بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تهران

دانشکده فنی

تحلیل دینامیکی غیر خطی بر مبنای به هنگام سازی زیر فضاها

نگارش : غلامرضا هروی

استاد راهنما : دکتر رضا عطار نژاد

اساتید مشاور : دکتر شاهرخ مالک

: دکتر ایرج محمود زاده کنی

رساله برای دریافت درجه دکتری

در

رشته : مهندسی عمران گرایش : سازه

خرداد ۱۳۸۰

تحلیل دینامیکی غیر خطی بر مبنای به هنگام سازی زیر فضاها

نگارش : غلامرضا هروی

رساله

برای دریافت درجه دکتری

رشته : مهندسی عمران گرایش : سازه

ازاین رساله در تاریخ ۱۳۸۰/۳/۸ درمقابل هیئت داوران
دفاع بعمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

۱- دکتر رسول میرقادری (سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه عمران)

۲- دکتر رضا عطارنژاد (استاد راهنما)

۳- دکتر شاهرخ مالک (استاد مشاور)

٤- دکتر ایرج محمودزاده کنی (استاد مشاور)

٥- دکترمحمد تقی کاظمی (استاد مدعو از دانشگاه صنعتی شریف)

٦- دکتر وحید لطفی (استاد مدعو از دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

۷- دکتر شهرام وهدانی (استاد مدعو از دانشکده فنی)

۸- دکتر جمشید فرجودی (استاد مدعو از دانشکده فنی)

۹- دکتر اسدا... نورزاد (استاد مدعو از دانشکده فنی)

۱۰- دکتر سهیل محمدی (استاد مدعو از دانشکده فنی)

دانشگاه تهران دانشکده فنی
گروه مهندسی عمران

با ادای احترام نسبت به

روح بزرگ پدر و مادرم،

تقدیم می دارم به :

همسر با ایمان ، پرتلاش و صبورم

چکیده

در رساله حاضر، بردار خطای ناشی از تحلیل های دینامیکی خطی و غیر خطی در زیر فضاهای تعمیم یافته استخراج و به دو مولفه مستقل داخل و خارج زیر فضا تفکیک گردیده است. با توجه به ارتباط مولفه داخل زیر فضا و عناصر غیر قطری ماتریس های سختی و استهلاک تعمیم یافته، یک فرمولبندی جدید جهت تحلیل مسائل دینامیکی خطی وغیر خطی در زیرفضاهای تعمیم یافته یک بعدی ارائه گردیده که از لحاظ کارآیی بویژه در مسائل دینامیکی غیر خطی مدت زمان تحلیل را به میزان قابل توجهی نسبت به روش معمول کاهش ابعاد مسائل دینامیکی، کاهش می دهد.کاهش مدت زمان تحلیل ،امکان افزایش ابعاد زیر فضا را به هدف کاهش خطا در پاسخ های حاصل از تحلیل فراهم آورده است.

جهت تحلیل در دامنه مسائل دینامیکی غیر خطی، با توجه به ضرورت به هنگام سازی زیر فضای تعمیم یافته، یک معیار به هنگام سازی، بر پایه انرژی بنا گردیده که براساس معیار مزبور تعداد دفعات به هنگام سازی زیر فضا حتی الامکان کاهش یافته، واز این رهگذر علاوه بر آنکه کارآیی روش محفوظ باقی مانده، از خطاهای ناشی از ناسازگاری بردارهای پایه قدیم و جدید اجتناب گردیده است. الگوریتم جدید بطور عمومی جهت تحلیل سیستمهای دینامیکی دارای میرائی غیر متناسب بنا شده است.

تقدیر و تشکر:

با سپاس از زحمات استاد ارجمند جناب آقای دکتر رضا عطار نژاد که در طـول انجـام موضـوع رسـاله حاضرهمواره از راهنمائیهای ارزشمند ایشان بهره مند بوده ام ،مراتـب قدردانـی خـود را نسـبت بـه اسـاتید گرانقدر آقایان دکتر شاهرخ مالک و دکتر ایرج محمود زاده کنی ابراز می نمایم. فرصت را غنیمت شمرده از همکاری بی شائبه سرکار خانم مهندس پونه بابائی در تهیه و تدویـن رسـاله حـاضر تشـکر نمـوده توفیـق روزافزون ایشان را از درگاه ایزد منان مسئلت می نمایم. همچنین از همکاری جناب آقای مهندس امیرحسین رهبانیان در انجام آنالیزهای مورد نیاز توسط نرم افزار ANSYS کمال تشکر را دارد.

