‌پی‌اس و صفحه نگهدارنده	۰/۱۲۲	۱۰۱۳۴۳۸
۱۳	مجموعه باتری شماره ۱	۱/۷۴۶	-
۱۲	صفحه مدار چاپی شماره ۹	۰/۱۴۰	۱۰۵۰۱۱
۱۴	حسگر خورشیدی و صفحه نگهدارنده	۰/۰۹۳	۱۳۱۴۴۹۲

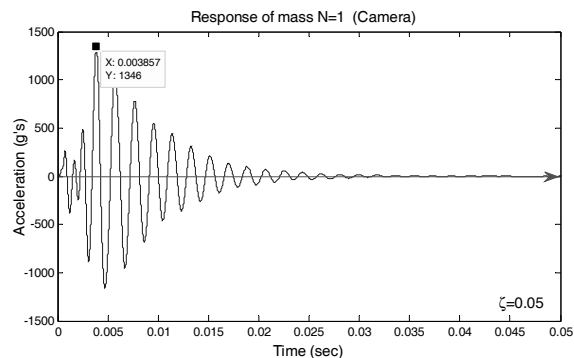
۳-۴-۳. حل تحلیلی مدل چند درجه آزادی

تمامی مراحل ذکر شده در نرم‌افزار کد نویسی شده و خروجی برنامه مذکور که منحنی‌های شتاب - زمان برای هر زیر سیستم می‌باشد در ادامه آورده شده است. لازم به ذکر است، بدلیل محدوده فرکانسی تحریک نزدیک به هم در مجموعه صفحات نگهدارنده تجهیزات یک و دو، پاسخ‌ها تقریباً مشابه بوده و بنابراین در هر مجموعه تنها یکی از این پاسخ‌ها به نمایندگی از هر گروه از صفحات نشان داده شده است.

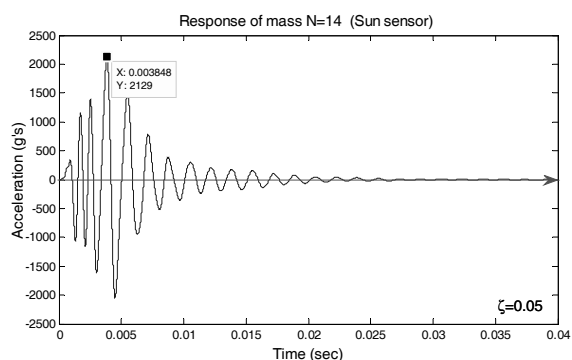
پس از تایید صحت مدل‌سازی، مدل جهت بررسی تاثیر پیرو شوک بر سازه تحت بار قرار گرفته و پاسخ در زیر سیستم‌های حساس به شوک محاسبه می‌شود. با توجه به روابط ذکر شده و تعیین پارامترهای موجود در آنها و با حل معادلات حرکت پاسخ به‌صورت جابه‌جایی، سرعت و یا شتاب در هر درجه آزادی که معرف یک زیر سیستم در مدل جرمی است، به‌دست می‌آید.



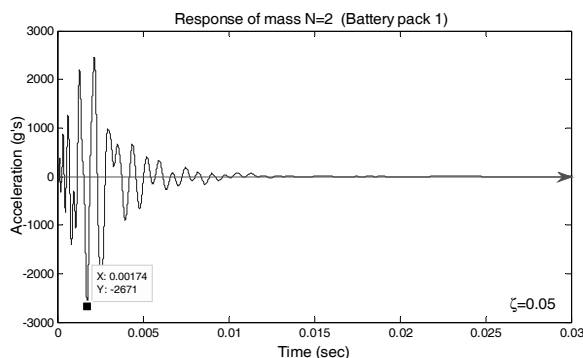
شکل ۹. نمودار پاسخ گیرنده جی پی اس تحت پیرو شوک



