

ارزیابی پاسخ دینامیکی پوشش تونلهای دایروی به عبور امواج تخت

مرتضی اسماعیلی

دانشجوی دکترای گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

شهرام وهدانی

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

اسدالله نورزاد

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۳/۱/۲۹، تاریخ تصویب ۸۳/۱۰/۵)

چکیده

در این مقاله روش ترکیبی جدیدی در فضای فرکانسی که در آن از روشهای المان مرزی و المان محدود به ترتیب برای مدلسازی توده اطراف تونل و پوشش آن استفاده شده است، معرفی میگردد. استفاده از توابع شکلی مثلثاتی برای مدل سازی پوشش با توجه به محدودیت روش به شکل دایره ای تونل، باعث کاهش زیاد حجم محاسباتی موضوع اندرکنش پوشش و توده اطراف بر اثر عبور موج شده است، در حالیکه تطبیق نتایج با تغییر شکل های واقعی همخوانی خوبی را نشان می دهد. حدود اعتبار روش از طریق مطالعه پارامتریک انجام شده روی مشخصات مقاومتی حلقه، محیط اطراف و فرکانس موج عبوری مشخص شده است. نتایج شامل بررسی تغییرات تنش های حلقوی و برشی در پیرامون تونل، نیروهای داخلی پوشش و ضرائب تشدید دینامیکی آنها می باشد.

واژه های کلیدی: المان حلقه، اندرکنش پوشش تونل با محیط، اثر زلزله روی پوشش تونل

مقدمه

پدیده های فوق نمی باشند. اولین کارهای انجام شده در زمینه تحلیل دینامیکی فضاهای زیر زمینی به دهه ۶۰ برمی گردد که در آنها رفتار دینامیکی پناهگاههای هسته ای زیرزمینی بررسی شده است [۱-۳]. در همان سالها تلاش قابل توجهی برای تحلیل دینامیکی بویژه تحلیل لرزه ای تونلها و خطوط لوله توسط کیوسل [۴]، نیومارک [۵]، اوکوموتو و تامورا [۶] صورت گرفته است.

بطور کلی روشهای موجود در تحلیل دینامیکی سازه های زیرزمینی با فرض محیط پیوسته را می توان بصورت زیر تقسیم بندی نمود:

- روش شبه استاتیک بدون منظور کردن اندرکنش خاک- سازه: این روش بطور محافظه کارانه ای سازه را انعطاف پذیر فرض می کند بطوریکه کاملا از حرکت محیط اطراف تبعیت می کند [۴، ۷، ۸].

- روش شبه استاتیک با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه: در این روش سازه مانند تیر متکی بر بستر ارتجاعی در نظر گرفته می شود و بر خلاف روش اول

فضاهای زیر زمینی با کاربردهای گوناگون نقش بسیار حیاتی را در زندگی امروزه بشر ایفاء می کنند. بحث طراحی این سازه ها در برابر بارهای دینامیکی و بطور عمده اثر زلزله از پیچیدگی خاصی برخوردار است. این سازه ها بر خلاف سازه های روزمینی به محیط اطراف خود متکی بوده و رفتار آنها بیش از آنکه به شتاب حساس باشد، تابع تغییر شکل ناشی از عبور امواج از توده اطراف آنها می باشد. تغییر شکل فوق نیز به جای خود وابسته به پارامترهائی نظیر بزرگی مقطع حفاری، مشخصات مقاومتی پوشش و مشخصات موج عبوری، نزدیک به جایجائی ناشی از حرکت آزاد امواج در محیط بوده و یا در اثر پدیده هایی نظیر تفرق و شکست امواج در اطراف محل حفاری و وارد شدن اثر سختی پوشش شکل متفاوتی به خود می گیرد.

بررسی ادبیات فنی موجود در این زمینه نشان می دهد که تا کنون روشهای متفاوتی برای بررسی تاثیر زلزله روی پوشش تونلها معرفی شده اند، که از ساده سازی های خاص خود استفاده نموده و لزوما دربر گیرنده تمام

این توابع شکلی را در تغییر شکل نهائی پوشش مشخص می کنند. علت استفاده از این نوع توابع شکلی، همخوانی آنها با تغییر شکل مقطع حفاری شده دایروی در اثر تفرق امواج تخت P و SV می باشد. در ادامه از روش المان مرزی برای مدلسازی محیط اطراف به علت ارضای خودبخودی شرط تشعشع (که ارضاء این شرط در روش اجزاء محدود معمولاً با مشکلاتی رو بروست)، استفاده شده است. ترکیب دو روش در مرز مقطع حفاری شده با ارضاء شرط سازگاری تغییر مکان، ابزار اصلی تحلیل دینامیکی را در محدوده فرکانسی فراهم نموده است. در نهایت با انجام مطالعه پارامتریک روی مشخصات مقاومتی حلقه و محیط در فرکانسهای مختلف، توانائی های روش پیشنهادی نشان داده شده است.

پاسخ اساسی معادلات انتشار امواج تخت در محیط الاستیک

معادلات انتشار امواج تخت الاستیک یا به عبارتی معادلات ناویه برای محیط Ω با مرز Γ به صورت زیر نوشته می شوند [۲۸]:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

در این رابطه λ و μ ثابتهای لامه می باشند و ρ نیز وزن مخصوص محیط است. گرچه حل این دستگاه معادلات در محدوده زمان از نظر کاربردی نتایج بسیار ملموسی در بردارد اما معمولاً حل در حوزه فرکانسی ساده ترمی باشد. این کار معمولاً با استفاده از تبدیلات انتگرالی لاپلاس یا فوریه انجام میشود. اگر سرعت امواج فشاری و برشی بترتیب برابر c_1 و c_2 فرض شود معادله (۱) در حوزه فرکانسی بصورت زیر باز نویسی می شود:

$$(c_1^2 - c_2^2) u_{j,ji} + c_2^2 u_{i,jj} + b_i + \omega^2 u_i = 0 \quad (2)$$

اگر محیط Ω دارای مرزهای Γ_1 و Γ_2 باشد شرایط اولیه و مرزی برای معادله فوق عبارت است از:
شرایط اولیه:

$$u_i(x, t = 0) = 0 \quad \text{For } \Omega \text{ domain}$$

$$u_i(x, t = 0) = 0 \quad (3)$$

قابلیت مدلسازی رفتار سازه سخت در محیط نرم را نیز دار است [۹-۱۱].

- آنالیز دینامیکی با استفاده از سیستم جرم متمرکز، فنر، میراگر برای مدل کردن خاک و سیستمهای پیوسته یا مجزا برای مدل کردن سازه [۱۴-۱۶].

- روشهای دینامیکی تحلیلی: این روشها عملاً به لوله ها و یا تونلهای دارای پوشش با مقطع دایروی محدود می شوند که در فضای بی نهایت یا نیمه بی نهایت قرار گرفته اند [۱۷-۱۹].

- روشهای عددی مبتنی بر تقسیم بندی توده مانند روش اجزاء محدود و روش تفاضل محدود در محدوده فرکانسی یا زمانی [۲۰-۲۱].

- روش عددی مبتنی بر المان مرزی [۲۲-۲۳].

- روشهای عددی ترکیبی [۲۴-۲۵].

- روش آزمایشهای دینامیکی: در این حالت با ساخت مدل های آزمایشگاهی و مدلسازی حرکت زلزله رفتار سازه زیرمینی مطالعه می گردد [۱۲-۱۳].

در میان روشهای فوق روشهای عددی ترکیبی به علت توانائی در حل مسائل با شرایط مختلف از جمله شرایط خطی و غیر خطی مصالح و تنوع در نوع مصالح مورد استفاده در محیط و سازه زیر زمینی از قابلیت بالائی برخوردارند. از جمله این روشها می توان به روش ترکیبی FEM/BEM اشاره نمود. در عین حال لازم به تذکر است که روش المان مرزی در مسائل مربوط به مصالح با رفتار غیر الاستیک مزیت اصلی خود را که همان مدلسازی مساله در مرز است از دست می دهد. در تحلیلهای عددی ترکیبی معمولاً از روش اجزاء محدود برای مدل کردن سازه و بخشی از خاک نزدیک آن به همراه روش عددی دیگری مثل تفاضل محدود یا عمدتاً المان مرزی یا یک روش تحلیلی برای مدل کردن محیط اطراف استفاده می شود.

در مقاله حاضر نیز عملاً از ترکیب دو روش عددی اجزای محدود و المان مرزی برای حل مساله اندرکنش دینامیکی تونل و محیط اطراف استفاده شده است. با توجه به شکل خاص تونل برای تعریف توابع جابجائی های شعاعی و مماسی در پوشش تونل، بجای استفاده از توابع شکلی هرمیتین یا لاگرانژین از توابع شکلی مثلثاتی استفاده شده است. به علت پیوستگی این توابع در کل محیط تونل تنها متغیر های مساله ضرایبی هستند که میزان مشارکت

شرایط مرزی:

$$p_{lk}^* = \frac{1}{\alpha\pi} \left[\left(\frac{d\psi}{dr} - \frac{1}{r} \chi \right) \left(\delta_{lk} \frac{\partial r}{\partial n} + r_{,k} n_l \right) - \frac{2}{r} \chi (n_{,k} r_{,l} - 2r_{,k} r_{,l} \frac{\partial r}{\partial n}) - 2 \frac{d\chi}{dr} r_{,k} r_{,l} \frac{\partial r}{\partial n} + \left(\frac{c_1^2}{c_2^2} - 2 \right) \left(\frac{d\psi}{dr} - \frac{d\chi}{dr} - \frac{\alpha}{2r} \chi \right) r_{,l} n_{,k} \right]$$

(۸)

در معادله های (۶) و (۷)، $k_2 = i \frac{\omega}{c_2}$ و $k_1 = i \frac{\omega}{c_1}$ ،
بترتیب اعداد موجهای فشاری و برشی اند.

فرمولاسیون المان مرزی در حل معادلات انتشار امواج

در حل معادلات ناویه با روش المان مرزی معادله (۲) با استفاده از پاسخ اساسی بدست آمده مطابق رابطه (۵) بفرم ضعیف شده در می آید. به عبارتی تابع وزنی در این روش همان پاسخ اساسی است. با فرض صفر بودن نیروی حجمی داریم [۲۸]:

$$u_l^i + \int_{\Gamma} p_{lk}^* u_k d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{lk}^* p_k d\Gamma$$

(۹)

این معادله برای هر نقطه از محدوده Ω صادق است و در صورتی که مقادیر u_k و p_k برای هر نقطه i روی مرز Γ مشخص باشند، مقادیر این پارامترها را در آن نقطه مشخص خواهد نمود. اگر در این حالت نقطه اعمال بار را به طرف مرز حرکت دهیم انتگرالهای معادله (۹) دارای تکینگی می گردند، که در این شرایط معادله به فرم زیر در می آید که در آن فقط مجهولات مرزی وجود دارند:

$$c_{lk}^i u_k^i + \int_{\Gamma} p_{lk}^* u_k d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{lk}^* p_k d\Gamma$$

(۱۰)

این معادله معادله انتگرال مرزی نامیده می شود و برای هر نقطه i روی مرز هموار Γ ، $c_{lk}^i = 1/2 \delta_{lk}$ ، می باشد.

با توجه به آنکه در این تحقیق هدف مطالعه رفتار تونل دایروی در برابر عبور امواج SV و P می باشد لذا برای این قسمت از مساله باید مرز حفره دایره ای المان بندی گردد. با توجه به آنکه المان های با تغییرات درجه دوم بهترین جوابها را برای مرزهای خمیده میدهند، لذا

$$\begin{aligned} u_i(x, \omega) &= U_i & : x \in \Gamma_1 \\ t_i(x, \omega) &= \sigma_{ij} n_j = T_i & : x \in \Gamma_2 \end{aligned}$$

(۴)

بطوریکه مجموع مرزهای Γ_1 و Γ_2 کل مرز محیط Ω ، یعنی Γ را تشکیل می دهند.

