Download is permitted to HPC-Lab members and for educational purposes only

به نام خدا

عنوان : تحلیل دینامیکی صفحه ها و پوسته ها با رفتار غیر خطی (مادی و هندسی)

توسط :

- مهندس سیروس نصیر ایی - کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران
- مهندس سهیل محمدی - کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران
- دکتر ایرج محمودزاده کنی - عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

خلاصه

این مقاله به بررسی نکات اساسی که در تهیه یک برنامه اجزاء محدود جهت تحلیل دینامیکی صفحات و پوسته ها با رفتار غیر خطی مادی و هندسی بکار رفته است اختصاص دارد. به این منظور ابتدا به بررسی اجمالی مدل اجزاء محدود بکار رفته پرداخته می شود و سپس بطور مبسوط مدل غیر خطی مادی ویسکو - پلاستیک در محیطهای یک بعدی و چند بعدی مورد بررسی قرار می گیرد. در مرحله بعد، روش صریح تحلیل دینامیکی سیستمهای غیر خطی تشریح می گردد. سپس الگوریتم بکار رفته در نرم افزار NDAPS با توجه به نکات فوق تشریح می گردد و صحت عملکرد برنامه با توجه به تحلیل چندین مسئله نمونه کنترل می گردد. در نهایت نتایج کاربرد عملی برنامه در تحلیل پوسته حفاظ داخلی یک نیروگاه هسته ای تشریح می گردد.

۱- مقدمه

صفحه ها و پوسته ها، امروزه به عنوان اجزاء اصلی در سازه های مدرن، قابلیتهای خود در انسبت به انواع دیگر سازه ها نشان داده اند. شاید تنها پیچیدگی که در تحلیل این سازه ها وجود دارد، ما را از استفاده از آنها منع کند. تحلیل دینامیکی صفحه ها و پوسته ها نیز مانند هر سازه دیگری می تواند با روش تحلیل مدال صورت پذیرد. اما این روش تا قدرتمندی که رفتار صفحه یا پوسته غیر خطی باشد، عملا کارائی خود

را از دست می‌دهد . این رفتار غیر خطی می‌تواند ناشی از تغییر شکلهای غیر ارتجاعی مصالح (مادی) و یا تغییر مکانهای بزرگ (هندسی) باشد و در هر حال این تغییر اتدر خواص سختی سازه در حین پاسخ به بار دینامیکی، باعث می‌گردد تا سازه فاقد شکل مدهای مشخصی باشد که بتوان تغییر شکل سازه را در هر لحظه بر اساس آنها بدست آورد .

همچنین، حتی برای سازه‌های بارفتار خطی، بعضی حالات بارگذاری (نظیر ضربه های کوتاه مدت یا بر خوردها) باعث می‌شوند که روش تحلیل مدال کاربرد موثر خود را از دست بدهد . در چنین مواردی، تنها روش موثر، روش انتگرال گیری مستقیم خواهد بود .

این مقاله، بطور خلاصه به بررسی روشهای تحلیلی و عددی بکار گرفته شده در نرم افزار تحلیل دینامیکی صفحات و پوسته ها با رفتار غیر خطی (NDAPS) می‌پردازد . این برنامه بطور وسیع در تحلیل دینامیکی پوسته ها با رفتار ویسکوپلاستیک و مقاطع مرکب قابل کاربرد است .

۲- مدل اجزاء محدود

المان پوسته تبدیل یافته

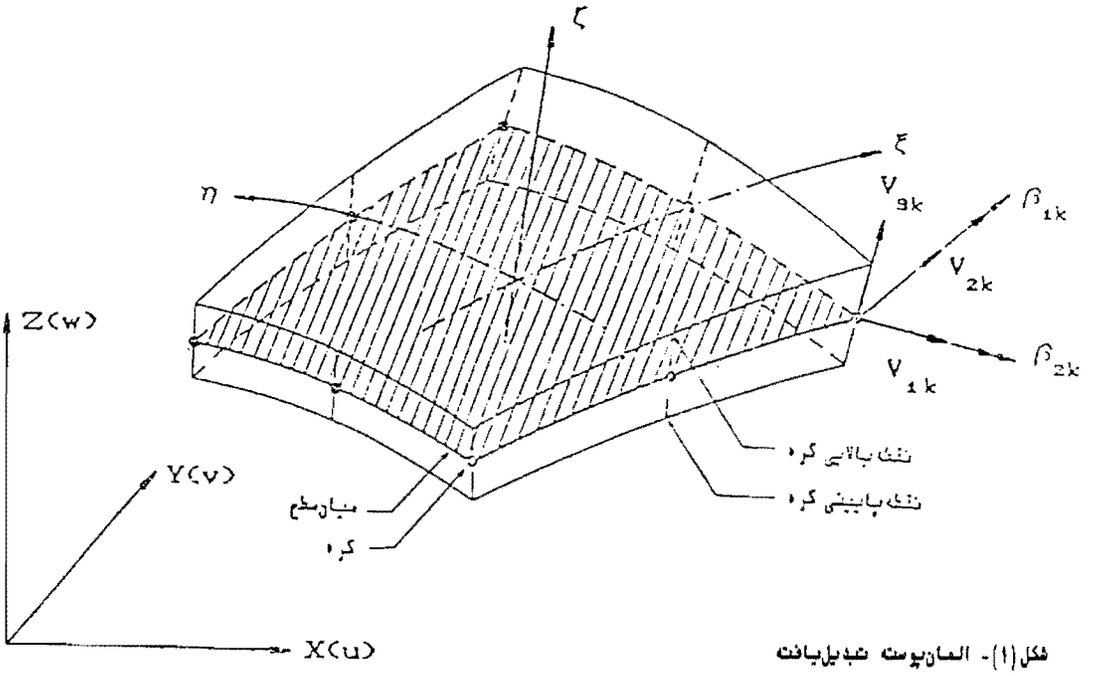
المان بکار رفته در مدل سازی اجزاء محدود پوسته ، المان پوسته تبدیل یافته (Degenerated Shell Element) می‌باشد که از تبدیل المان سه بعدی بدست آمده است . این المان در هر گره دارای ۳ درجه آزادی انتقالی و ۲ درجه آزادی چرخشی خط عمود در گره است . تعریف مستقل درجات آزادی مربوط به تغییر مکان و چرخش باعث می‌گردد که تغییر شکلهای برشی عمود بر پوسته نیز در محاسبات وارد شود . انواع المانهای ۸ و ۹ گرهی در تحلیلها بکار رفته اند .

مولفه های تنش وارد بر این المان، مطابق شکل (۲) ، تعریف می‌شوند .