شکل ۵. نمودار پاسخ دوربین تحت پیرو شوک



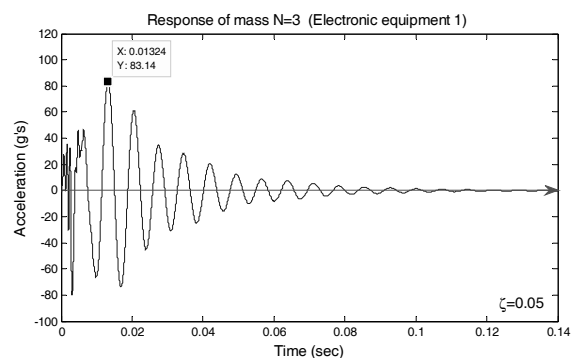
شکل ۱۰. نمودار پاسخ حسگر خورشیدی تحت پیرو شوک



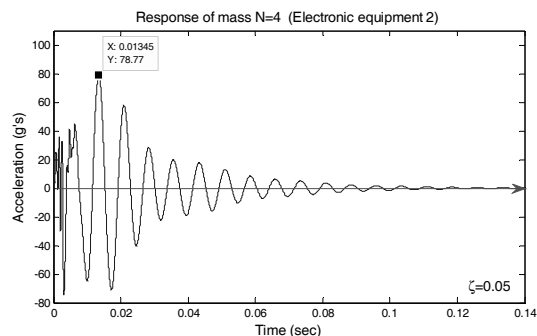
شکل ۶. نمودار پاسخ مجموعه باتری شماره یک تحت پیرو شوک

۴-۳. تحلیل پاسخ در حوزه فرکانس

در این بخش هدف محاسبه بیشینه پاسخ هر یک از درجات آزادی با استفاده از طیف پاسخ شوک می باشد. با استفاده از برنامه نوشته شده و دادن ورودی های مربوطه که شامل ماتریس جرم، ماتریس سفتی و مقادیر بیشینه پاسخ حاصل از طیف پاسخ ورودی در فرکانس های طبیعی سیستم هستند، می توان بیشینه پاسخ هر یک از درجات آزادی سیستم را به عنوان خروجی به دست آورد. البته با توجه به نوع رویکردی که در جمع زنی پاسخ در هر مود (سه روش مطرح شده) اتخاذ می گردد پاسخ های متفاوتی حاصل می شود. سه مجموعه پاسخ مذکور به همراه بیشینه پاسخ حاصل از تحلیل در حوزه زمان برای تعدادی از درجات آزادی در جدول (۴) آمده است.



شکل ۷. نمودار پاسخ تجهیزات الکترونیکی روی مدار چاپی شماره یک



شکل ۸. نمودار پاسخ تجهیزات الکترونیکی روی مدار چاپی شماره دو

جدول ۴. شتاب بیشینه در هر یک از درجات آزادی از طیف پاسخ شوک و بیشینه شتاب - زمان

مختصه	زیر سیستم	$Max(\ddot{u})$	$SRS_p(\ddot{u})$	$\sqrt{\sum_{i=1}^N \{SRS(\ddot{u}, \omega_i)\}^2}$	$\sum_{i=1}^N SRS(\ddot{u}, \omega_i) $
u_1	دوربین	۱۳۴۵/۸۹۹۴	۱۴۹۸/۷۰۲۵	۱۳۳۵/۶۷۴۰	۱۵۵۳/۰۴۵۳
u_2	مجموعه باطری ۱	۲۶۷۱/۰۴۹۰	۳۹۹۰/۸۹۵۳	۲۹۹۴/۹۳۶۸	۴۳۲۲/۸۸۱۴
u_3	تجهیزات ۱	۸۳/۱۳۶۳	۱۰۵/۰۵۹۴	۶۶/۷۹۷۵	۱۱۷/۸۱۳۴
u_4	تجهیزات ۲	۷۸/۷۷۲۴	۱۰۶/۰۹۷۹	۷۶/۰۱۶۶	۱۱۶/۱۲۵۰
u_7	تجهیزات ۱	۸۳/۲۷۷۱	۱۲۷/۸۲۲۹	۸۹/۹۷۷۷	۱۴۰/۴۳۷۹
u_{10}	تجهیزات ۲	۷۸/۹۷۳۷	۱۳۶/۵۰۸۲	۱۰۰/۰۵۹۶	۱۴۸/۶۵۷۸
u_{11}	گیرنده جی بی اس	۱۰۶۲/۳۳۳۰	۱۵۴۳/۵۶۱۷	۱۱۶۵/۷۱۸۸	۱۶۶۹/۵۰۹۴
u_{14}	حسگر خورشیدی	۲۱۲۸/۹۴۱۲	۳۰۵۲/۷۱۲۴	۲۳۲۲/۸۹۲۹	۳۲۹۵/۹۸۵۶

توضیح جدول: مقادیر شتاب بر حسب شتاب گرانش g می باشد.