اولین گام در حل عددی سیستم معادلات ناویه به روش المان مرزی مستقیم، یافتن پاسخ اساسی است. از آنجا که در این مقاله هدف اصلی بررسی پاسخ دینامیکی تونل (حفره) دایره ای در اثر عبور امواج تخت SV و P می باشد، لذا حل در محدوده دو بعدی انجام گرفته است. در روش المان مرزی مقصود از پاسخ اساسی یافتن جواب سیستم در برابر بار متمرکز $\delta(r).e$ میباشد، بطوریکه $\delta(r) = \delta(x - \xi)$ و r فاصله نقطه از محل اثر بار یعنی ξ است. با جاگذاری نیروی حجمی در معادله (۲) با بار متمرکز یاد شده، پاسخ اساسی تغییر مکان برای سیستم معادلات ناویه در شرایط $2D$ عبارت است از:

$$u_{lk}^* = \frac{1}{2\pi\rho c_2^2} [\psi \delta_{lk} - \chi r_{,i} r_{,j}]$$

(۵)

بطوریکه:

$$\psi = K_0(k_2 r) + \frac{1}{k_2 r} [K_1(k_2 r) - \frac{c_2}{c_1} K_1(k_1 r)]$$

(۶)

$$\chi = K_2(k_2 r) - \frac{c_2^2}{c_1^2} K_2(k_1 r)$$

(۷)

در روابط بالا توابع K_0 و K_1 و K_2 توابع بسل تغییر یافته مرتبه صفر و یک و دو میباشند. r فاصله نقطه دلخواهی از جسم مورد نظر تا محل بارگذاری و ρ نیز دانسیته محیط را نشان می دهد. معادله (۵) نشان دهنده میزان تغییر مکان در جهت k است وقتی بار در جهت l اعمال می شود. با گرفتن مشتق از هسته تغییر مکان پاسخ اساسی بردار تنش بصورت زیر بدست می آید:

باشند، و یا بصورت ترکیبی در مرز $\Gamma 1$ بردار تنش و در مرز $\Gamma 2$ بردار جابجائی (ویا بالعکس) مجهول باشند، بطوری که در مجموع دستگاه معادلات از نظر تعداد معادلات و مجهولات قابل حل باشد. لذا می توان برای مساله تفرق امواج حول حفره دایره ای، مجهولات مساله را تبیین و سپس حل نمود.

بهنگام برخورد موج در یک محیط همگن و ایزوتروپ با یک مانع مطابق تئوری انتشار امواج، عملاً پدیده تفرق بوجود می آید. در این حالت می توان مانع موجود در برابر موج را به عنوان منبع جدیدی برای انتشار موج فرض کرد، که دامنه موج در این حالت همان دامنه موج تفرق یافته است. در این شرایط دامنه کل موج برابر جمع دامنه های امواج تابیده شده و تفرق یافته است، لذا داریم:

$$u = u^i + u^s \quad (15)$$

این رابطه برای تمام نقاط محیط از جمله نقاط مرز حفره دایره ای صادق است. از آنجا که مرز حفره مرز آزاد به شمار می رود لذا، می توان نوشت:

$$p = p^i + p^s = 0 \quad (16)$$

در حالت موج تفرق یافته معادله (۱۶) بصورت زیر نوشته می شود:

$$HU^s = GP^s \quad (17)$$

برای حل این دستگاه معادلات میبایست بردار تنش P^s مشخص شود. اگر میدان جابجائی موج برخوردی مشخص باشد، با توجه به روابط میان کرنش - جابجائی، و تنش - کرنش و تنش مرزی - تنش برآستی مقادیر P^s در نقاط مرزی مشخص شده و با استفاده از رابطه (۱۶) مقادیر P^s و بنابراین بردار P^s مشخص می گردد. بنابر این بردار جابجائی تفرق یافته در نقاط مرزی مشخص شده و با رابطه (۱۵) کل میدان جابجائی در مرز معلوم می شود. میدان جابجائی برای امواج برخوردی به قرار زیر اند [۳۰]:

برای موج P:

$$\begin{aligned} u_1^i &= A_0 \sin \theta_0 \exp(ik_1(x_1 \sin \theta_0 + x_2 \cos \theta_0)) \\ u_2^i &= A_0 \cos \theta_0 \exp(ik_1(x_1 \sin \theta_0 + x_2 \cos \theta_0)) \end{aligned} \quad (18)$$

المان های انتخابی از نوع درجه دوم ایزوپارامتریک انتخاب می گردند. تغییرات جابجائی و بردار تنش نیز درجه دوم انتخاب شده اند. اگر مرز حفره به NE المان تقسیم شده باشد معادله (۱۰) به فرم زیر در می آید:

$$c^i u^i + \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} p^* \Phi d\Gamma \right\} u^j = \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} u^* \Phi d\Gamma \right\} p^j \quad (11)$$

در فرم توسعه یافته تری معادله بالا را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$c^i u^i + \left[\hat{H}^{i1} \hat{H}^{i2} \dots \hat{H}^{iN} \right] \begin{Bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_1^2 \\ u_2^2 \\ \vdots \\ u_1^N \\ u_2^N \end{Bmatrix} = \left[G^{i1} G^{i2} \dots G^{iN} \right] \begin{Bmatrix} p_1^1 \\ p_2^1 \\ p_1^2 \\ p_2^2 \\ \vdots \\ p_1^N \\ p_2^N \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} H^{ij} &= \hat{H}^{ij} && \text{When } i \neq j \\ H^{ij} &= \hat{H}^{ij} + c^i && \text{When } i = j \end{aligned} \quad (13)$$

با وجود دو مولفه جابجائی برای هر نقطه روی مرز در صفحه و نوشتن معادله (۱۲) برای هر نقطه روی مرز سیستم معادلات تبدیل به یک دستگاه معادله بفرم زیر میگردد:

$$HU = GP \quad (14)$$

در این معادله H و G بترتیب متشکل از انتگرال های هسته تنش و جابجائی به ابعاد $2N \times 2N$ می باشند. U و P هم بردارهای جابجائی و تنش در نقاط مرزی به ابعاد $2N \times 1$ می باشند.

انتشار و تفرق موج حول حفره دایره ای

برای حل دستگاه معادلات بدست آمده مطابق رابطه (۱۴) لازم است یکی از بردارهای U یا P مجهول

نیست. بیضی شدگی تونلهای دایروی به شکل فوق در ادبیات فنی رفتار لرزه ای تونلهای دایروی، مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه می توان به کارهای انجام شده توسط حشاش [۳۵] و کوناگانی [۲۹] اشاره نمود.

با عنایت به نتایج عددی بدست آمده در این قسمت ملاحظه می شود که اعوجاج بشکل بیضی شدگی برای موج P در محدوده فرکانس بی بعد کوچکتر از ۰,۵ و برای موج SV در محدوده فرکانس بی بعد کوچکتر از یک صادق است. از نظر کاربردی اگر فرض کنیم که محیط اطراف تونل مصالح خاکی بوده و متوسط سرعت موج برشی در آن ۳۰۰ متر بر ثانیه و محدوده قطر تونل برابر ۵ تا ۱۵ متر انتخاب شود مطابق تعریف فرکانس بی بعد این روش محدوده فرکانسی ۳ تا ۱۰ هرتز را پوشش می دهد.

معرفی المان حلقه

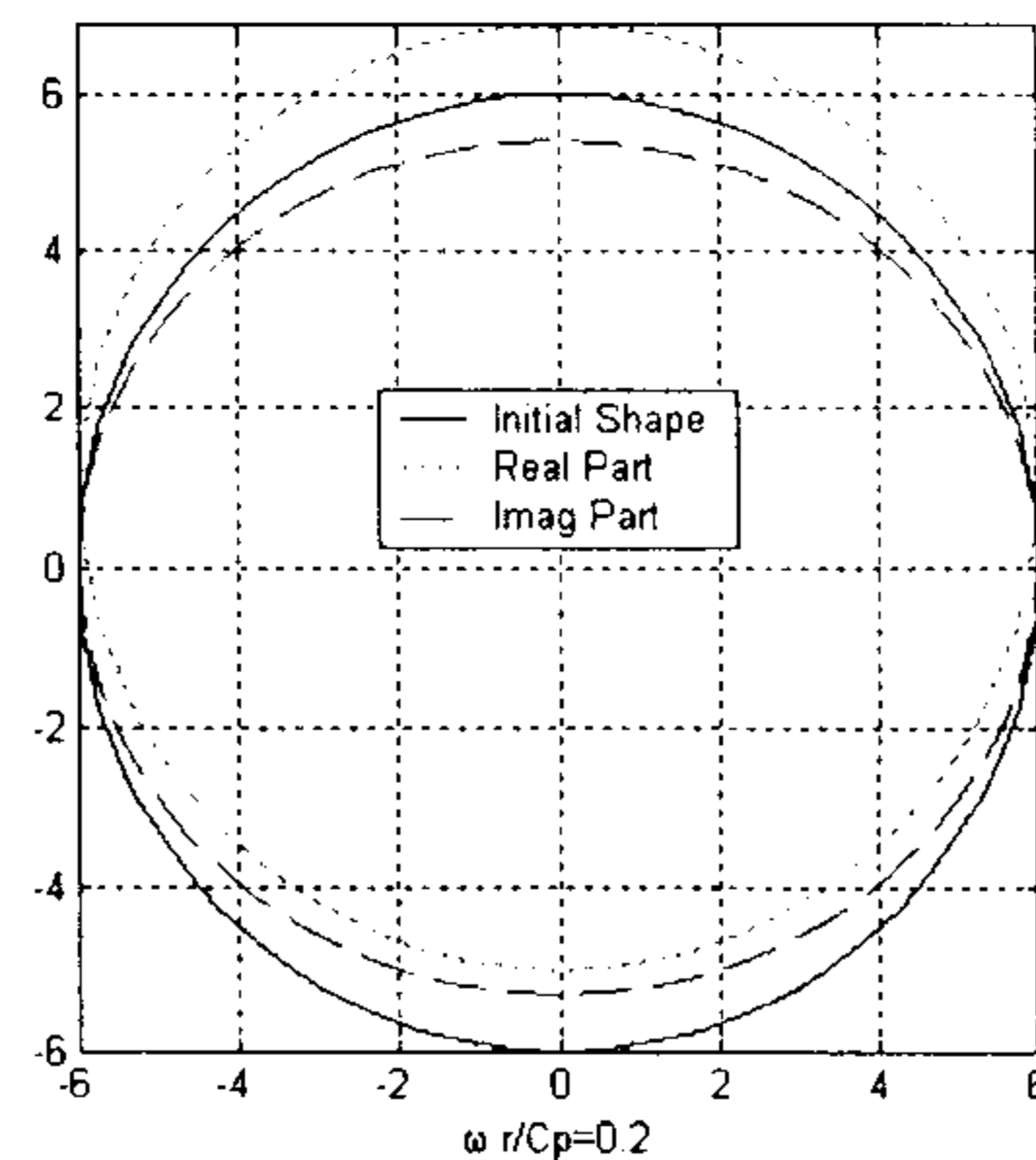
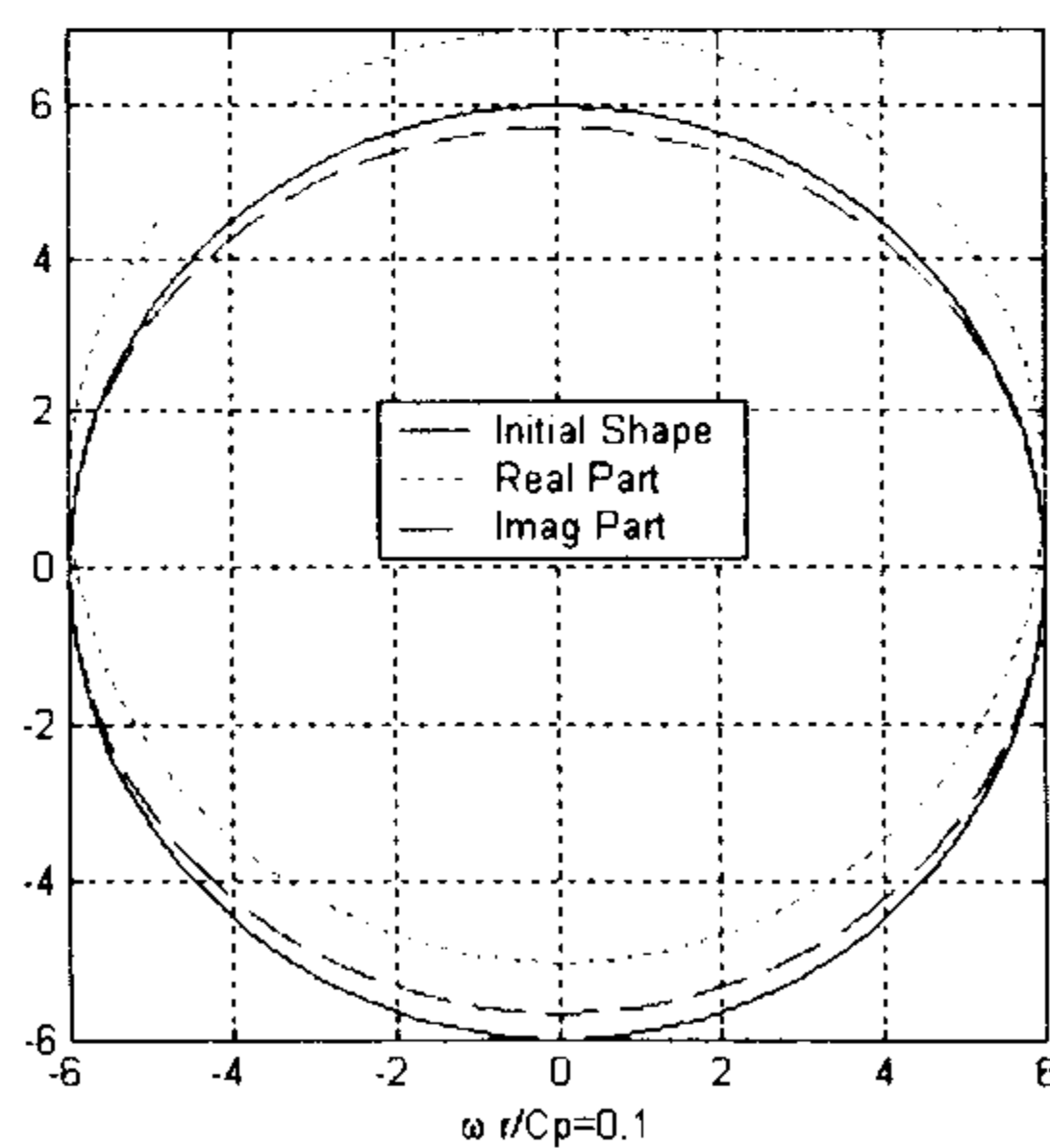
با توجه به مطالب بخش قبل در خصوص رفتار تونلهای دایره ای در برابر زلزله ملاحظه شد که این تونلهای در محدوده فرکانسی پائین در برابر عبور امواج برشی بصورت بیضی $\pm 45^\circ$ نسبت به محور افقی تغییر شکل میدهند و در برابر برخورد موج فشاری نیز بصورت بیضی، بسته به راستای برخورد موج تغییر شکل میدهند. این مطلب در شکل (۳) ملاحظه می شود.