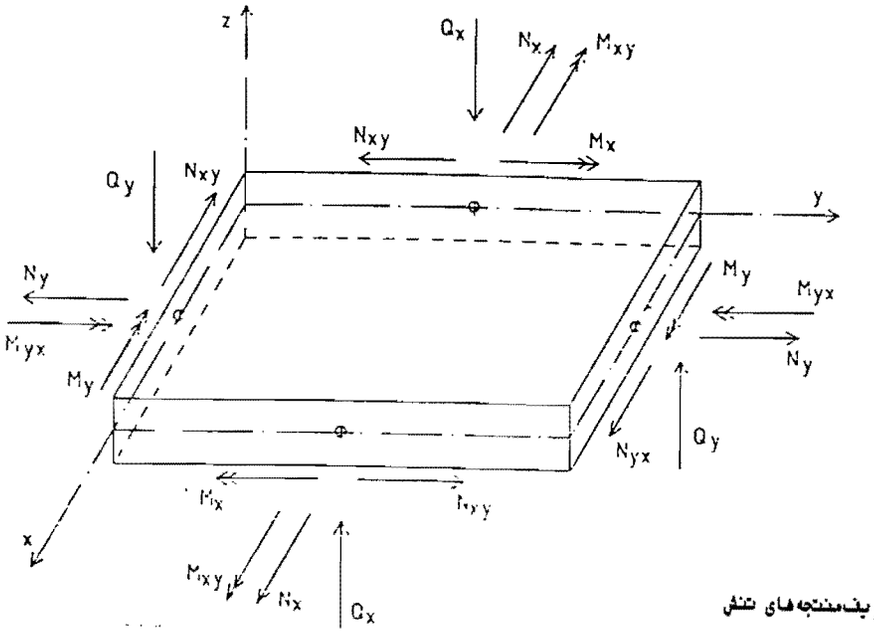
مدل لایه ای

محاسبه ماتریس های خصوصیات سازه ، نظیر ماتریسهای جرم، میرائی و سختی و بردارهای نیرو های مقاوم گرهی و بارهای گرهی، به محاسبه انتگرالهایی منجر می‌شود که عملا فقط با استفاده از روشهای عددی قادر به حل آن می‌باشیم .

روش عمومی در تئوری اجزاء محدود ، استفاده از روش انتگرال گیری گوس می‌باشد . در این روش ، عبارت مورد نظر در چندین نقطه گوس محاسبه شده و با استفاده از یک



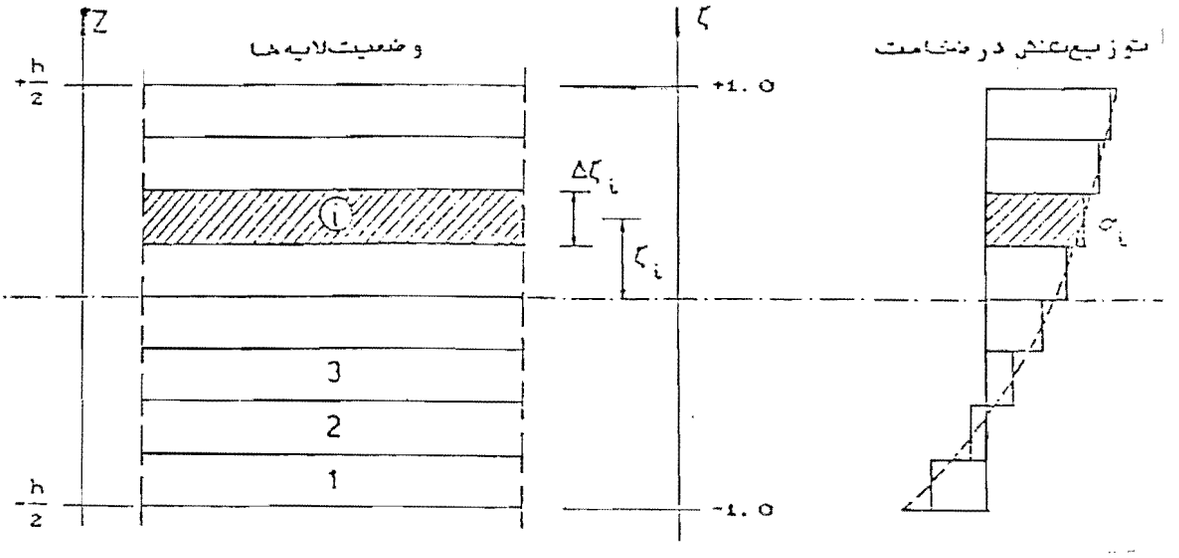
شکل(۱)- المان پوسته تبدیل‌یافته



شکل(۲)- تعریف منتجه‌های تنش

جمع وزنی، مقدار انتگرال محاسبه می‌شود. برای المان پوسته تبدیل‌یافته، در صفحه پوسته، سه نقطه گوس در هر جهت کافی است. در جهت ضخامت پوسته نیز چنانچه رفتار مصالح بصورت خطی باشد، دو نقطه گوس کفایت می‌کند. اما برای مصالح غیر خطی، دقیقا مشخص نیست که چند نقطه گوس در جهت ضخامت لازم است. در این حالت، یک روش ساده و مناسب بکار گرفته شده است که مدل لایه ای نامیده می‌شود و در واقع یک

روش انتگرال گیری ذوزنقه ای می‌باشد .در این مدل فرض می‌شود که پوسته در جهت ضخامت از چند لایه تشکیل شده است .نقاط نمونه گیری هر لایه در میان سطح آن واقع هستند و مولفه های تنش در هر لایه در این نقطه ها محاسبه می‌شوند و فرض می‌شود که در ضخامت هر لایه این تنش ها ثابت هستند .چنین توزیع تنشی در شکل (۳) دیده می‌شود .



شکل (۳)- مدل لایه ای و توزیع تنش در آن

در این روش ،محاسبه انتگرال ها ،روی میان سطح هر لایه انجام و نتایج لایه های مختلف با هم جمع می‌گردند .باید توجه داشت که در این روش ،حتی برای مصالح خطی نیز باید تعداد لایه ها را بیشتر از ۲ انتخاب کنیم .

پس از بدست آمدن تنشها در نقاط گوس ،می‌توان منتجه این تنشها را با انتگرال-گیری در جهت ضخامت پوسته به روش زیر محاسبه نمود :

الف)مولفه های غشایی

$$N_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x \, dz = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^{n} \sigma_{xi} \, \Delta\zeta_i \qquad (۱)$$

و به همین ترتیب در مورد مولفه های N_y و N_{xy} عمل می‌شود .

ب)مولفه های خمشی

$$M_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x \, z \, dz = -\frac{h^2}{4} \sum_{i=1}^{n} \sigma_{xi} \, \zeta_i \, \Delta\zeta_i \qquad (۲)$$

و به همین ترتیب مولفه های M_y و M_{xy} محاسبه می‌شوند .

ج) مولفه های برشی

$$Q_{xz} = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{xz}\, dz = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^{n} \tau_{xzi}\, \Delta\zeta_i \qquad (۳)$$

مولفه Q_{yz} نیز به همین روش بدست می آید .