۴. نتایج تحلیل

با استفاده از نمودارهای ارائه شده در بخش ۳.۲.۳ می توان دریافت که برای نانوماهوره‌ی مورد بررسی، بیشینه شتاب انتقال یافته به تجهیزات، تحت پیرو شوک با شتاب بیشینه 4000g، به چه مقدار خواهد رسید. این سطوح شتاب اطلاعات لازم جهت انتخاب زیرسیستم‌های مناسب و یا استفاده از ایزولاتور، جهت کاهش سطح شوک انتقالی، را به طراحان منعکس می نماید. از نتایج مندرج در جدول (۳) می توان استنباط نمود که تحلیل در حوزه فرکانس با استفاده از طیف پاسخ شوک، بیشینه پاسخ به دست آمده از تحلیل در حوزه زمان را پوشش می دهد. این نتایج صحت تحلیل انجام شده در حوزه زمان را تایید می نمایند. لازم به ذکر است که مجموع مطلق پاسخ مودها حد بالایی از پاسخ را ارائه می نماید که آن هم بدلیل جمع بیشینه‌ها بدون توجه به علامت و زمان رخ دادن هر یک از مقادیر بیشینه در هر مود می باشد. از نتایج بسیار مهمی که در این تحقیق حاصل گردید می توان به موارد زیر اشاره نمود [۱].

الف. مقادیر حاصل از کاربرد طیف پاسخ شوک در سیستم‌های چند درجه آزادی، نتایج تحلیل پاسخ زمانی را پوشش می دهد که این مطلب صحت گذاری بر تحلیل زمانی انجام شده نیز می باشد. البته لازم به ذکر است که نتایج حاصل از طیف پاسخ شوک توانایی ارائه پاسخ دقیق سیستم را ندارند و بسته به روش مورد استفاده و مسئله مطرح شده امکان نزدیک شدن به پاسخ‌های واقعی در بین آنها متفاوت است. مزیت این روش تجسم سریع اثرات شوک بر روی سیستم فیزیکی و پیش بینی بیشینه

مقادیر پاسخ ممکن، بدون حل معادلات دینامیکی حرکت سیستم است.

ب. اگر یکی از درجات آزادی سیستم چند درجه آزادی در یکی از فرکانس‌های طبیعی آن نسبت به سایر فرکانس‌های طبیعی سیستم دارای سهم حرکتی بیشتر به گونه‌ای باشد که بتوان از سهم پاسخ آن در سایر فرکانس‌های طبیعی صرف نظر کرد، مقدار بیشینه پاسخ آن درجه آزادی سیستم منطبق بر منحنی طیف پاسخ شوک ورودی در فرکانس طبیعی مذکور خواهد بود. بدین ترتیب بدون تحلیل زمانی سیستم به سهولت می توان از طیف پاسخ شوک ورودی بیشینه پاسخ ممکن را به دست آورد.

ج. اگر چه فاصله از منبع شوک در سطح شوک انتقالی به هر زیرسیستم اثر گذار است، ولیکن بواسطه ارتفاع کوتاه نانوماهوره‌ی مورد بررسی و همچنین محل قرارگیری زیرسیستم‌ها، عامل تعیین کننده در بیشینه پاسخ هر یک از زیرسیستم‌های نصب شده بر روی نانوماهوره، تحت پیرو شوک اعمالی به پایه، تابعی از سفتی سازه و همچنین مجموعه‌های نگهدارنده هر زیرسیستم می باشد.

