بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده عمران و معماری

گروه مهندسی عمران- گرایش سازه های هیدرولیکی

بررسی پدیده اندرکنش سیال- سازه با روش عددی گودونو

دانشجو: **علیرضا نجاران طوسی**

استاد راهنما:

دکتر احمد احمدی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اردیبهشت ماه ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر و مادر بی همتایم

که مهر و عطوفتشان، همواره بزرگترین حامی و مشوق من در زندگی بوده است.

خواهر مهربانم

که با کمکهایش مرا پشتیبانی نمود.

و

همسر عزیزم

که با صبر و حوصله در طول این مسیر، همراه مهربان هر روز و شب من بود.

تشکر و قدردانی:

اکنون که به یاری خداوند موفق به اتمام این پایان نامه شدم، وظیفه خود میدانم تا از تمامی کسانی که به هر نحوی در طی مراحل انجام این تحقیق مساعدت نموده اند قدردانی و تشکر کنم.

نخست، مراتب قدردانی خود را از جناب آقای دکتر احمد احمدی که زحمت راهنمایی و مساعدت مرا در این تحقیق بر عهده داشتند اعلام نموده و از رهنمودهای ارزنده ایشان در طول این مسیر که همواره روشنگر نکات مبهم این پژوهش برای من بوده است، کمال تشکر را دارم. بعلاوه از جناب آقای دکتر رامین امینی که با اختصاص وقت برای اینجانب، مرا در مسیر این تحقیق راهنمایی نمودند بسیار سپاسگزارم.

همچنین بر خود لازم می دانم از زحمات و کمکهای بی دریغ دکتر علیرضا کرامت و همکاری صمیمانه ایشان که زحمت مشاوره این پایان نامه را بعهده داشتند، و همواره در کنارم بوده اند قدردانی و تشکر نمایم.

در انتها از دوستان عزیزی که به هر نحو مرا در طول این مسیر یاری نمودند؛ مهندس امیرحسین دیهیم، فرزاد دانشگر و بویژه محمد سالخورده حقیقی ممنون و سپاسگزارم و از زحمات و الطاف فراوان **پدر و مادر مهربان** و سایر اعضای خانواده ام که در دوران تحصیل اینجانب زحمات و سختیهای بسیاری را متحمل شده اند کمال تشکر و سپاسگزاری خود را اعلام می دارم.

چکیده:

از مهمترین مباحث مطرح در تحلیل شبکه های توزیع سیال شبیه سازی اثر تداخلی سیال سازه، میباشد که در شرایط بروز جریان غیر ماندگار در سیال ایجاد میگردد. این پدیده عبارت از انتقال نیروها و اندازه حرکت ما بین سازه لوله و سیال درون آن است که توسط تغییرات شدید دبی جریان و فشار سیال و یا توسط عوامل مکانیکی در سیستم لوله، ایجاد میگردد. با توجه به هذلولوی بودن معادلات حاکم بر این پدیده، در گذشته جهت تحلیل و شبیه سازی این اثر تداخلی، از روش خطوط مشخصه استفاده می نمودند. لکن به دلیل برخی موارد همچون روبرویی با سیستم معادلات غیر خطی و یا ترم های پیچیده در معادلات و غیره، استفاده از روش مشخصه علیرغم دقت و کارآیی بالا، همراه با محدودیت و در پاره ای موارد مستلزم مدلسازی های عددی بیشتری است که این امر را پیچیده میسازد. این مطلب بعلاوه لزوم مقایسه و بررسی دقیقتر میزان توانمندی این روش با سایر روشهای عددی، باعث توجه و رویکرد محققین و پژوهشگران به سمت استفاده از روشهای عددی دیگر جهت حل سیستم معادلات هذلولوی و من جمله پدیده اندرکنش سیال سازه شده است. در این پایان نامه روش عددی گودونو مورد توجه قرار گرفته است که یک روش مطرح جهت بررسی سیستم معادلات هذلولوی میباشد و فلسفه و جزئیات این روش عددی، تشریح شده است. همچنین هدف اصلی این رسااله، شبیه سازی پدیده تداخل سیال _سازه در شبکه های توزیع سیال با روش عددی احجام محدود گودونو میباشد. بدین منظور از یکی از مسائل مرجع آزمایشگاهی موجود در این زمینه بهره گرفته شده و نتایج حاصل از حل این مساله با روش عددی گودونو با نتایج قبلی به دست آمده از روش خطوط مشخصه مقایسه شده اند. با توجه به تطابق نتایج، توانمندی روش عددی گودونو در زمینه تحلیل سیستم معادلات هذلولوی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: روش گودونو، اندرکنش سیال سازه، ضربه قوچ