۳- مدل غیر خطی مادی

مدل مادی استفاده شده ، مدل ویسکوپلاستیک است که امکان مدل سازی اثر اتو ابسته به زمان را در فرآیند تغییر شکل پلاستیک میسر می سازد . بنابراین ، پس از جاری شدن اولیه ، جریان پلاستیک و تنشها و کرنشها وابسته به زمان خواهند بود . به این ترتیب در کلیه تغییر شکلهای غیر الاستیک ، اثر اتزمانی همیشه ولی با درجه های مختلفی از اهمیت وجود دارند . در این بخش ، ضمن بیان مفاهیم اساسی تئوری ویسکوپلاستیک در حالت یک بعدی ، توسعه آن در یک محیط پیوسته تشریح خواهد شد .

تئوری ویسکوپلاستیک در محیطهای یک بعدی

در مسائل یک بعدی ، رفتار ویسکوپلاستیک با معرفی مدل یک بعدی تغییر شکل پذیر در شکل (۴) بخوبی روشن می گردد . بخش رویهم لغزنده تنها هنگامی که $\sigma > Y$ باشد فعال شده و تنش σ_p را تحمل می نماید . منظور از σ کل تنش وارده و Y یک مقدار حدی برای جاری شدن می باشد . تنش باقیمانده یعنی $\sigma_d = \sigma - \sigma_p$ توسط بخش چسبنده (Viscous) تحمل می گردد . پاسخ آنی الاستیک نیز توسط فنر خطی موجود مدل می شود . وجود بخش چسبنده باعث می گردد تا مقدار تنش که بطور ناگهانی از مقدار تعیین شده توسط تئوری پلاستیسیته تجاوز نموده است ، در شرایط حالت یکنواخت ، به این سطح تعادل برسد .

کرنش کل در این مدل از جمع کرنشهای الاستیک و ویسکوپلاستیک بدست می آید :

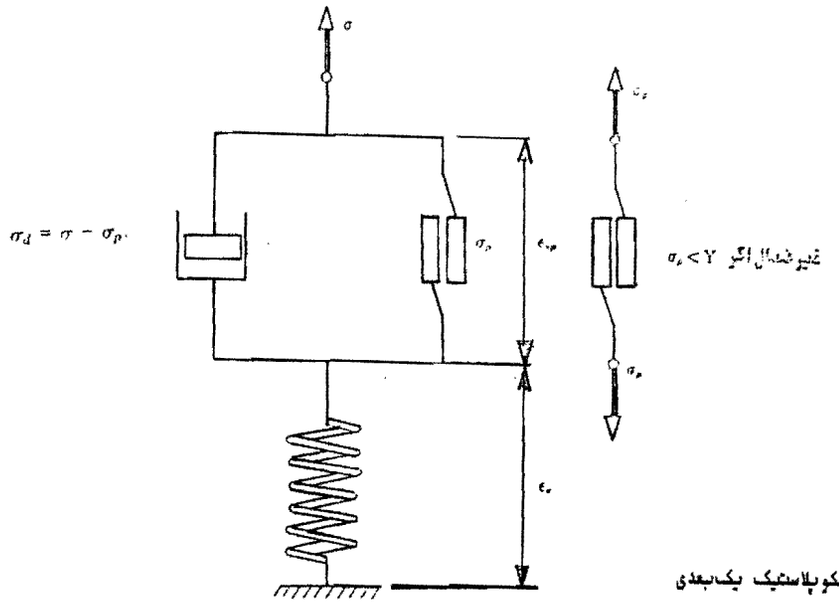
$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{vp} \qquad (۴)$$

تنش در فنر خطی معادل کل تنش اعمال شده بوده و توسط رابطه زیر به کرنش الاستیک مربوط می گردد :

$$\sigma_e = \sigma = E\, \varepsilon_e \qquad (۵)$$

که در آن ، E مدول الاستیک فنر خطی می باشد .

با فرض حالت سخت شدگی خطی ، میزان تنش برای جاری شدن ویسکوپلاستیک در هر وضعیت توسط رابطه (۶) محاسبه می شود .



شکل(۴)- مدل الاستوویسکوپلاستیک یک‌بعدی

$$Y = \sigma_Y + H'\varepsilon_{vp} \qquad (۶)$$

که H' شیب بخش سخت‌شدگی منحنی تنش - کرنش است. از این‌رو، تنش در جزء اصطکاکی لغزنده برابر زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \sigma < Y \qquad & \sigma_p = \sigma \\ \sigma > Y \qquad & \sigma_p = Y \end{aligned} \qquad (۷)$$

تنش در جزء چسبنده یعنی σ_d بار ابطه زیر به تنش ویسکوپلاستیک مربوط می‌گردد:

$$\sigma_d = \mu \frac{d\varepsilon_{vp}}{dt} \qquad (۸)$$

در این رابطه μ ضریب لزجت و t نمایانگر زمان است و می‌دانیم:

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_p \qquad (۹)$$

در حالت الاستیک $\varepsilon_{vp}=0$ صفر است و داریم:

$$\sigma = E\,\varepsilon \qquad (۱۰)$$

پس از جاری‌شدن، با جایگزینی روابط (۷) و (۸) در رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$\sigma_Y + H'\varepsilon_{vp} + \mu \frac{d\varepsilon_{vp}}{dt} = \sigma \qquad (۱۱)$$

$$H'E\,\varepsilon + \mu E \frac{d\varepsilon}{dt} = H'\sigma + E(\sigma - \sigma_Y) + \mu \frac{d\sigma}{dt} \qquad (۱۲)$$

تئوری الاستو ویسکوپلاستیک در محیطهای پیوسته

مطابق معمول مسائل غیر خطی، کرنش کل به دو قسمت الاستیک و ویسکو پلاستیک تفکیک می‌گردد :

$$[\dot{\varepsilon}] = [\dot{\varepsilon}_e] + [\dot{\varepsilon}_{vp}] \qquad (۱۳)$$

تغییرات تنش کل به تغییرات کرنش الاستیک وابسته است :

$$[\dot{\sigma}] = [D]\,[\dot{\varepsilon}_e] \qquad (۱۴)$$

که $[D]$ ماتریس الاستیسیته است. بنابراین رفتار ویسکو پلاستیک بار ابطه غیر برداری زیر کنترل می‌گردد :

$$F\left([\sigma], [\varepsilon_{vp}]\right) - F_o = 0 \qquad (۱۵)$$

که F_o تنش جاری شدن یک محوری است که خود تابعی از پارامتر سخت شدگی می‌باشد و F تنش موثر است. فرض می‌شود که جریان ویسکو پلاستیک فقط برای مقادیر $F > F_o$ رخ می‌دهد. در ساده‌ترین حالت فرض می‌کنیم که سرعت کرنش ویسکو پلاستیک فقط به وضعیت تنش بستگی داشته باشد :

$$[\dot{\varepsilon}_{vp}] = f\left([\sigma]\right) \qquad (۱۶)$$

با انجام یک سری عملیات جایگزینی، نهایتا مقدار افزایش کرنش ویسکو پلاستیک در یک فاصله زمانی Δt_n بدست می‌آید :

$$[\Delta\varepsilon_{vp}] = \Delta t_n \left\{ (1-\theta)\,[\dot{\varepsilon}_{vp}]_n + \theta\,[\dot{\varepsilon}_{vp}]_{n+1} \right\} \qquad (۱۷)$$

جوابر ابطه فوق بر اساس انتخاب مقادیر θ به روشهای مختلف منجر می‌شود :

ا) در حالت $\theta=0$ روش کاملا صریح است و مقدار افزایش کرنش کاملا بر اساس شرایط موجود در زمان t_n بدست می‌آید .