فهرست مطالب

مقدمه

تحلیل دینامیکی درحالت غیرخطی- موضوع رساله حاضر- عبارتست ازحل افزایشی تکراری یک دستگاه معادلات دیفرانسیل همزمان که براساس مدل اجزاء محدودسیستم دینامیکی بنا شده است· تحلیل افزایشی وحل سیستم درگامهای زمانی متوالی بواسطه دینامیک بودن سیستم و استفاده از روش تکراربواسطه غیرخطی بودن سیستم اجتناب ناپذیر می گردد· این نوع تحلیل ،درمسائل عملی با توجه به بزرگ بودن ابعاد سیستم اجزاء محدود ، هزینه بالای محاسباتی راطلب می نماید·

براساس روش اجزاء محدود ، توپوگرافی سیستم واقعی براساس المان های محدود مناسب ، بصورت شبکه ای از نقاط (گره ها) که پیرامون هر یک از المانها واقع و براساس روابط تعریف شده در میدان هر المان ،به یکدیگر مرتبط گردیده اند ، تعریف می گردد· نهایتاً این تغییرتوپوگرافی منجر به یک مدل تحلیلی ریاضی جهت تحلیل سیستم در مقابل بارهای اعمالی می گردد· جهت رسیدن به پاسخهای واقعی ، استفاده از تعداد زیادی از المانها که بتوانند مدل واقعی تری از سیستم ارائه نمایند اجتناب ناپذیر بوده ،که این موضوع منجر به یک سیستم بزرگ معادلات تعادل همزمان ،که براساس تعادل هر یک از گره های متصل کننده المانها بنا شده ،خواهدگردید.

در صورتیکه سیستم فوق در تحت اثر یک بار گذاری وابسته به زمان ، به گونه ای تغییر شکل دهد ، که اندازه تغییر شکلهای نسبی گره ها. منجر به تغییر خصوصیات فیزیکی سیستم گردد، (سختی سیستم وابسته به تغییر شکلهای سیستم تغییر نماید) . با یک سیستم دینامیکی غیر خطی مواجه خواهیم بود · معادله تعادل این سیستم nبعدی براساس مدلسازی انجام شده بصورت زیر بیان می شود :

$$M_{n*n}\ddot{U}_{n*1} + C_{n*n}\dot{U}_{n*1} + K_{n*n}(U)U_{n*1} = F_{n*1}(t)$$

$$U(0) = U_0, \dot{U}_0(0) = \dot{U}_0$$

که در رابطه فوق M و C و $K(U)$ بترتیب ماتریس های جرم ، استهلاک و سختی سیستم ، $F(t)$ بردار بارگذاری، U، $\dot{U}$و $\ddot{U}$به ترتیب تغییر مکان ، سرعت و شتاب سیستم می باشند · همچنین U_0 و $\dot{U}_0$ شرایط

اولیه دستگاه معادلات دیفرانسیل (تغییر مکان اولیه و سرعت اولیه) بوده ، که اجزاء جدایی ناپذیر سیستم دینامیکی فوق می باشند ۰

هدف رساله ، تحلیل سیستم دینامیکی غیر خطی فوق براساس فرضیات ذیل می باشد:

۱ - ماتریس های جرم (M) و استهلاک (C)، در طول تحلیل ثابت بوده وتغییر نمی نمایند .

۲- ماتریس سختی $(K(U))$ ، در طول تحلیل بر اساس یک الگوی تعریف شده وابسته به تغییر مکان سیستم تغییر می نماید (مصالح ارتجاعی غیر خطی) .