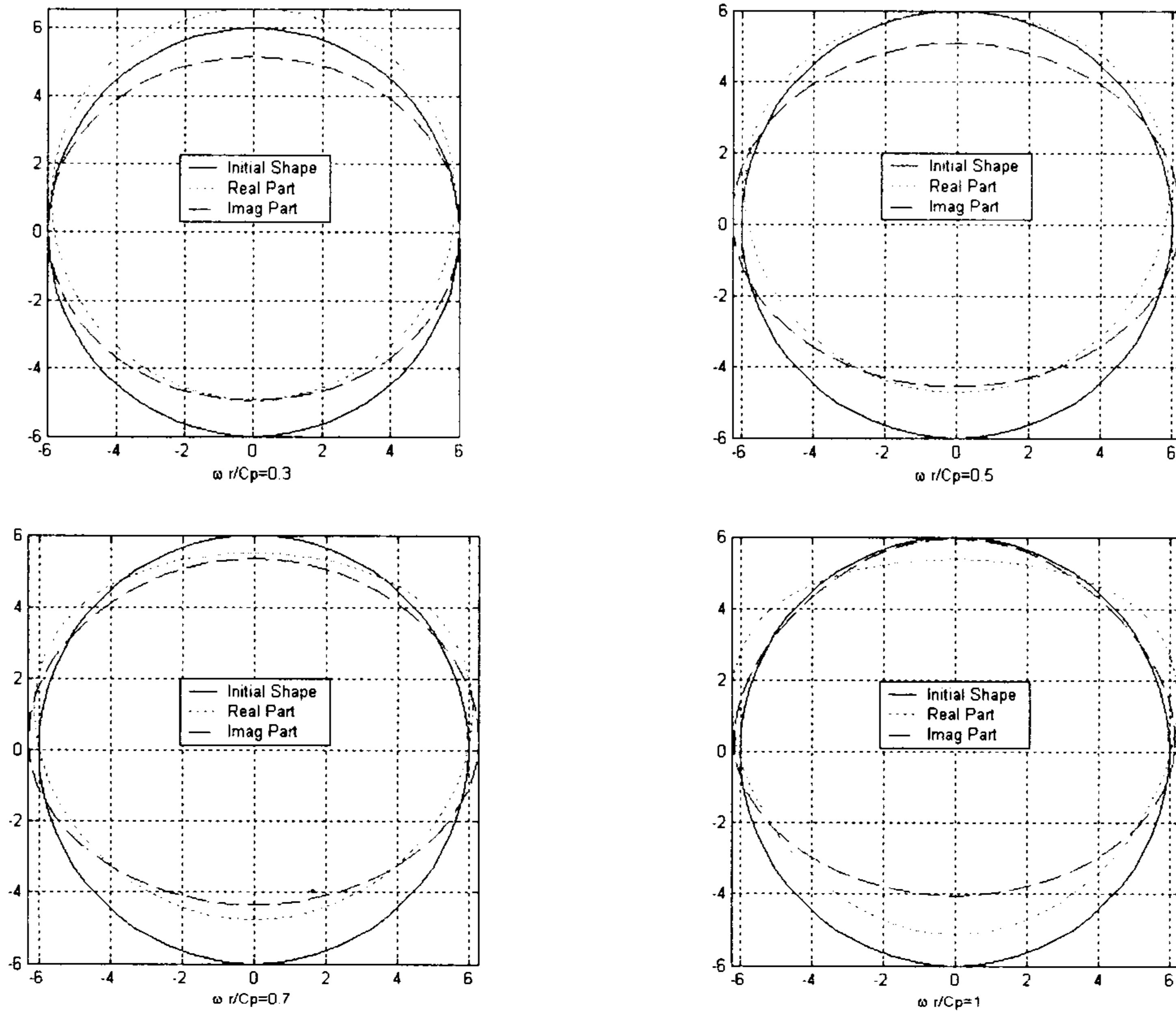
برای موج SV:

$$\begin{aligned} u_1^i &= -A_1 \cos\theta_0 \exp(ik_1(x_1 \sin\theta_0 + x_2 \cos\theta_0)) \\ u_2^i &= A_1 \sin\theta_0 \exp(ik_1(x_1 \sin\theta_0 + x_2 \cos\theta_0)) \end{aligned} \quad (19)$$

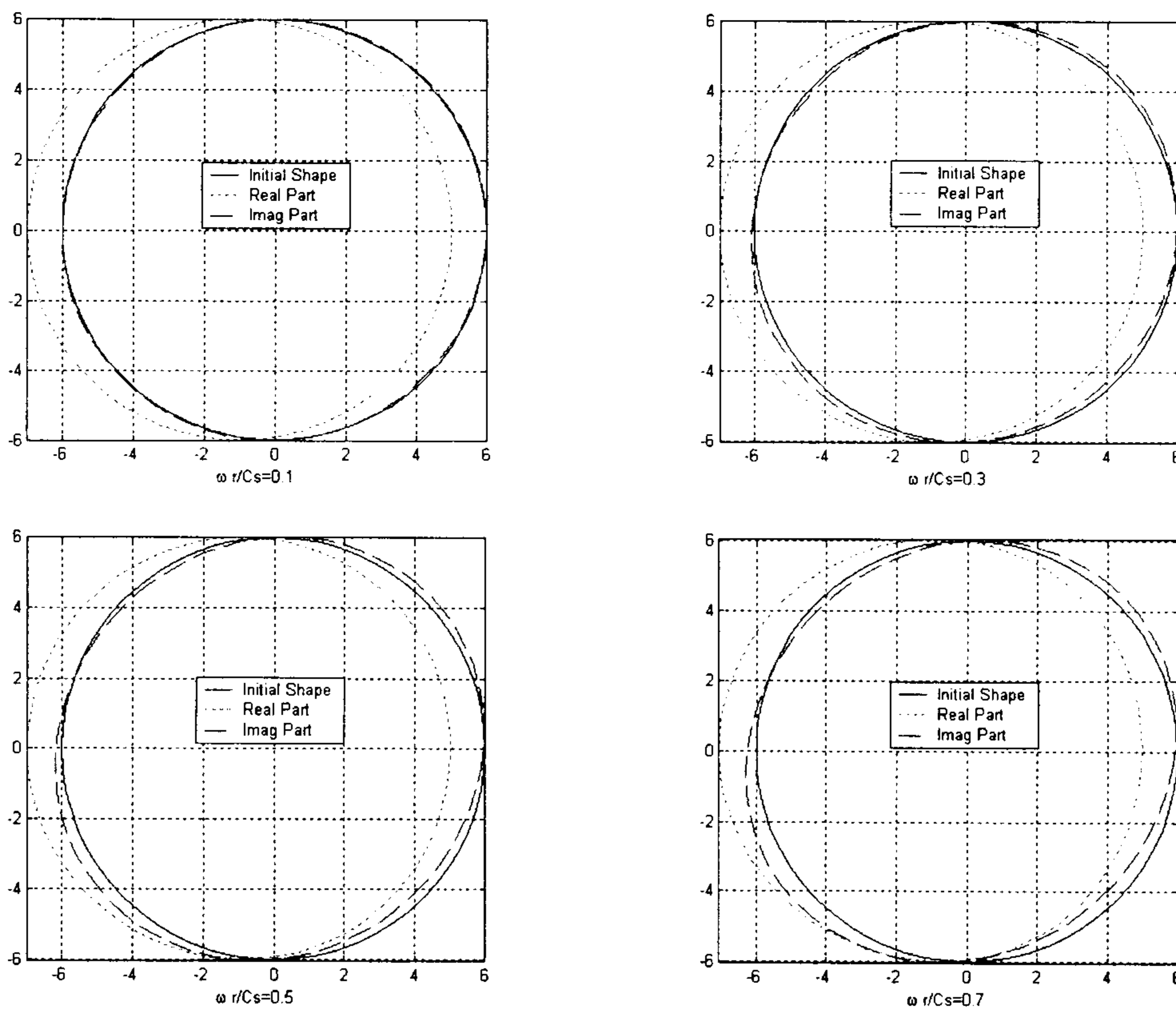
در این روابطه A_1 و A_0 دامنه امواج و θ_0 زاویه برخورد موج با محور قائم x_2 می باشند.