ب) در حالت $\theta=1$ روش کاملا ضمنی است و مقدار افزایش کرنش بر اساس سرعت کرنش در انتهای گام زمانی معین می‌گردد .

ج) در حالت $\theta = \frac{1}{2}$ روش به نام ضمنی ذوزنقه ای نامیده می‌شود .

انتخاب اندازه گام زمانی

مطالعات تئوریک نشان داده است که جهت پایداری روش حل عددی معادلات رفتار ماده، لازم است شرایط زیر بر ای گام زمانی بحرانی مد نظر قرار گیرند :

$$\Delta t \le \frac{(1+\nu)F_o}{\gamma E} \qquad \text{معیار تسلیم ترسکا} \qquad (۱۸)$$

$$\Delta t \le \frac{4(1+\nu)F_o}{3\gamma E_v} \qquad \text{معیار تسلیم وان میزز} \qquad (۱۹)$$

که γ بار امتر سیالیت و F_0 تنش جاری شدن یک محوری است .

۴- روش تحلیل دینامیکی

روش انتگرال گیری زمانی صریح

باید توجه داشت که در مورد سیستمهای غیر خطی، روش ترکیب مدها کاربرد ندارد و باید از روشهای انتگرال گیری گام به گام زمانی استفاده نمود . روش بکار رفته شده در اینجا، روش انتگرال زمانی صریح می باشد .

معادله تعادل سیستم در زمان t_n به شکل زیر بیان می شود :

$$[M][\ddot{d}]_n + [C][\dot{d}]_n + [P]_n = [f]_n \qquad (۲۰)$$

که $[P]_n$ بردار نیروهای مقاوم داخلی و $[f]_n$ بردار نیروهای گرهی معادل با بارهای جسمی و سطحی می باشد . $[\ddot{d}]_n$, $[\dot{d}]_n$ نیز بترتیب بردار شتاب و سرعت گرهی هستند .

با استفاده از تقریب تفاوتهای مرکزی بر ای دو بردار $[\ddot{d}]_n$, $[\dot{d}]_n$ ، و مرتب کردن رابطه (۲۰) بر ای تغییر مکان در زمان t_{n+1} داریم :

$$[d]_{n+1} = \left\{[M]+\frac{\Delta t}{2}[C]\right\}^{-1} * \left\{(\Delta t)^2(-[P]_n+[f]_n)+2[M][d]_n-([M]-\frac{\Delta t}{2}[C])[d]_{n-1}\right\} \qquad (۲۱)$$

با فرض قطری بودن ماتریسهای جرم ، حل معادله فوق بسیار آسان خواهد بود . مثلا بر ای درجه آزادی i داریم :

$$(d)_{n+1} = (m_{ii}+\frac{\Delta t}{2}\, c_{ii})^{-1} * \left\{(\Delta t)^2(-(P_i)_n+(f_i)_n)+2m_{ii}(d_i)_n-(m_{ii}-\frac{\Delta t}{2}\, c_{ii})(d_i)_{n-1}\right\} \qquad (۲۲)$$

گام زمانی بحرانی

در روشهای انتگرال گیری زمانی، بر ای حصول به جوابهای پایدار و دقیق به گام زمانی کوتاه نیاز داریم که سبب بالا رفتن هزینه محاسبات می گردد . گام زمانی بحرانی در روش انتگرال گیری صریح بر ابر است با :

$$\Delta t \le \frac{2}{\omega_{max}} \qquad (۲۳)$$

که ω_{max} بزرگترین فرکانس دورانی شبکه اجزاء محدود است . در صورتیکه ω_{max} نشانگر حد اکثر فرکانس زاویه ای غیر خطی باشد ، از این رابطه بر ای مسائل غیر خطی نیز می توان استفاده کرد .

در عمل بر ای المانهای ۸ گرهی ایزوپار امتریک ، بر اساس این قضیه که بزرگترین

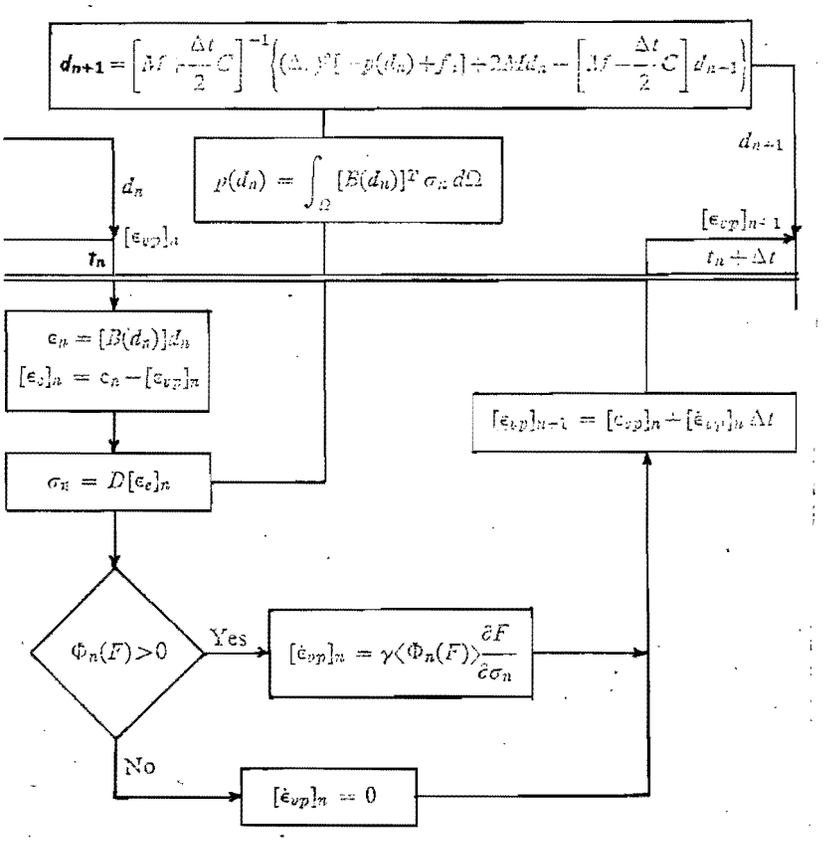
مقدار رویه سیستم همواره کمتر از بزرگترین مقدار رویه المانهای منفرد است ، روابط تقریبی محاسبه گام زمانی به شرح زیر بدست آمده است :

$$\Delta t = \gamma \frac{L_a}{a} \left\{ \frac{\rho(1-\nu^2)/E}{2+0.83(1-\nu)[1+1.5(L_a/h)^2]} \right\} \qquad (۲۴)$$

که در آن L_a کوچکترین فاصله میان گره های همسایه در هر المان و γ یک ضریب تصحیح کمتر از یک (حدود 0.7) می باشد .