راه کار انتخاب شده که اساس موضوع رساله را تشکیل می دهد ، تغییر مختصات سیستم ، از مختصات اجزاء محدود به مختصات تعمیم یافته ای می باشد که به هدف کاهش ابعاد فضای تحلیل براساس یک سری بردارهای پایه بنا گردیده است ۰ زیر فضایی که معادله حرکت سیستم دینامیکی بر آن تصویر می شود ، بایستی حتی الامکان خصوصیات فیزیکی سیستم واقعی را لحاظ نماید ۰ از آنجا که ویژگیهای این زیر فضا منبعث از بردارهای پایه مولد آن می باشد ، این بردارهای پایه براساس خصوصیات سیستم واقعی، تولید شده و زیر فضای مناسب تحلیل را ایجاد می نمایند ۰ در حالت غیر خطی ،این بردارهای پایه با توجه به آن که خصوصیات فیزیکی سیستم واقعی مکرراً تغییر می نمایند، بایستی بصورت مناسب به هنگام شوند. به گونه ایکه خصوصیات جدید سیستم را در گامهای متوالی به خوبی تصویر نمایند ۰

در حالت عمومی تحلیل سیستم در زیر فضاهای تعمیم یافته، معادلات حرکت سیستم که از تصویرنمودن سیستم اجزاء محدود n بعدی بر زیر فضای تعمیم یافته m بعدی ، حاصل گردیده اند عبارت خواهند بود از :

$$\tilde{M}_{m*m}\ddot{Y}_{m*1} + \tilde{C}_{m*m}\dot{Y}_{m*1} + \tilde{K}_{m*m}(Y)Y_{m*1} = \tilde{F}_{m*1}(t)$$
$$Y(0) = \Psi^T MU_0 , \dot{Y}(0) = \Psi^T M\dot{U}_0$$

$$m \ll n$$

$$\tilde{M}_{m*m} = \Psi^T_{m*n} M_{n*n} \Psi_{n*m}$$

$$\tilde{C}_{m*m} = \Psi^T_{m*n} C_{n*n} \Psi_{n*m}$$

$$\widetilde{K}_{m*m}(Y) = \Psi^T_{m*n} K_{n*n}(U) \Psi_{n*m}$$

$$\widetilde{F}_{m*1}(t) = \Psi^T_{m*n} F_{n*1}(t)$$

$$U_{n*1}(t) = \Psi_{n*m} Y_{m*1}(t)$$

$$_{n*m} = \left[\ \psi_1, \psi_2, \ldots\ldots, \psi_m \right]_{n*m}$$

به منظور ارائه مناسب مطالب ، تفکیک موضوعات در چارچوب فصول زیرصورت پذیرفته است :

کلیه مبانی مورد نیاز که از مراجع بررسی شده استخراج گردیده و جهت انجام موضوع رساله مورد استفاده قرار گرفته اند در فصل ۱(کلیات) و در قالب چهار زیر فصل مجزا گنجانیده شده است .

در فصل ۲ مولفه های بردار خطا در حیطه تحلیل مسائل دینامیکی خطی درزیرفضاهای تعمیم یافته استخراج گردیده و مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفته است.

در فصل ۳ ، بر اساس مبانی تئوری خطای ارائه شده در فصل ۲ ، **فرمولبندی و الگوریتم روش تحلیل سیستم های دینامیکی خطی** در زیر فضاهای تعمیم یافته یک بعدی ارائه گردیده است .

با بهره گیری از آنچه در فصول ۲و۳ انجام گرفته است ، روش تحلیل مسائل دینامیکی غیر خطی در زیر فضاهای تعمیم یافته یک بعدی شامل تئوری ، فرمولبندی ، نحوه به هنگام سازی و الگوریتم روش در فصل چهارم ارائه شده است .

به کمک برنامه کامپیوتری نوشته شده بر اساس الگوریتم روش جدید ، نتایج عددی حاصل از تحلیل سیستم های دینامیکی خطی و غیر خطی در فصل پنجم گنجانیده شده است .

در فصل ششم ، بر اساس نتایج عددی حاصل از تحلیل سیستم های دینامیکی خطی و غیر خطی ، تاثیر پارامترها و عوامل مختلف بر نتایج حاصل از تحلیل ارائه گردیده است .