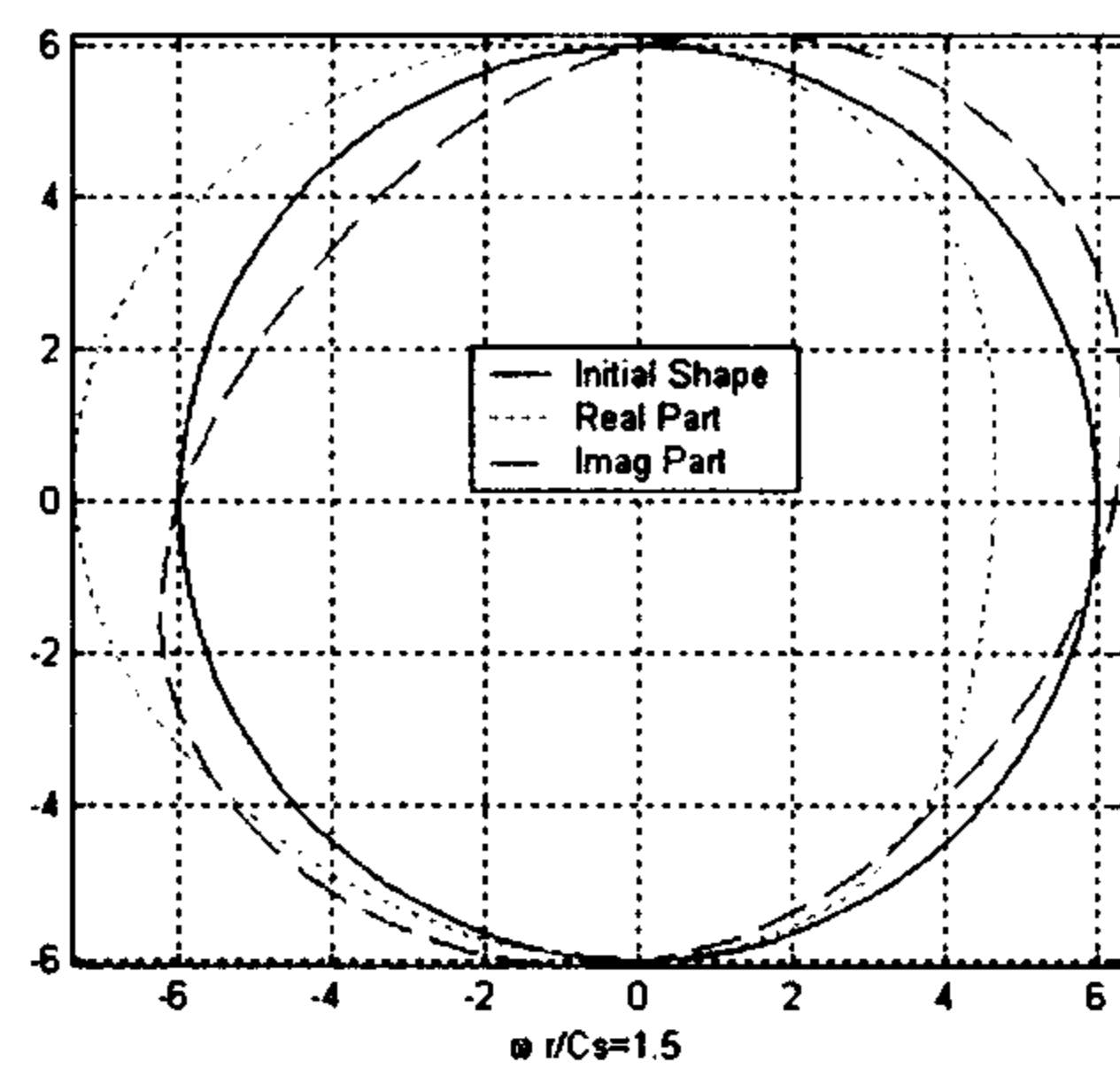
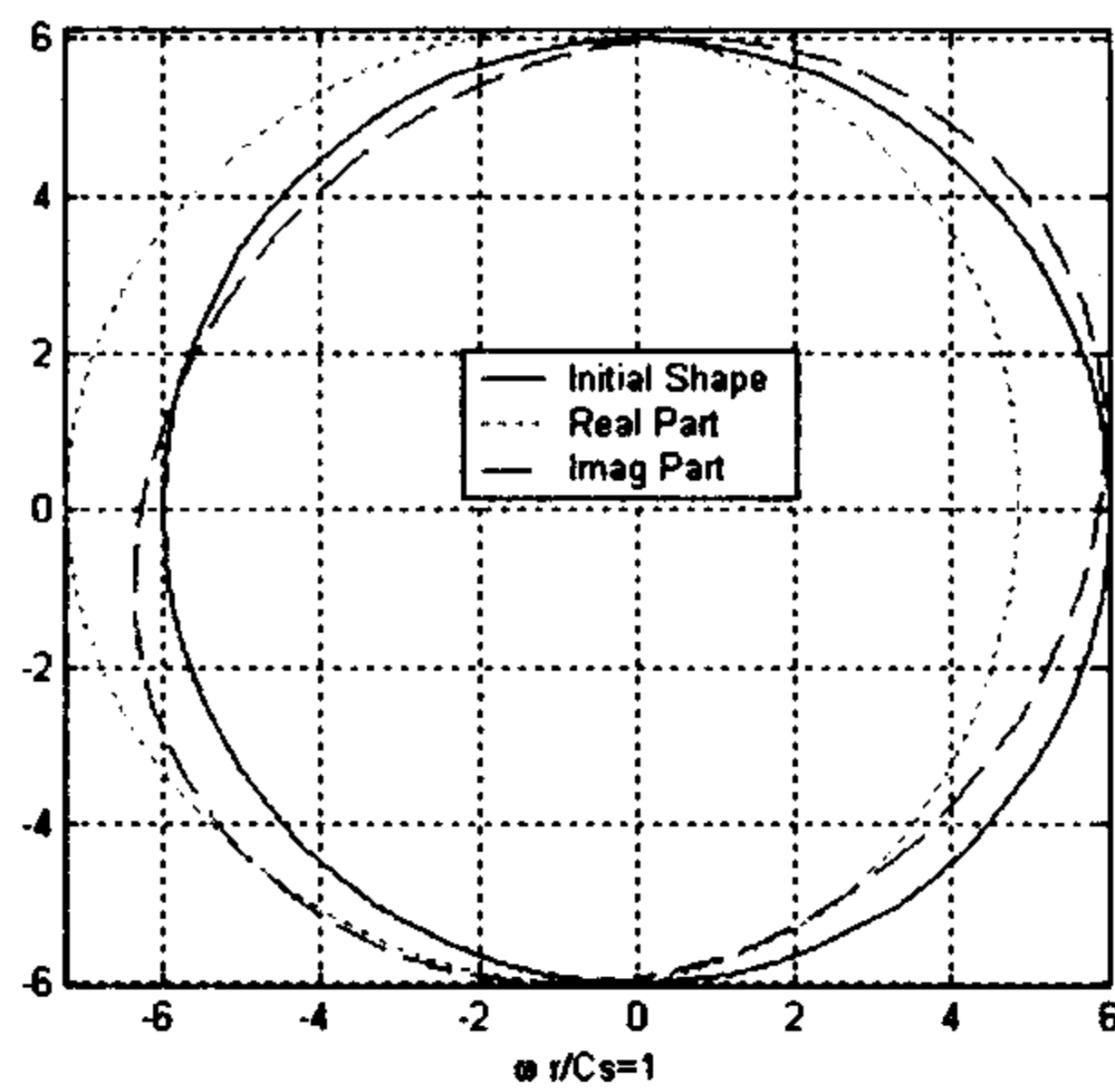
با توجه به روش مطرح شده در این بخش، با فرض یک حفره دایره ای در محیط نامحدود، رفتار آن در برابر عبور امواج تخت P و SV بررسی میگردد. بلحاظ تقارن مساله امواج به صورت قائم و در فرکانسهای بی بعد $\frac{\omega r}{c}$ مختلف (که در آن ω فرکانس موج برخوردی، r شعاع حفره مورد نظر و c نیز بسته به موج تابیده شده، سرعت موج فشاری یا برشی می باشد) $0,1-0,2-0,3-0,5-0,7-1-1,5$ تابانده شده است. به علت آنکه در قسمت بعد مقاله تمرکز بحث روی انتخاب میدان جابجائی شعاعی و مماسی برای المان حلقه با توجه به فرم تغییر شکل حفره است، لذا نتایج بصورت تغییرشکلهای حفره در بخش های حقیقی و موهومی ارائه شده اند. نتایج مورد نظر برای امواج تخت P و SV بترتیب در شکلهای (۱) و (۲) دیده می شوند. نکته بسیار مهم در این شکلها، اثر بخش موهومی بصورت اعوجاج^۱ بیضی شدگی و بخش حقیقی بصورت حرکت صلب^۲ دایروی ناشی از عبور موج در فرکانسهای بی بعد کوچکتر از یک می باشد. در فرکانسهای بی بعد بالاتر رفتار پیچیده تر بوده و تفکیک این دو نوع حرکت بصورت بیان شده بسادگی امکان پذیر



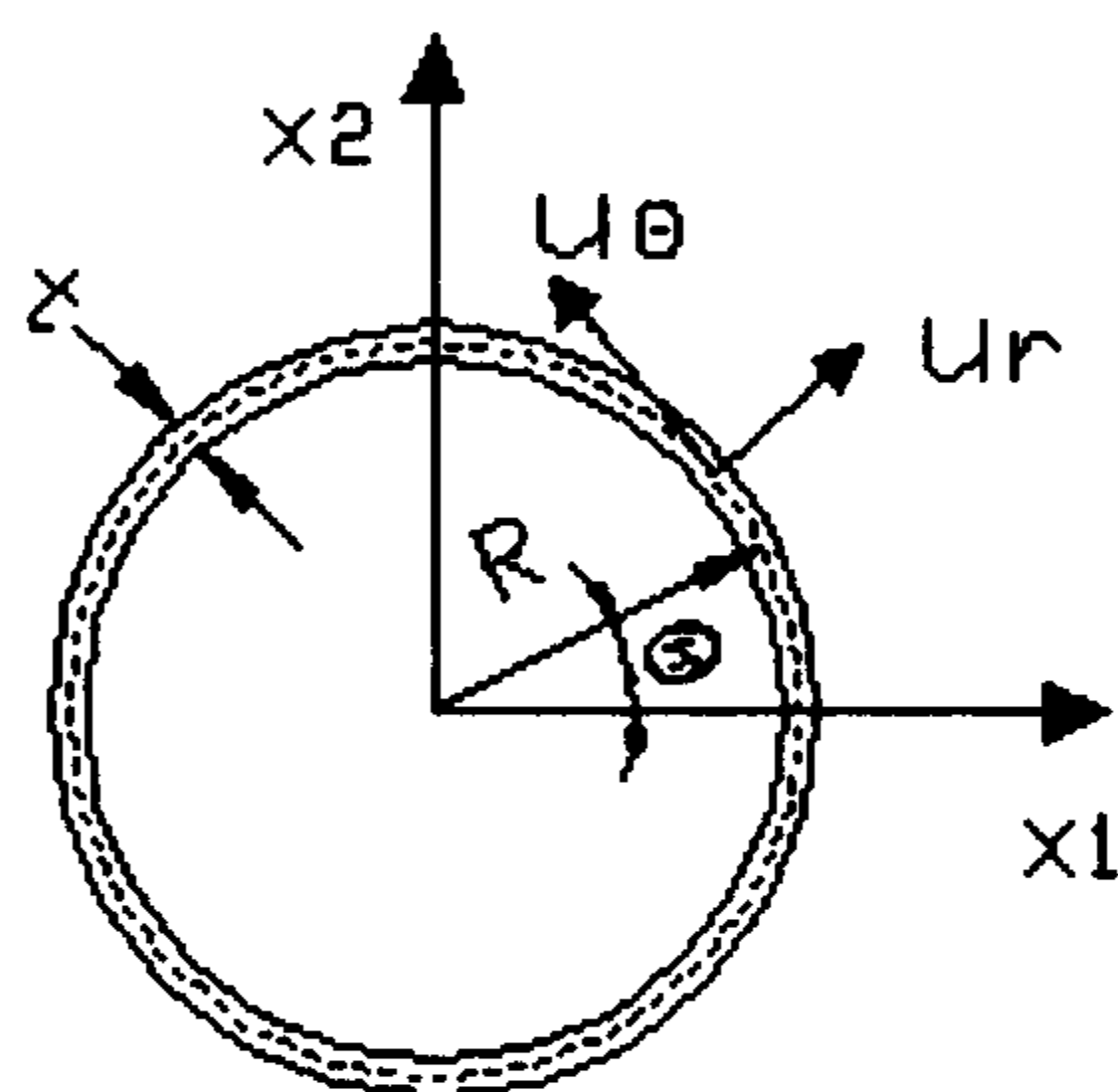


شکل ۱: نحوه تغییر شکل حفره دایره ای به شعاع ۶ متر در دو بخش موهومی و مختلط برای موج فشاری P در فرکانسهای بی بعد مختلف در سیستم مختصات کارتزین.