۵- برنامه NDAPS

با توجه به مشخصات کلی ارائه شده در بخشهای قبل ، برنامه کامپیوتری NDAPS جهت تحلیل دینامیکی صفحه ها و پوسته ها با رفتار الاستو ویسکو پلاستیک تهیه شده



شکل (۵)- الگوریتم روش صریح در NDAPS

است .روش بکار گرفته شده در این برنامه کاملا صریح است .به این معنی که در دو مرحله برنامه که انتگرال زمانی گرفته می‌شود از روش صریح استفاده شده است . این الگوریتم در شکل (۵) برای یک گام زمانی رسم شده است .

قابلیتهای برنامه NDAPS

۱- تحلیل صفحه ها و پوسته های نازک و ضخیم با شکل هندسی دلخواه و ضخامت متغیر

۲- استفاده از مدل لایه ای، امکان مدلسازی مصالح مختلف و با ضخامت های متفاوت در ضخامت پوسته فراهم می آورد .

۳- تحلیل پوسته های ارتوتروپ

۴- رفتار غیر خطی مادی و پلاستیک و رفتار غیر خطی هندسی تغییر شکلهای بزرگ در برنامه پیش بینی شده است .

۵- انواع روشهای انتگرال گیری عادی، انتخابی و کاهش یافته امکان پذیر است .

۶- انواع بارگذاریهای شتاب جاذبه ،بارگسترده یکنواخت و غیر یکنواخت ، فشار هیدروستاتیک

۷- پذیرش تاریخچه بار و شتاب نگار تحریک تکیه گاه

۸- کنترل کامل برخروجی جهت ثبت تاریخچه باز تاب یک یا چند مولفه خاص از تغییر مکان یا تنش

۹- روش سریع حل مسائل خطی که بوسیله پیش بینی انتگرال گیری گوس در ضخامت پوسته انجام می‌شود .

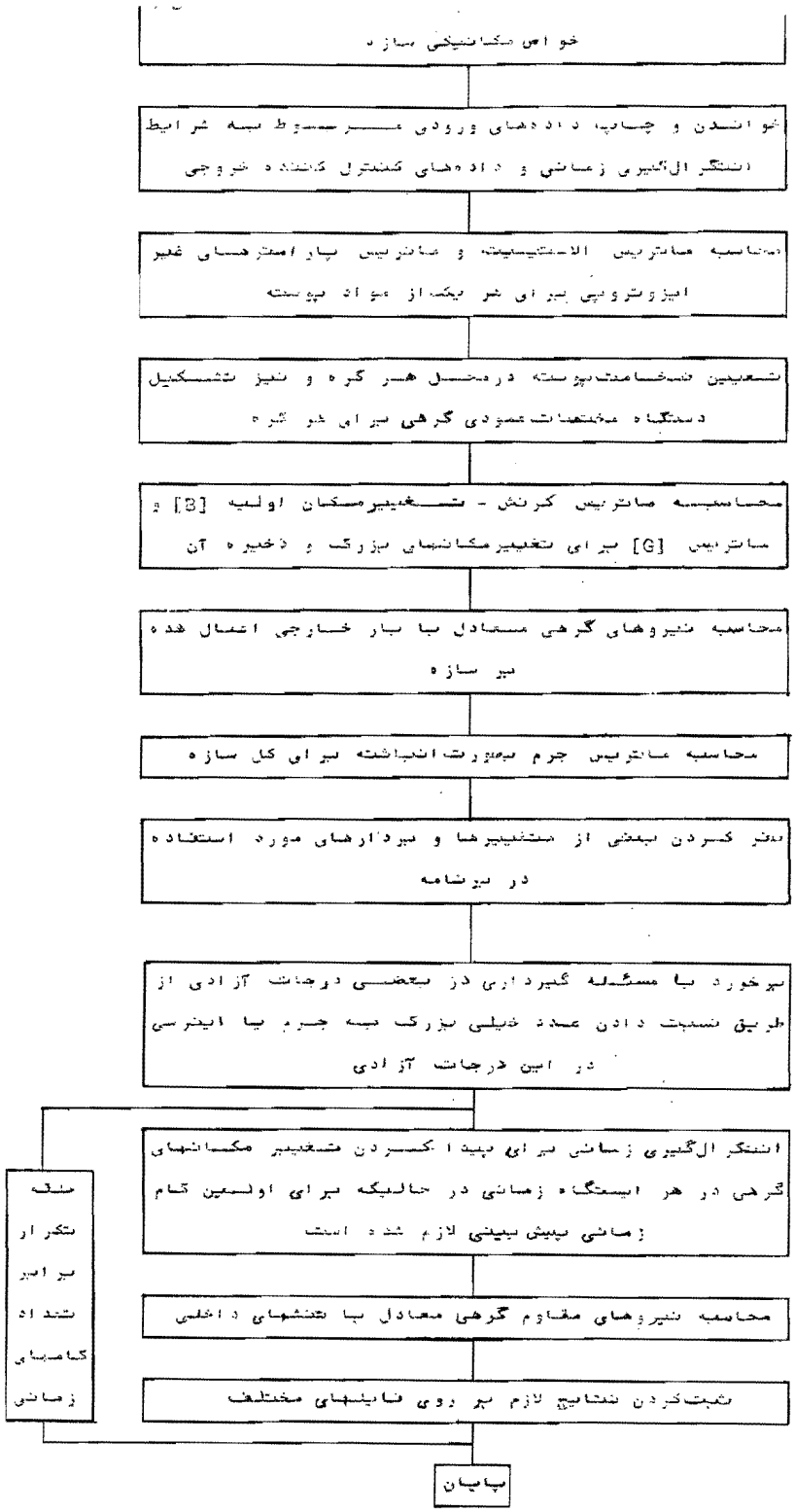
نمود ارجریان برنامه ،بصورت کلی مطابق شکل (۶) می باشد .

۶- بررسی مسائل نمونه

پس از تهیه برنامه NDAPS ، این برنامه توسط چندین مسئله نمونه در حالتهای متنوع کنترل شده و سپس در تحلیل مسائل عملی بکار گرفته شده است .