فهرست کلیه مراجع مورد استفاده جهت انجام موضوع رساله در فصل هفتم ارائه شده است .

و در خاتمه در پیوست های (**الف**) تا (**د**) نتایج حاصل از تحلیل سیستم های مورد بررسی توسط نرم افزار ***ANSYS*** ارائه گردیده است.

۱ - کلیا ت

تحلیل پاسخ سیستم های مهندسی معمولاً با حل دستگاههای معادلات جبری (ویا دیفرانسیل) همزمان همراه می باشد . در مورد سیستم های مهندسی پیچیده با توجه به وجود دستگاههای بزرگ معادلات، تعیین پاسخ سیستم هزینه محاسباتی بالایی طلب می نماید ، که این موضوع به ویژه در مورد مسائل غیر خطی و وابسته به زمان (دینامیکی) از اهمیت ویژه بر خوردار می باشد ٠

در بسیاری موارد تعداد زیاد درجات آزادی سیستم (دستگاههای بزرگ معادلات) نه به علت پاسخ پیچیده مورد انتظار بلکه در اثر توپولوژی سیستم ویا تغییر سریع خصوصیات فیزیکی آن دیکته می شود ٠ این موضوع باعث می شود که در بسیاری موارد الگوهای تغییر مکانی پیچیده را بتوان با دقت کافی بصورت ترکیب خطی از تعداد کمتری بردار پایه که بصورت مناسب انتخاب شده باشند بیان نمود٠ همین امر مبنای نگرش تحلیل سیستم های مکانیکی(ویا مهندسی) در زیر فضایی مناسب با ابعادی کوچکتر ازابعاد فضای اصلی سیستم گردیده است٠

روشهای مبتنی بر این نگرش (کاهش ابعاد فضای تحلیل سیستم) جهت حل مسائل دینامیکی خطی بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند ، این دسته خاص از مسائل بصورت دستگاه معادلات خطی همزمان حرکت بیان می شوند :

$$M\ddot{U}(t)+C\dot{U}(t)+KU(t)=F(t) \qquad (1-1)$$

که در آن $U(t)$ ، $\dot{U}(t)$ و $\ddot{U}(t)$ بترتیب بردارهای شامل n مقدار برای تغییر مکانها ، سرعتها و شتابها ، M ، C و K بترتیب ماتریس های مربع nبعدی و متقارن جرم ، استهلاک و سختی(در طول تحلیل ثابت) و $F(t)$بردار nبعدی بارگذاری خارجی وارد بر سیستم می باشند ٠

اعمال روش کاهشی عبارتست از تبدیل مختصات معادلات حرکت سیستم ، که جهت این تبدیل بردار تغییر مکان مجهول $U(t)$ (مرتبه n)، بصورت ترکیب خطی از تغییر مکانهای تعمیم یافته $Y(t)$ (مرتبه m) بیان می شود :

$$U = \Psi Y \qquad (\text{۱-۲})$$

که این عبارت نشان دهنده تبدیل مختصات سیستم می باشد ۰ ماتریس تبدیـل Ψ، مرکـب از m بـردار سـتونی ψ_i (مرتبه n) بوده که بطور خطی مستقل و کامل (*Completness*) می باشند۰ با اعمال تبدیل مشـابه در مـورد بردار های سرعت و شتاب و بایش ضرب نمودن هر یک از عبارتهای دستگاه معادلات حرکت (۱-۱) در Ψ^T، شکل تبدیل یافته معادلات حرکت (۱-۱) بصورت زیر بیان می شود :

$$\Psi^T M \Psi \ddot{Y}(t) + \Psi^T C \Psi \dot{Y}(t) + \Psi^T K \Psi Y(t) = \Psi^T F(t) \qquad (\text{۱-۳})$$

$$\tilde{M}\ddot{Y}(t) + \tilde{C}\dot{Y}(t) + \tilde{K}Y(t) = \tilde{F}(t) \qquad (\text{۱-٤})$$