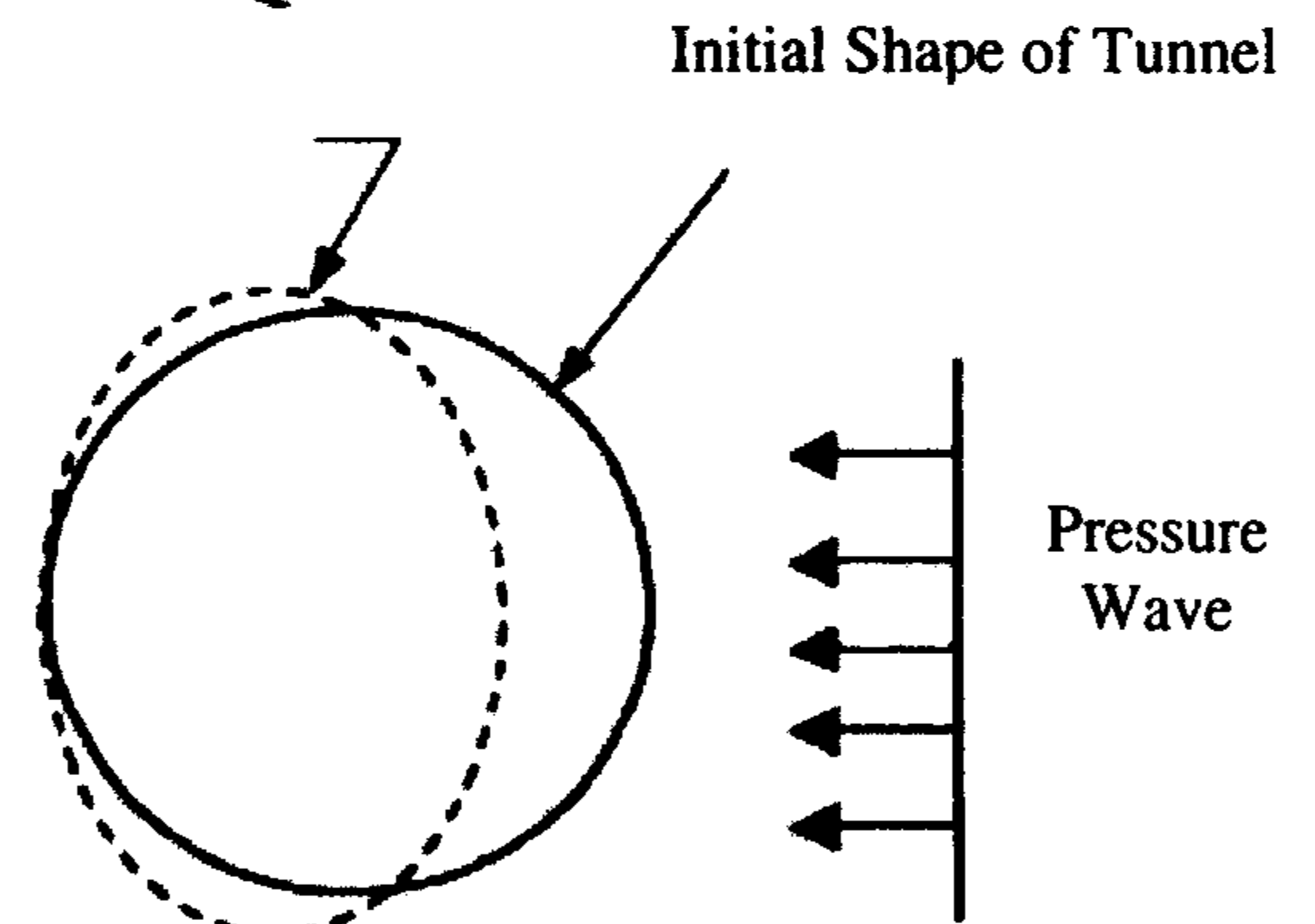
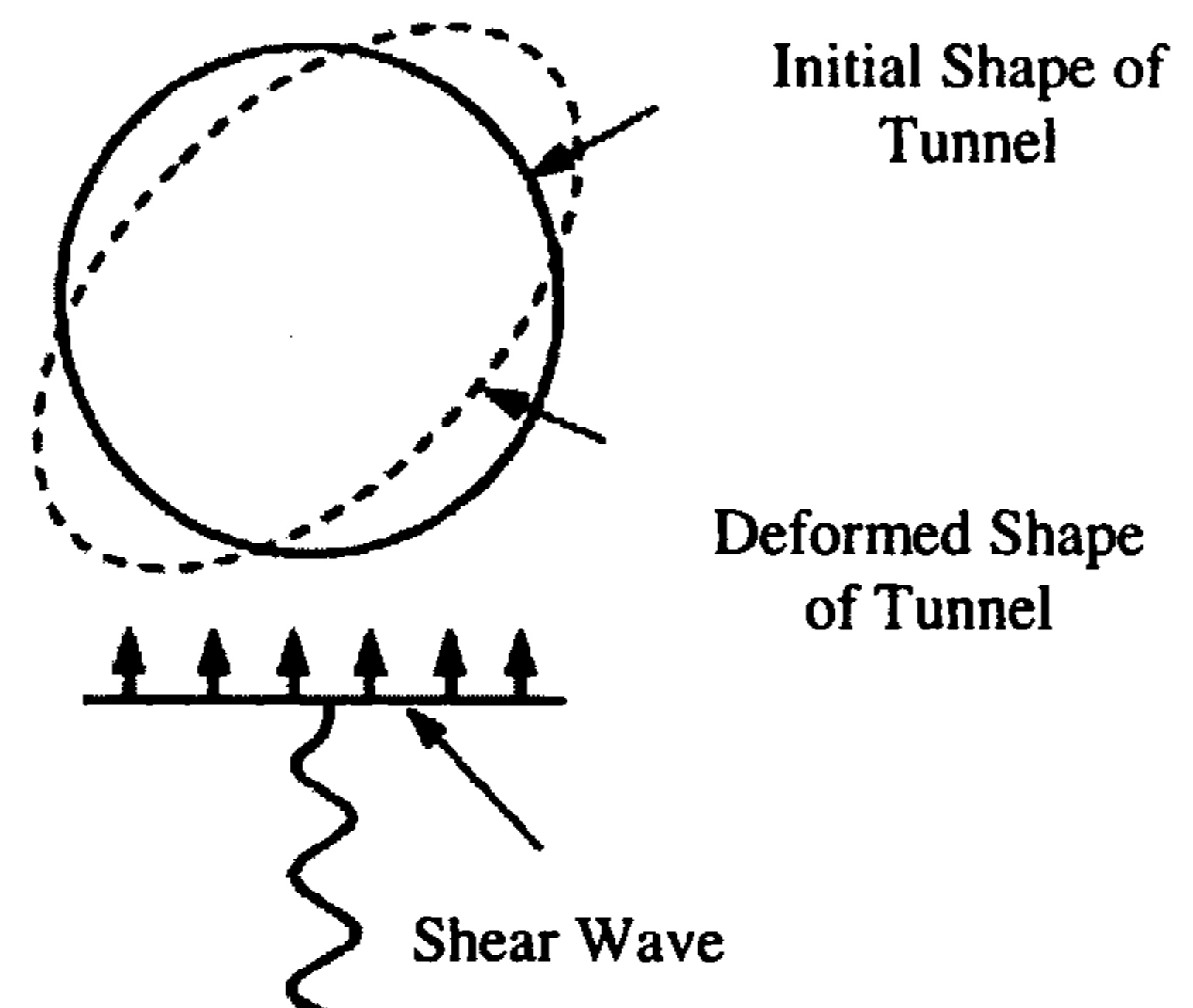




شکل ۲: نحوه تغییر شکل حفره دایره ای به شعاع ۶ متر در دو بخش موهومی و مختلط برای موج برشی SV در فرکانسهای بی بعد مختلف در سیستم مختصات کارتزین.



شکل ۴: المان حلقه و میدان تغییر شکل وابسته.



شکل ۳: تغییر شکل بیضوی تونل دایره ای در اثر برخورد امواج برشی و فشاری.

تغییر شکل پوشش را می توان توسط میدان جابجائی u_r و u_θ مطابق شکل (۴) نمایش داد. انتخاب میدان تغییر شکل بصورت زیر می تواند با توجه به تغییر شکلهای واقعی هنگام عبور موج بخش عمده انرژی تغییر شکل را بیان نماید [۳۳]:

$$u_r = c_0 - 2c_1 \cos 2\theta + 2c_2 \sin 2\theta \quad (20)$$

$$u_\theta = c_1 \sin 2\theta + c_2 \cos 2\theta \quad (21)$$

دراین رابطه c_0 و c_1 و c_2 ضرائب سری فوریه انتخاب شده و به عبارتی مجهولات مساله هستند و جملات $\sin 2\theta$ و $\cos 2\theta$ عملا نقش توابع شکل را در این دو رابطه پیدا می کنند. در رابطه (۲۰) جمله ثابت c_0 انبساط و انقباض در مقطع را نیز بیان می نماید. در اینصورت با صرفنظر از تغییرات در ضخامت پوشش، میدان کرنش موثر بصورت زیر قابل بیان است [۳۱]:

با توجه به طبیعت تغییر شکل تونلهای دایره ای اگر المانی داشته باشیم که تغییر شکلهای آن با تغییر شکلهای ایجاد شده در محیط همخوانی داشته باشد، قطعا از چنین المانی انتظار جوابهای قابل قبول در تحلیل لرزه ای تونلها را داریم. براین اساس المان حلقه در این مقاله ارائه شده است که مشخصات آن در شکل (۴) ملاحظه می شود.

مرزی و روش اجزاء محدود ارائه می شود. دو روش برای این ترکیب وجود دارد که در روش اول معادلات اجزاء محدود در محیط به فرم معادلات المان مرزی در آمده و ترکیب معادلات با ارضاء شرایط سازگاری تغییر شکلها در محل اتصال حلقه و محیط نوشته می شود و در روش دوم بصورت معکوس عمل می شود یعنی معادلات المان مرزی به فرم معادلات روش اجزاء محدود در آمده و با ارضاء شرایط فوق الذکر ترکیب صورت می گیرد [۲۷]. در این مطالعه به علت سهولت کار از روش دوم استفاده شده است. لازم به تذکر است که ترکیب معادلات حاکم بر محیط با معادلات حلقه در نقاط مشترک آن دو صورت می گیرد. بدین ترتیب پیوستگی بین پوشش و محیط در قالب فرضیات معمول روشهای عددی برقرار می گردد.