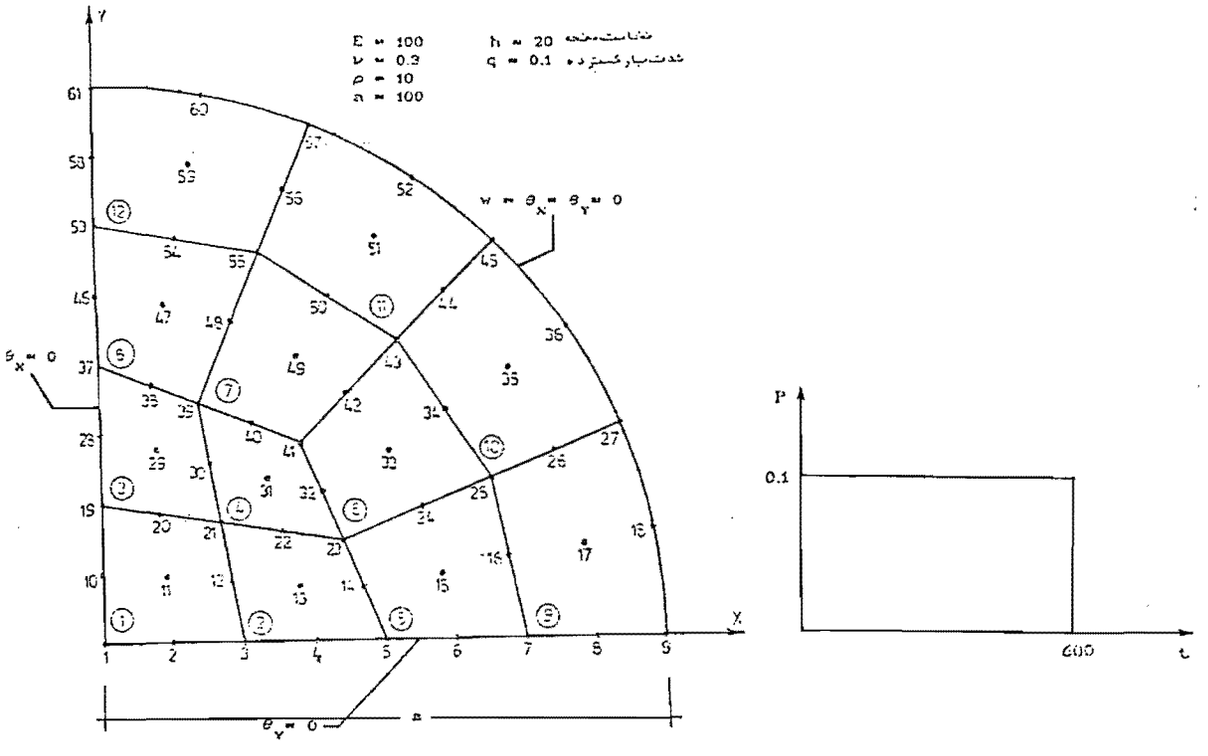
صفحه دایره ای تحت بار گسترده

در شکل (۷) ،هندسه و مدل اجزاء محدود یک صفحه دایره ای الاستیک خطی دیده می‌شود .صفحه تحت تاثیر بار گسترده یکنواخت قرار دارد که منحنی بارگذاری آن

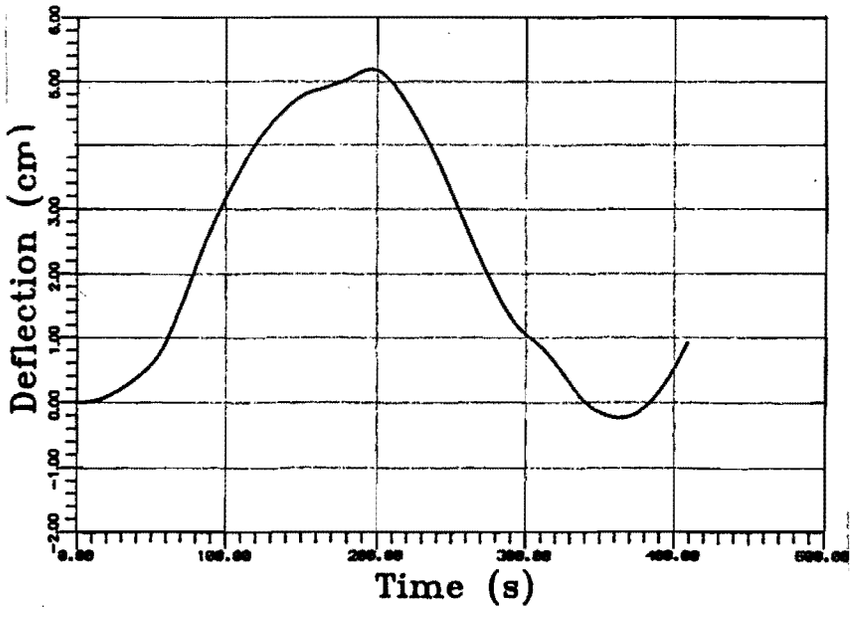


شکل(۶)- الگوریتم برنامه NDAPS

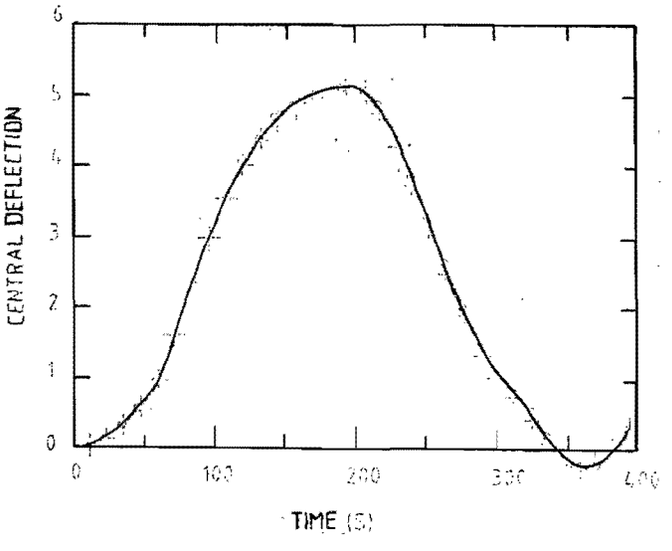
نسبت به زمان در شکل (۷) ارائه شده است. در شکل (۸) پاسخ تغییر مکان در وسط صفحه ملاحظه می‌شود که قابل مقایسه با نتایج مرجع [۲] در شکل (۹) می‌باشد.