که در آن ماتریس های $\tilde{M}$ ، $\tilde{C}$ و $\tilde{K}$ماتریس های کاهش یافته مربع از مرتبه m و $\tilde{F}(t)$ بردارباز کاهش یافته mبعدی می باشند ۰

استفاده از این روش در تحلیل مدل های سازه ای بزرگ ، هنگامیکه بردار های پایـه مولـد زیـر فضـا بـه نحـوی انتخاب شده باشند که به پاسخهای دینامیکی دقیق سیستم منجر شوند ، بسیار کارآ و مثمر ثمر مـی باشـد ۰ بـه ایـن علت روشهای انتگرالگیری کاهشی معمولاً عملکرد مناسب تری نسبت به روشـهای انتگرالگیـری مسـتقیم در مـورد تحلیل مسائل دینامیکی خطی بویژه تحت تاثیر بارگذاری متوسط یا طولانی مدت و یا متناوب دارند ۰ در این حالتـها ماتریس تبدیل Ψ تنها یک مرتبه ودر ابتدای تحلیل به روش انتگرالگیری زمانی، محاسبه واعمال می گردد ۰[۱۳]

تحلیل سیستم های دینامیکی غیر خطی بویژه هنگامیکه این مسائل شامل تعداد زیادی متغیر مستقل مـی باشـند ، بسیار پر هزینه بوده و تا کنون تلاشهای قابل توجهی جهت پیدا کردن روشهایی که منجر به کاهش حجـم محاسـبات ضروری تحلیل اینگونه سیستم ها گردد صورت گرفته است ۰

در حالت مسائل دینامیکی با غیر خطی های ملایم ویا اثرات غیر خطی موضعی ، که بطـور موثـر بـا روش شـبه نیرو قابل تحلیل می باشند ، روشهای کاهشی (تحلیل سیستم در زیر فضاهای تعمیم یافته) بطور موفقیت آمیز کاربرد داشته اند ۰ در این حالت ماتریس سختی سیستم تغییر نکرده و نیازی بـه محاسـبه مجـدد مـاتریس تبدیـل در طـول تحلیل نمی باشد واین ماتریس تنها فقط یک مرتبه محاسبه و اعمال می شود ۰

در مورد مسائل غیر خطی شدید که پاسخ آنها براساس یک فرمول بندی ا فزایشی _تکراری (Incremental – Iterative) بدست می آید ، سودمندی روش های کاهشی ظاهرا" ناچیز بوده است ٠ این موضوع از آنجا ناشی می شود که ماتریس تبدیل در طول انتگرالگیری کارآیی لازم را از دست داده و بایستی به هنگام گردد، در این حالت مراحل اصلی که جهت کاهش ابعاد مسئله مرتبا" در طول تحلیل طی می شوند عبارتند از:

۱- تولید بردار های پایه زیر فضا

۲- معیارهای قطع تولید بردارهای پایه

۳- محاسبات مربوط به ماتریس های تعمیم یافته و بردارهای شرایط اولیه مربوط به گامهای زمانی متوالی

٤- تشکیل دستگاه معادلات در زیر فضای تعمیم یافته

جهت تحلیل اینگونه مسائل از زیر فضاهای بنا شده بر اساس بردار های ویژه ، مودهای کمانش ، مشتقات مسیر ، مشتقات مودال، مشتقات ویلسون وبردارهای *Predictor* و *Corrector* استفاده گردیده ، که هر یک از این مواردبا هدف به حداقل رساندن دفعات به هنگام سازی بردارهای پایه مولد زیر فضا با حفظ دقت تحلیل سیستم دریک حد قابل قبول ، دنبال گردیده است ٠ [۱۳و۱٦]

از آنجا که هیچکدام از تحقیقات انجام شده نتایج کاملا" مطلوب وفراگیری جهت تحلیل مسائل مختلف در پی نداشته اند ادامه تحقیقات در این زمینه ضروری به نظر می رسد ٠

در ادامه این فصل ، بر اساس مراجع مورد استفاده ، مبانی مورد نیاز جهت نیل به اهداف مورد نظر ، تحت عنوان ٤ زیر فصل مجزا ارائه خواهد شد .