از آنجا که طرف دوم معادله از جنس بردار تنش می باشد، لازم است طرفین معادله در ماتریس M ضرب شود تا طرف دوم از جنس نیرو شده و تطابق با روش اجزاء محدود حاصل گردد:

$$[M]_{2N \times 2N} [G^{-1}]_{2N \times 2N} [H]_{2N \times 2N} \{U^s\}_{2N \times 1} = [M]_{2N \times 2N} \{P^s\}_{2N \times 1} \quad (29)$$

که در این رابطه ماتریس M بصورت زیر محاسبه می شود:

$$M = \int_{\Gamma} N^T N d\Gamma \quad (30)$$

$$N = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & \phi_2 & 0 & \phi_3 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & \phi_2 & 0 & \phi_3 \end{bmatrix} \quad (31)$$

در این روابط ϕ_1 و ϕ_2 و ϕ_3 توابع شکلی درجه دوم تعریف شده در فرمولاسیون المان مرزی میباشند. با استفاده از معادله های (۲۲) و (۲۳) داریم:

$$\begin{Bmatrix} U_r \\ U_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -2 \cos 2\theta & 2 \sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{Bmatrix} \quad (32)$$

اگر این ماتریس انتقال را در هر نقطه از مرز متناظر با المان بندی انجام شده در روش المان مرزی محاسبه نموده و زیر یکدیگر قرار دهیم ماتریس انتقال کلی بدست می آید:

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{R} + \frac{1}{R} \frac{du_\theta}{d\theta} - \frac{y}{R^2} \frac{d^2 u_r}{d\theta^2} \quad (22)$$

$$\gamma_{\theta r} = \frac{1}{R} \frac{du_r}{d\theta} \quad (23)$$

با جاگذاری میدان جابجائی های شعاعی و مماسی از معادلات (۲۰) و (۲۱) در معادله های (۲۲) و (۲۳) خواهیم داشت:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{\theta\theta} \\ \gamma_{\theta r} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & \frac{-8y \cos 2\theta}{R^2} & \frac{8y \sin 2\theta}{R^2} \\ 0 & \frac{4 \sin 2\theta}{R} & \frac{-4 \cos 2\theta}{R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{Bmatrix} \quad (24)$$

و یا به عبارت کلی تر داریم:

$$\epsilon = BC \quad (25)$$

با استفاده از روش ریتز و حداقل کردن انرژی پتانسیل حلقه نسبت به ثوابت c_0 و c_1 و c_2 ماتریس سختی حلقه با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$K_{RING} = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_0^{2\pi} B^T \cdot D \cdot B \cdot R d\theta dy \quad (26)$$

که در آن D ماتریس خواص ماده عبارت است از:

$$D = \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix} \quad (27)$$

در رابطه بالا E و G بترتیب مدول الاستیسیته و مدول برشی مصالح حلقه (پوشش) می باشند. در حالت کلی برای المان حلقه می توان رابطه زیر را نوشت:

$$[K]\{C\} = \{F\} \quad (28)$$

در این رابطه K ماتریس سختی 3×3 و C بردار 3×1 ثابتهای سری فوریه و F بردار 3×1 نیروهای وارد بر حلقه می باشد. همچنین R و t بترتیب شعاع متوسط و ضخامت حلقه میباشند.

فرمولاسیون ترکیبی حلقه و محیط

در این قسمت فرمولاسیون ترکیبی روش المان

داخلی تونل محاسبه شده است. از طرفی با توجه به معلوم بودن تغییر شکلها در محل تماس با حفره بر اساس مشخصات محیط، تنش حلقوی و برشی در محل تماس حلقه با محیط نیز محاسبه شده است. شعاع داخلی مانند مثال بخش قبل انتخاب شده و اختلاف شعاع داخلی و

خارجی حلقه برابر $r_o - r_i = \frac{r_i}{8}$ انتخاب شده است. نسبت مدول برشی تونل به محیط برابر $\frac{\mu_r}{\mu_m} = 3$ (که در آن زیر نویس r نشان دهنده مشخصات

حلقه (پوشش تونل) و m نشان دهنده مشخصات محیط می باشد) و ضرائب پواسون برای محیط و تونل به ترتیب برابر ۰,۲۵ و ۰,۳ و برای امواج برخوردی P و SV با عبارات $\mu_m k_s, (\lambda_m + 2\mu_m) k_p$ بصورت بی بعد ارائه شده است. که در آن k_s و k_p بترتیب اعداد موج فشاری و برشی می باشند. نتایج در شکلهای (۵) و (۶) ملاحظه می شوند. در عین حال برای مشخص نمودن اثر اندرکنش حلقه (پوشش) با محیط، پاسخ حفره بدون پوشش بصورت حداکثر تنش حلقوی پیرامون حفره بر حسب فرکانس بی بعد در شکل (۷) ارائه شده است.

همانطور که از نتایج بدست آمده در شکلهای (۵) و (۶) پیداست تا محدوده فرکانسی مشخصی، مقادیر تنشهای حلقوی و برشی در حلقه نسبت به تنشهای محل تماس بزرگترند و در محدوده ای دیگر این روند عوض می شود. علت این اختلاف می تواند حاکم بودن رفتار خمشی بر المان حلقه و امکان جداشدگی آن از محیط و در عین حال حاکم بودن رفتار پیوسته بر مصالح محیط باشد. لازم به تذکر است که تنشها در حلقه بر مبنای معادلات حاکم بر آن و تنشهای محل تماس با محیط بر اساس معادلات حاکم بر محیط با استفاده از جابجائیهای مشترک حلقه و محیط و تراکشنهای مرزی بدست آمده است. ملاحظه می شود که ضرائب تمرکز تنش ناشی از موج برشی SV از مقادیر ناشی از موج فشاری P بزرگترند که خود نشان دهنده اثر مخرب اینگونه امواج بر روی تونلهای دایره ای می باشد.

نتیجه گیری

با مرور مطالب عنوان شده در این تحقیق اهم

$$\{U^s\}_{2N \times 1} = [T]_{2N \times 3} \{C^s\}_{3 \times 1} \quad (33)$$

با جاگذاری معادله (۳۳) در معادله (۲۹) و ضرب طرفین معادله در $[T]^T$ داریم:

$$[T]_{3 \times 2N}^T [M]_{2N \times 2N} [G]_{2N \times 2N}^{-1} [H]_{2N \times 2N} [T]_{2N \times 3} \{C^s\}_{3 \times 1} = [T]_{3 \times 2N}^T [M]_{2N \times 2N} \{P^s\}_{2N \times 1} \quad (34)$$

حال اگر معادله بدست آمده را با معادله (۲۸) جمع کنیم با فرض آنکه می دانیم به علت عدم وجود نیروی خارجی بردار F برابر صفر است، داریم:

$$([K]_{3 \times 3} + [T]_{3 \times 2N}^T [M]_{2N \times 2N} [G]_{2N \times 2N}^{-1} [H]_{2N \times 2N} [T]_{2N \times 3}) \{C^s\} = [T]_{3 \times 2N}^T [M]_{2N \times 2N} \{P^s\}_{2N \times 1} \quad (35)$$

که در آن $\{C^s\}$ با حل این معادله بردار مجهولات رفتار لرزه ای ترکیب محیط و حلقه لحاظ شده است بدست می آید. با توجه به میدان جابجائی معلوم و $\{C^i\}$ معادلات (۱۸) و (۱۹) و (۳۳) با روال مشابه بردار که بیانگر خصوصیات میدان آزاد موج برخوردی است بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$\{C^i\} = ([T]^T [T])^{-1} ([T]^T \{U^i\}) \quad (36)$$

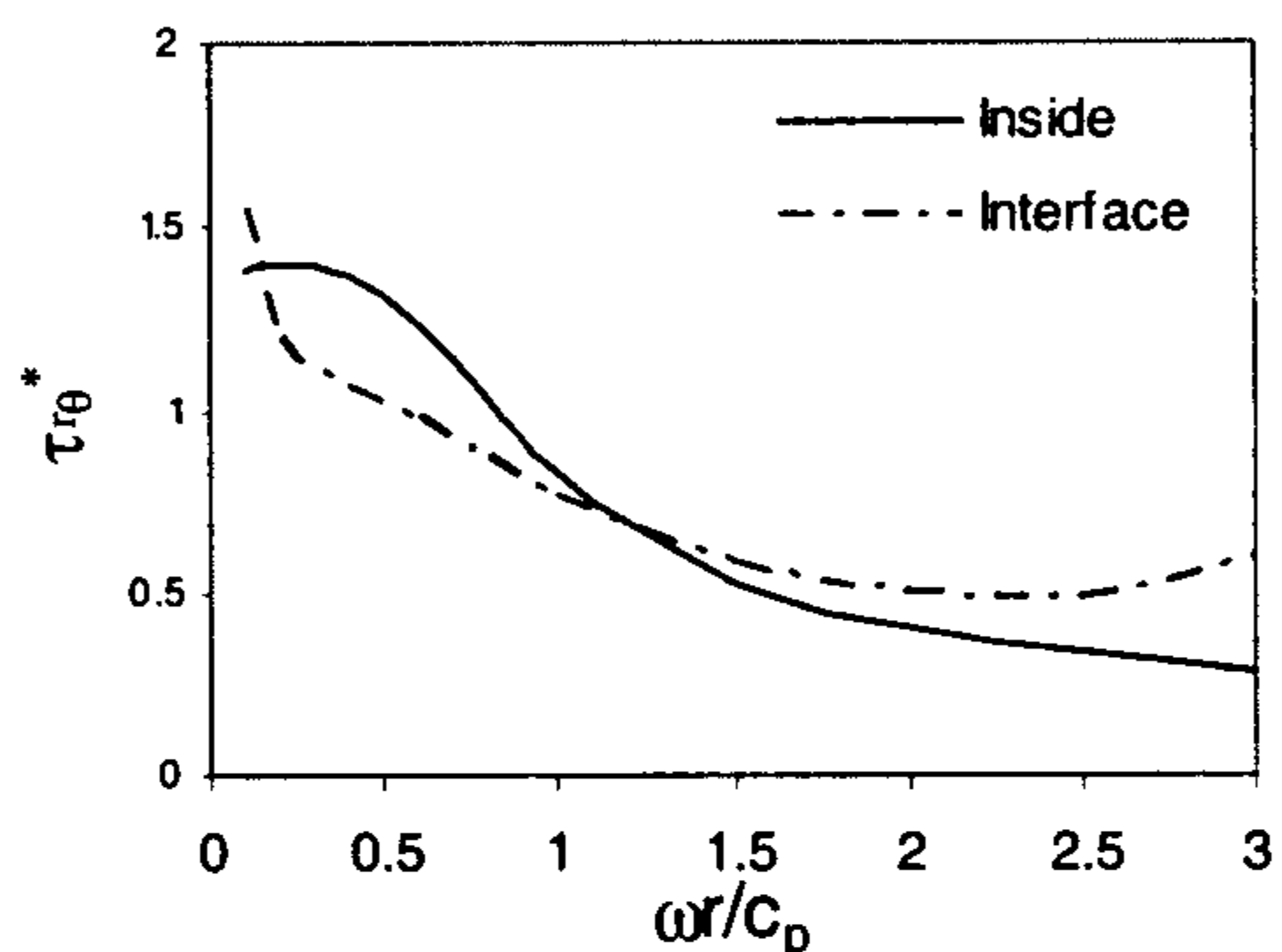
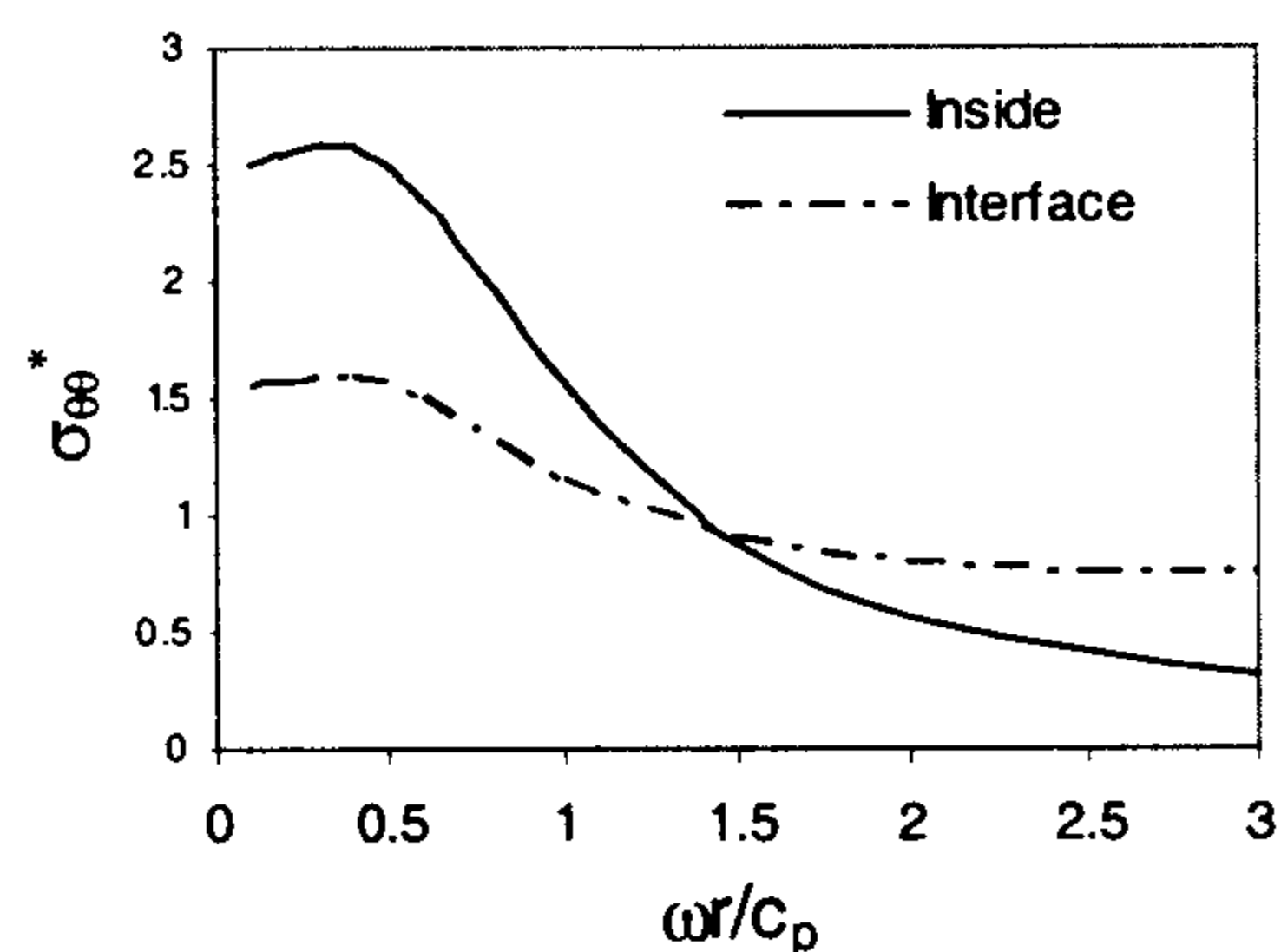
و در نهایت برای کل میدان جابجائی بطور مشابه معادله (۱۵) داریم:

$$\{C\} = \{C^i\} + \{C^s\} \quad (37)$$

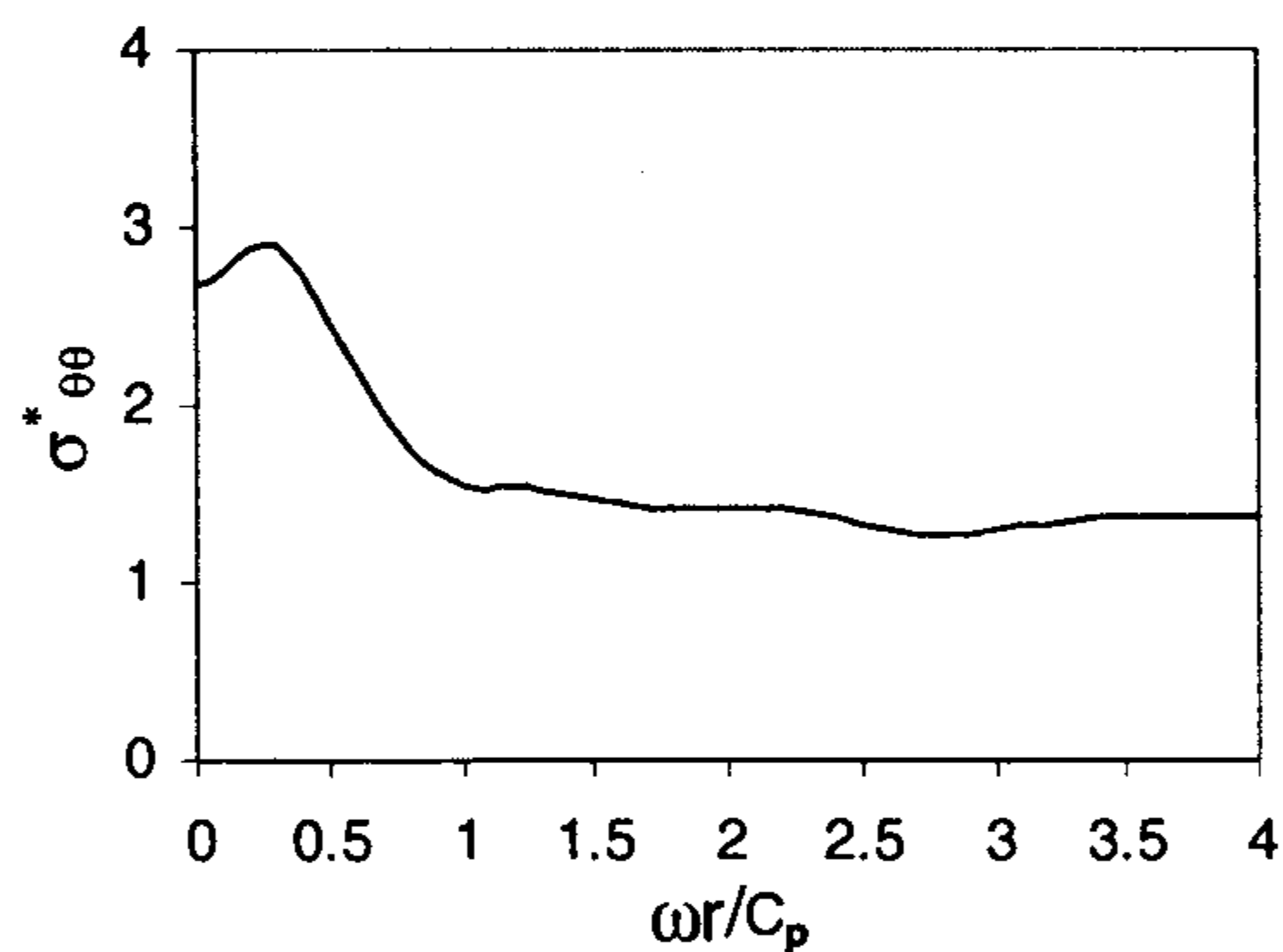
به این ترتیب با داشتن بردار $\{C\}$ و با استفاده از معادله (۲۴) میدان کرنش و به تبع آن تنش در هر نقطه از حلقه قابل محاسبه است.

مثالهای عددی

در این بخش از مقاله با حل چند مثال عددی توانائی المان ارائه شده در تحلیل دینامیکی تونلهای دایره ای بررسی می شود. در ادامه مثال قبل با فرض همان خصوصیات برای حفره (تونل) المان حلقه نیز مطابق روش ترکیبی بالا اضافه شده و تنشهای حلقوی و برشی در سطح



شکل ۶: تنش های حلقوی و برشی در پوشش برای موج قائم P.



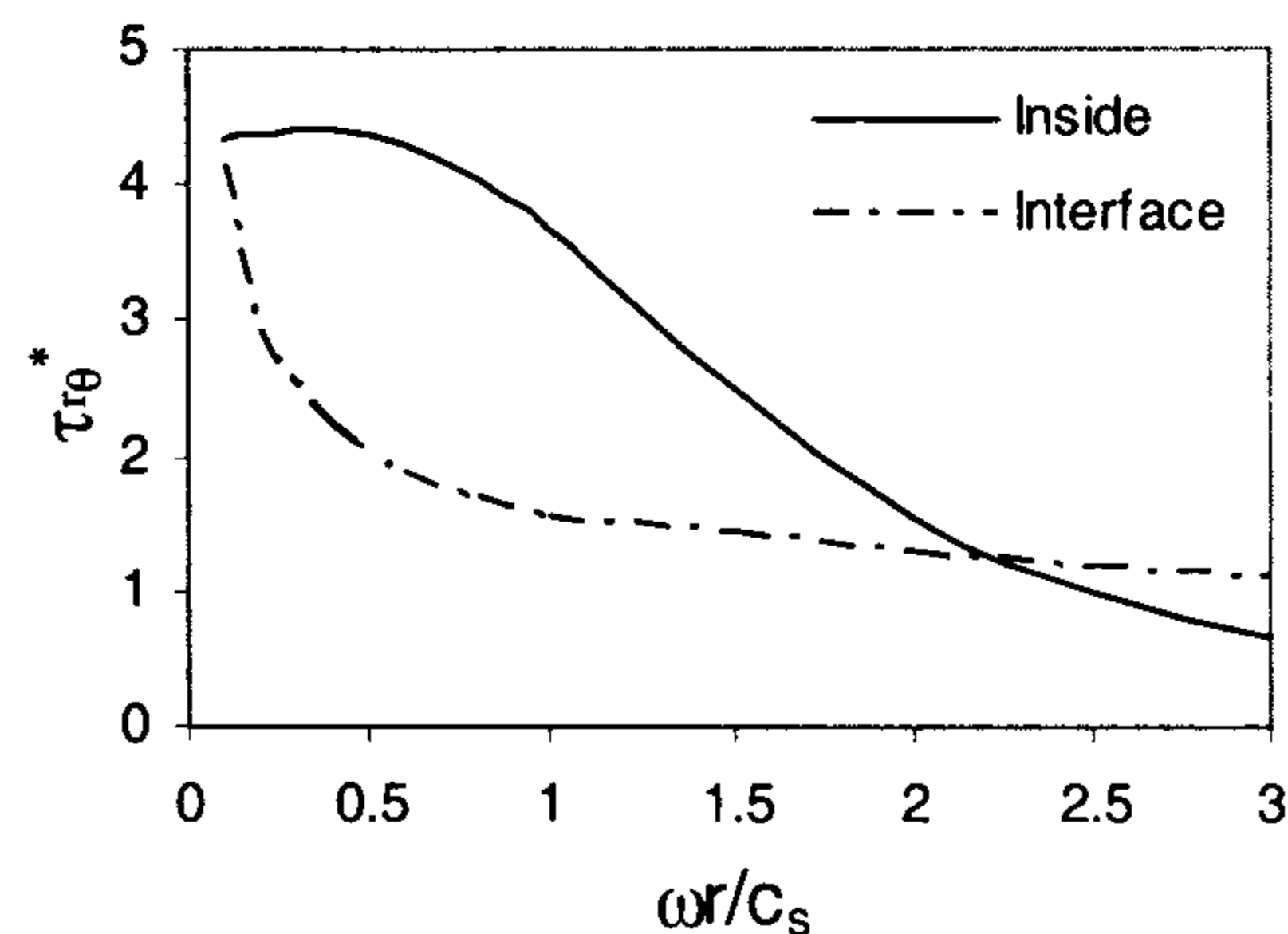
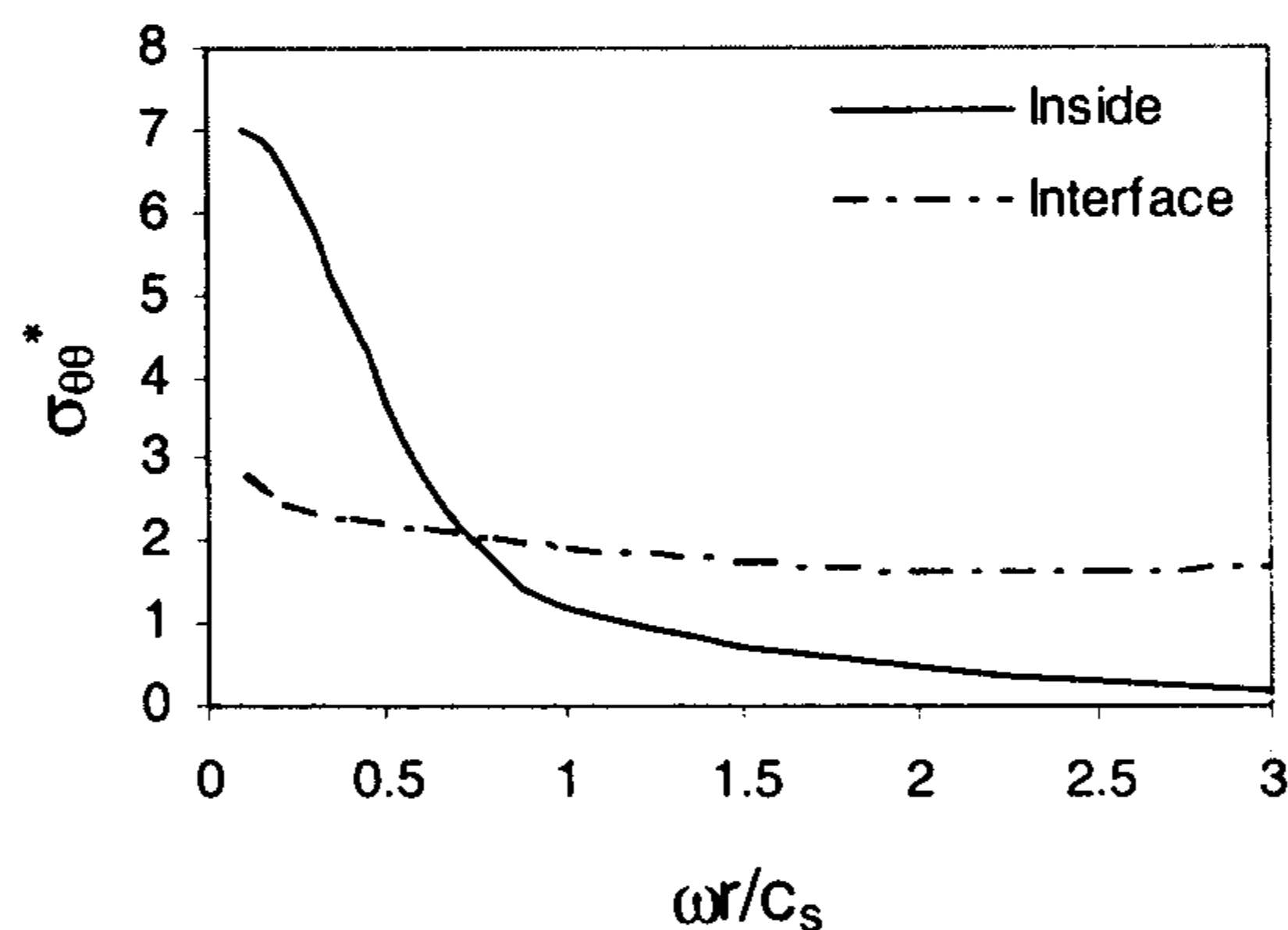
شکل ۷: تنش حلقوی پیرامون حفره بدون پوشش برای موج قائم P.