شکل (۷)- صفحه دایره‌ای تحت بار گسترده یکنواخت متحرک



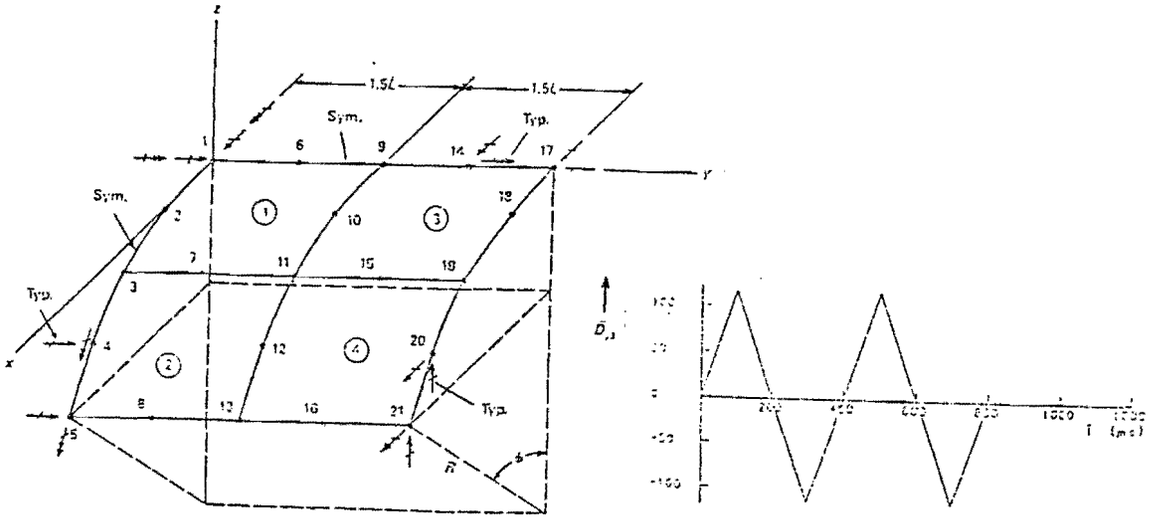
شکل (۸)- نتایج پاسخ تغییر مکان در وسط صفحه



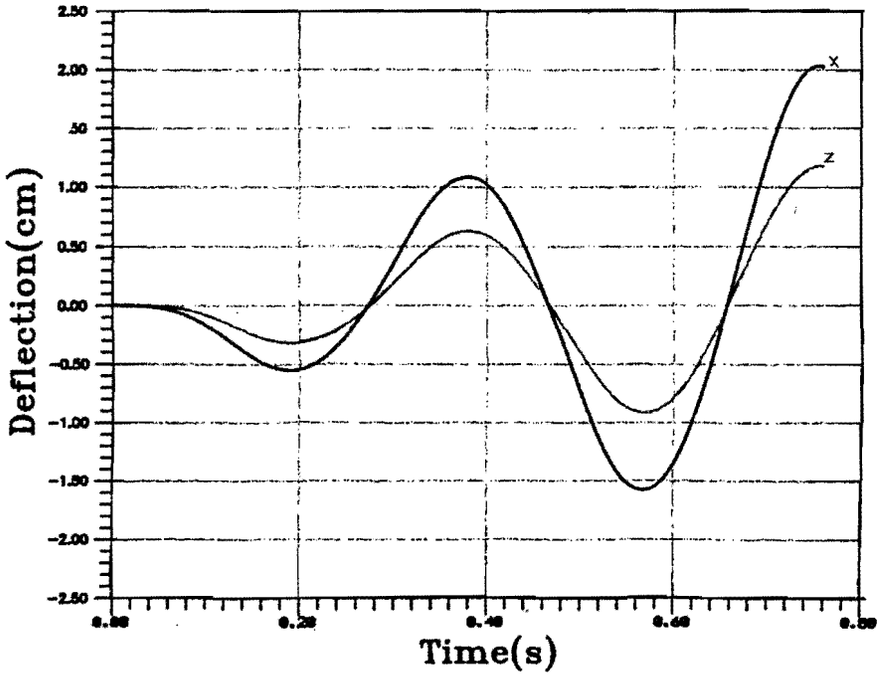
شکل (۹)- نتایج پاسخ تغییر مکان در وسط صفحه مطابق مرجع [۲]

سقف استوانه ای تحت شتاب زلزله

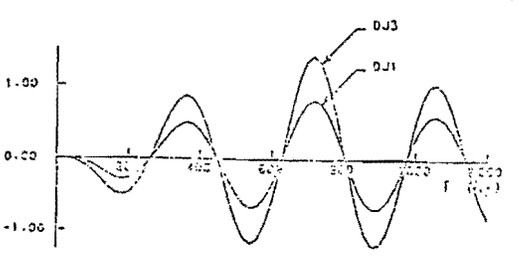
این مسئله ،جهت کنترل صحت عملکرد برنامه در مواردشتاب تحریک است .مدل هندسی و اجزاء محدود دو منحنی شتاب تحریک زلزله در شکل (۱۰) دیده می شود .پاسخ تغییر مکان یکی از گره های پوسته که توسط برنامه تهیه شده است در شکل (۱۱) و نتایج مرجع [۳] در همین مورد در شکل (۱۲) ارائه شده اند .



شکل (۱۰)- سقف استوانه ای و منحنی شتاب پایه



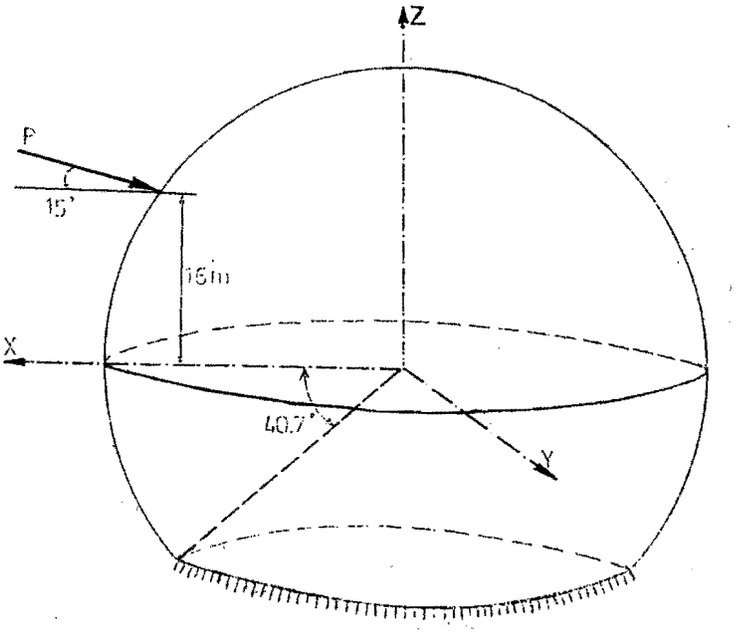
شکل (۱۱)- بازتاب تغییر مکان گره ۵ در دو جهت X , Z با برنامه NDAPS

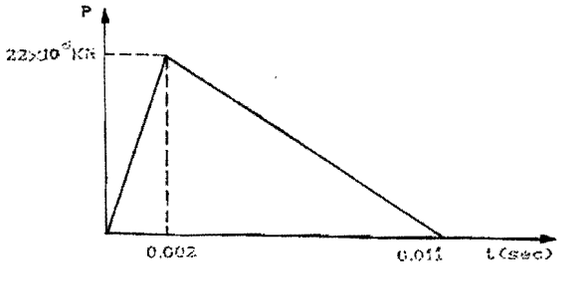


شکل (۱۲)- منحنی پاسخ تغییر مکان گره ۵
در دو درجه آزادی ۱ و ۳ طبق مرجع [۳]