در جمع بندی این تحقیق می توان گفت که نانوماهوره‌ای تحت پیرو شوک ناشی از جدایش، جهت بر آورد میزان شوک انتقالی به زیر سیستم‌های حساس به شوک، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بدین منظور از ابزار تحلیل پاسخ در حوزه زمان و فرکانس استفاده شد. جهت تحلیل در حوزه زمان ابتدا با توجه به فرضیات مدل سازی، نانوماهوره با سیستمی چند درجه آزادی مدل گردید. صحت این مدل سازی با تطابق خواص دینامیکی مدل ایجاد شده

10. Takashi Iwasa, Qinzhong Shi and Mikio Saitoh
11. GPS Receiver
12. PCB
13. Spacer

مراجع

۱. مهدی نجاتی، مدل‌سازی و تحلیل پاسخ دینامیکی یک ماهواره کوچک به تحریک شوک گذرنده از سازه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تابستان ۱۳۸۹.
2. Wayne Tustine, "Random Vibration and Shock Testing Measurement, Analysis and Calibration", Equipment Reliability Institute (2005).
3. Christian, Lalanne, "Mechanical Vibration & Shock Volume 2, Mechanical shock", Hermes Peton Ltd (2002).
4. Peter, Crimi, "Analysis of Structural Shock Transmission", J. Spacecraft, Vol.15, No.2, March-April (1978).
5. Takashi Iwasa, Qinzhong Shi and Mikio Saitoh, Shock Response Spectrum based on Maximum Total Energy of Single Degree of Freedom Model, 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference
16t 7 - 10 April 2008, Schaumburg, IL, AIAA 2008-1742
6. Takashi Iwasa, Qinzhong Shi and Mikio Saitoh, Simplified SRS Prediction Method for Pyroshock Source of V-band Clamp Separation Devices, 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 23 - 26 April 2007, Honolulu, Hawaii, AIAA 2007-2020
7. Cyril M., Harris & Allan G., Piersol, "Harris' Shock and Vibration Handbook", Fifth Edition, McGraw-Hill (2002).
8. Clarence W.de, Silva, "Vibration and Shock Handbook", Taylor & Francis Group (2005).
9. Jacob Job, Wijker, "Spacecraft Structure", Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008).

با مدل جرمی نانوماهواره تایید شد. از آنجایی که جهت تحلیل پاسخ در حوزه زمان نیاز به نمودار شتاب زمان پیروشوگ بود، این نمودار از طیف پاسخ پیروشوگ داده شده استخراج گردید. با در دست داشتن مدل چند درجه آزادی نانوماهواره و تحریک ورودی، پاسخ زیر سیستم‌های حساس به شوک در حوزه زمان به صورت نمودارهای شتاب - زمان استخراج شدند (شکل‌های ۵ تا ۱۰). در ادامه جهت تایید فعالیت انجام شده و نیز تدوین روشی دیگر جهت تخمین بیشینه پاسخ محتمل، از کاربرد طیف پاسخ شوک استفاده گردید. با توجه به روابط مربوطه و ماتریس مودال سیستم مدل شده و بدون نیاز به حل معادلات دینامیک حرکت، بیشینه پاسخ محتمل با سه نوع نگرش مختلف جمع زنی از طیف پاسخ شوک استخراج شدند. در مقایسه پاسخ‌های دو روش همانطور که انتظار می‌رفت بیشینه پاسخ حاصل از تحلیل در حوزه فرکانس، بیشینه پاسخ حاصل از تحلیل در حوزه زمان را پوشش می‌داد (جدول ۳). همانطور که ذکر شد عدم تطبیق جواب‌ها در ماهیت دو روش انجام شده است. باید توجه داشت که روش طیف پاسخ شوک تنها نشان دهنده بیشینه پاسخ محتمل هر زیر سیستم جهت تجسم سریع وضعیت دینامیک سیستم را ارائه می‌کند و در نتیجه قادر به تعیین پاسخ واقعی نمی‌باشد.

پی‌نوشت

1. Acceleration time history
2. SRS (Shock Response Spectrum)
3. Reed
4. M.A. Biot
5. Resonator
6. J.M. Frankland
7. J.P. Walsh and R.E. Blake
8. R.E. Mindlin
9. Peter Crimi