• اگر شکل اعوجاج تونل در فرکانسهای بی بعد بالاتر از یک در رفتار پوشش تونل موثر باشد، تطبیق حرکات المان معرفی شده با محیط با اضافه کردن جملات سری در میدان های جابجائی شعاعی و مماسی براحتی امکانپذیر است.

• المان ارائه شده در مقایسه با المانهای معمول در مدلسازی پوشش (مانند المانهای مسطح یا پوسته) دارای درجات آزادی بسیار کمتری است که این امر هزینه محاسبات را بسیار کاهش میدهد.

نتایج بدست آمده به قرار زیر میباشند:

- بنا بر ملاحظات عینی و تجربیات عملی موجود در رفتار لرزه ای تونلهای دایروی، این تونلها بهنگام عبور امواج زلزله بصورت بیضوی تغییر شکل می دهند که این مساله با نتایج بدست آمده از تفرق امواج در محدوده فرکانس بی بعد کوچکتر از یک حول حفره دایروی تطابق کامل دارد.
- با توجه به ضرائب تمرکز تنش بدست آمده اثر موج برشی SV نسبت به موج فشاری P در ایجاد تنشهای برشی و حلقوی در پوشش تونل بیشتر است.
- مطابق مشخصات مثالهای حل شده، حداکثر پاسخها برای پوشش در امواج برشی و فشاری در فرکانس بی بعد حدود ۰.۴ رخ می دهد.
- المان معرفی شده در مدلسازی پوشش، با نوع تغییر شکلهای ایجاد شده در اثر عبور موج تطابق مناسبی داشته و از طرفی به علت سختی بالا آن قابلیت جذب حرکات ایجاد شده در فرکانس های بی بعد بالاتر از یک را نیز داراست.



شکل ۵: تنش های حلقوی و برشی در پوشش برای موج قائم SV.

المان تیر امکان پذیر بوده و می تواند موضوع مهم برخورد موج با تونلهای منحنی شکل را حل نماید. نتایج این بررسی متعاقبا ارائه خواهد شد.

تعمیم روش ارائه شده برای معرفی سختی پوشش در تحلیل اندرکنش محیط دو بعدی به محیط سه بعدی خصوصا در تونلهای با محور غیر مستقیم، با استفاده از

مراجع

- 1 - Baron, M. L., Bleich, H. H. and Weidlinger, P. (1960). "Theoretical studies on the ground shock phenomena." *Report No SR-19*, The MITRE Corporation.
- 2 - ASCE Manual, "Design of structures to resist nuclear weapons effects." *Manual of Engineering Practice No.42*, ASCE, New York, 1961.
- 3 - Biggs, J. M. (1964). *Introduction to structural dynamics*. McGraw-Hill, New York.
- 4 - Kausel, T. R. (1969). "Earthquake design criteria for subways." *J. Struct. Div. ASCE*, Vol. 95, PP. 1213-1231.
- 5 - Newmark, N. M. (1971). "Earthquake response analysis of reactor structures." *In Proc .1st Int. Conf. on Structural Mechanics*, In reactor technology, Berlin.
- 6 - Okamoto, S. and Tamura, C. (1973). "Behavior of sub aqueous tunnel during earthquakes." *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 1, PP. 253-266.
- 7 - Aisiks, E. G. and Tarshansky, I. W. (1969). "Soil studies for seismic design of San Francisco transbay tube." *In vibration effects of Earthquakes on Soils and Foundations, STP 450, ASTM*, Philadelphia, PP. 138-166.
- 8 - Shah, H. H. and Chu, S. L. (1974). "Seismic analysis of underground structural elements." *J. Power Div. ASCE 100*, PP. 53-62.
- 9 - Wang, L. R. L. and O'Rourke, M. (1977). "State of the art of buried lifeline earthquake engineering." *In Proc. Current state of lifeline earthquake engineering, ASCE*, New York, PP. 252-266.
- 10 - Nelson, I. and Weidlinger, P. (1979). "Dynamic seismic analysis of long segmented lifelines." *J. Pressure Vessel Technol. ASME*, Vol. 101, PP. 10-19.
- 11 - O'Rourke, M. J. and Hamdi, K. El. (1988). "Analysis of continuous buried pipelines for seismic wave effects." *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 16, PP. 917-929.
- 12 - Young, D.F. and Murphy, G. (1964). "Dynamic similitude of underground structures." *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, Vol. 90, No. EM3, PP. 111-133.
- 13 - Bustamante, J. I. (1965). "Model study of the dynamic response of the sanfransisco rapid transit tube and ventilation caisson." *Unpublished report to parsons-Brinckerhoff -Todor-Bechtel, Inst. of Eng-*, National Univ. of Mexico, Mexico City.
- 14 - Dawkins, W.P. (1969). "Analysis of tunnel liner -packing systems." *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, Vol. 95, PP. 679-693.
- 15 - Yuan, H. R. and Walker, R. E. (1970). "The investigation of simple soil-structure interaction model." *In D.A. Howells, I.P. Haigh and C. Taylor (eds), Dynamic Waves in Civil Engineering*, Wiely, New York, PP. 247-266.
- 16 - Hindy, A. and Novak, M. (1979). "Earthquake response of underground pipelines." *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 7, PP. 451-476.
- 17 - Garnet, H. and Grouzet -Pascal, J. (1966). "Transient response of a circular cylinder of arbitrary thickness in an elastic medium to a plane dilatational wave." *J. Appl. Mech. ASME*, Vol. 33, PP. 521-531.
- 18 - Datta, S. K., O'leary, P. M. and Shah, A. H. (1985). "Dynamic response of buried pipelines to incident longitudinal and shear waves." *J. Appl. Mech ASME*, Vol. 52, PP. 919-926.

- 19 - Wong, K. C., Shah, A. H. and Datta, S. K. (1984). "Dynamic amplification of displacements and stresses around buried pipelines and tunnels." In S.K. Datta(ed.), *Earthquake Source Modeling, Ground Motion and Structural Response*, ASME, New York, PP. 147-161.
- 20 - Hwang, R. N. and Lysmer, J. (1981). "Response of buried structures to traveling waves." *Geotech. Eng. Div. ASCE*, Vol. 107, PP. 183-200.
- 21 - Monsees, J. E. and Merrit, J. L. (1988). "Seismic modeling and design of underground structures." In G. Swoboda (ed). *Numerical Methods in Geomechanics-Innsbruck 1988*, A.A. Balkema Rotterdam, PP.1833-1842.
- 22 - Manolis, G. D. and Beskos, D. E. "Dynamic response of lined tunnels by an isoparametric boundary element method." *Comput. Methodes Appl. Mech. Eng.*, Vol. 36, PP. 291-307.
- 23 - Kobayshi, S. and Nishimura, N. (1982). "Transient stress analysis of tunnels and caverns of arbitrary shape due to traveling waves." In P.K. Banerjee and R.P. Shaw (eds), *Developments in Boundary Element Methods-2, Applied Science*, London, PP.177-210.
- 24 - Von Estorff, O. and Kausel, E. (1989). "Coupling of boundary and finite elements for soil-structure interaction." *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 18, PP. 1065-1075.
- 25 - Liu, S. W., Datta, S. K., Khair, K. R. and Shah, A. H. (1991). "Three-dimensional dynamics of pipelines buried in backfilled trenches due to oblique incidence of body waves." *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, Vol. 10, PP. 182-191.
- 26 - Brebbia, C. A. and Dominguez, J. (1989). "Boundary element an introductory course." *Computational Mechanics Publications*, Southampton Boston.
- 27 - Banerjee, P. K. and Butterfield, R. (1981). *Boundary element method in engineering science*. McGraw-Hill Book Company.
- 28 - Dominguez, J. (1993). "Boundary elements in dynamics." *Computational Mechanics Publications* Southampton Boston.
- 29 - Kim, D. S. and Konagai, K. (2000). "Seismic isolation effect of a tunnel covered with coating material." *Journal of Tunneling and Underground Space Structure Technology*, Vol. 5, No. 4, PP. 437-443.
- 30 - Manolis, G. D. and Beskose, D. E. (1988). *Boundary Element Methods in Elastodynamics*. Unwin Hyman, London.
- 31 - Oden, J. T. and Ripperger, E. A. (1981). *Mechanics of elastic structures*. Second Edition, McGraw-Hill Book Company.
- 32 - Pao, Y. H. and Maw, C. C. (1973). *Diffraction of elastic waves in dynamic stress concentrations*. Crane Russake, New York.
- 33 - Vahdani, Sh. (1982). *On Finite Element of the Pipe Elbow Structures*, PhD Thesis of Faculty of Graduate School University of Southern California.
- 34 - Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (1996). *The finite element method*. McGraw-Hill Book Company.
- 35 - Youssef, M. A. Hashasha,, Jeffrey J. Hooka, Birger Schmidtb, John I-Chiang Yaoa,' (2001). "Seismic design and analysis of underground structures." *J. Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 16, PP. 247-293.

واژه های کلیدی به ترتیب استفاده در متن

1 -Soil-Tunnel Interaction
3 -Hybrid Methods

2 -Ring Element
4 -Trigonometric Shape Functions