پوسته کروی تحت ضربه متمرکز

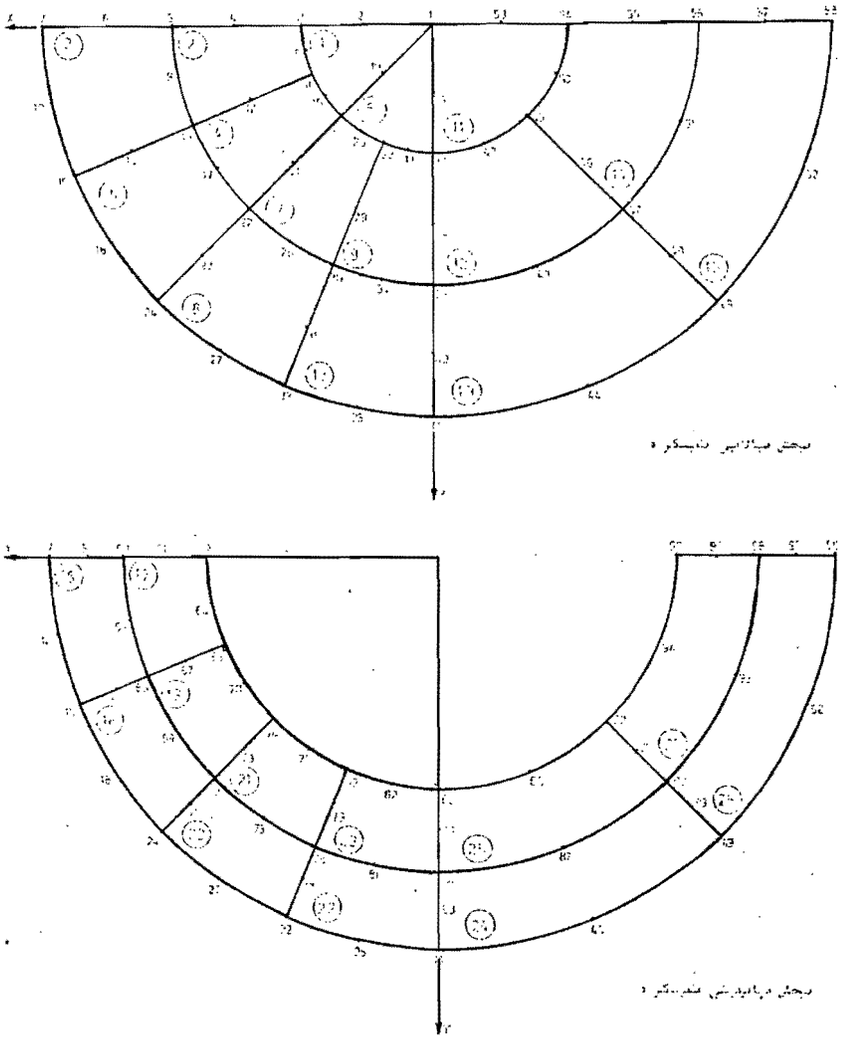
در شکل (۱۳) یک پوسته کروی ملاحظه می‌گردد. این پوسته حفاظ داخلی یک نیروگاه هسته ای است، که کلیه قسمتهای حساس نیروگاه داخل آن قرار می‌گیرد. قسمت پایینی آن در بتن مدفون شده است، قطر کره ۵۶ متر و ضخامت آن ۳۰/۵ میلیمتر است. جنس پوسته از نوعی فولاد است که ضریب ارتجاعی و ضریب پواسن آن بترتیب ۲۰۱۸۵۰ و ۰/۳ است. وزن مخصوص آن نیز ۸ تن بر متر مکعب است. فرض می‌کنیم که یک بمب ۲۰۰۰ پوندی مطابق شکل در نقطه مشخص شده با پوسته برخورد کند. چنین برخوردی دارای دو اثر پی در پی و متفاوت، شامل ضربه اولیه و سپس ورود بمب به داخل پوسته و انفجار آن می‌باشد. در اینجا فقط اثر اول را بررسی می‌کنیم. در حالت کلی باید موج انفجار را نیز که بصورت یک فشار داخلی بر پوسته وارد می‌شود، به عنوان بارگذاری بر ای یک تحلیل دینامیکی در نظر گرفت.



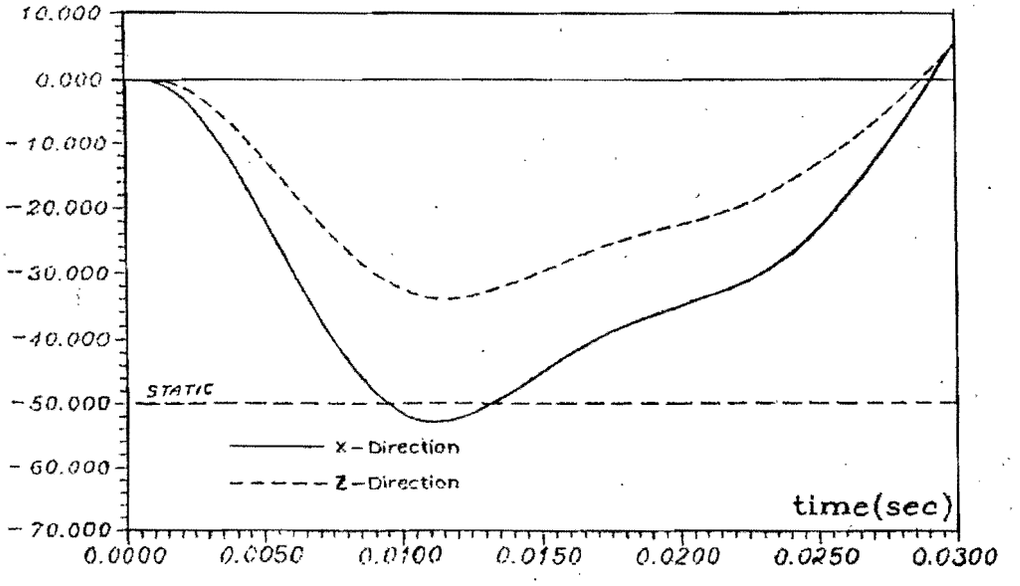


شکل (۱۳)- هندسه پوسته کروی و منحنی بارگذاری ضربه ای متمرکز

پاسخ تغییر مکان افقی و قائم نقطه اثر بار، توسط این برنامه در شکل (۱۵) دیده می‌شود :



شکل (۱۴)- مدل اجزا محدود پوسته کروی



شکل (۱۵)- پاسخ تغییر مکان افقی و قائم نقطه اثر بار توسط برنامه NDAPS