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه..... ۱

۱- ۱ طرح موضوع..... ۲

۱- ۲ هدف از تحقیق حاضر..... ۶

۱- ۳ فصل بندی پایان نامه..... ۷

فصل دوم پیشینه و کلیات..... ۸

۲- ۱ جریان غیر ماندگار..... ۹

۲- ۲ پدیده ضربه قوچ..... ۱۱

۲- ۲- ۱ تعریف ضربه قوچ..... ۱۱

۲- ۲- ۲ تاریخچه ضربه قوچ..... ۱۲

۲- ۳ پدیده اندرکنش سیال- سازه..... ۱۴

۲- ۳- ۱ تعریف پدیده FSI..... ۱۴

۲- ۳- ۲ روشهای کوپله حل مسائل FSI..... ۱۶

۲- ۳- ۳ مکانیزم های کوپله..... ۱۷

۲- ۳- ۴ تاریخچه پدیده اندرکنش سیال و سازه..... ۱۹

۲- ۴ روشهای عددی؛ روش عددی گودونو..... ۲۴

۲- ۴- ۱ مقدمه..... ۲۴

۲- ۴- ۲ سابقه مطالعاتی روشهای عددی..... ۲۵

۲- ۴- ۳ روش احجام محدود گودونو..... ۲۸

فصل سوم شرح روش عددی گودونو..... ۳۳

۳- ۱ مقدمه..... ۳۴

۳- ۲ روشهای احجام محدود..... ۳۴

۳- ۳ روش عددی گودونو..... ۳۹

۳- ۳- ۱ گسسته سازی..... ۴۱

۳- ۳- ۲ نحوه محاسبه فلاکسهای عددی..... ۴۲

۳- ۳- ۳ انتخاب اندازه گام زمانی و محدودیت پایداری..... ۴۳

۳- ۳- ۴ نحوه در نظر گرفتن ترم منبع در روش عددی گودونو..... ۴۵

۳- ۴ نحوه بدست آمدن فرمولاسیون بقایی گودونو گودونو..... ۴۶

۳- ۵ فرم تفاضل محدود روش عددی گودونو..... ۵۰

۳- ۶ گامهای متشکل الگوریتم گودونو..... ۵۲

فصل چهارم حل مسائل عددی و مقایسه نتایج..... ۵۴

۴- ۱ طرح مساله ۵۵

۴- ۲ شرح مساله و معرفی معادلات حاکم..... ۵۵

۴- ۲- ۱ بیان معادلات حاکم..... ۵۵

۴- ۲- ۲ بیان شرایط مرزی..... ۶۰

۴- ۳ بررسی و حل مثالهای عددی..... ۶۱

۴- ۳- ۱ مساله مدل ضربه قوچ..... ۶۱

۴- ۳- ۲ مساله مرجع اول آزمایشگاه delft در حالت اثر کوپله اتصال..... ۶۹

۴- ۳- ۳ مساله مرجع اول آزمایشگاه delft در حالت اثر کوپله پواسن..... ۷۷

۴- ۴ تفسیر نمودارها و نتیجه گیری..... ۷۹

۴- ۵ جزئیات کدنویسی..... ۸۱

فصل پنجم خلاصه، نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۸۵

۵- ۱ خلاصه..... ۸۵

۵- ۲ نتیجه گیری..... ۸۵

۵- ۳ پیشنهادات.....۸۶

پیوست الف مسائل ریمان.....۸۹

الف - ۱ تعریف مساله ریمان.....۹۰

الف - ۲ بررسی الگوریتم حل مسائل ریمان.....۹۱

الف - ۳ بررسی حل مساله ریمان برای یک سیستم معادلات.....۹۵

الف-۳- ۱ استفاده از بسط مقادیرثابت U_L و U_R.....۹۶

الف-۳-۲- استفاده از روابط پرش و ثوابت عمومی ریمان.....۱۰۰

الف - ۴ بررسی حل مساله ریمان برای یک معادله اسکالر.....۱۰۴

مراجع.....۱۰۸

فهرست اشکال

شکل ۳- ۱- توزیع متغیر درون سلولها..... ۴۰

شکل ۳- ۲- گسسته سازی در روش احجام محدود..... ۴۱

شکل ۳- ۳- تفسیر شماتیک شرط پایداری برای موج p ام..... ۴۴

شکل ۳- ۴- مسائل ریمانی به ازای سرعت موج مثبت برای یک معادله اسکالر..... ۴۸

شکل ۳- ۵- نمایش گامهای گوناگون الگوریتم روش عددی احجام محدود گودونو..... ۵۳

شکل ۴- ۱- ساختار مساله ریمانی در نقطه x_0..... ۶۳

شکل ۴- ۲- نمای شماتیک سلول اول محاسباتی..... ۶۶

شکل ۴- ۳- نمودار محاسبه دبی شیر در مثال عددی ضربه قوچ با روش گودونو و روش MOC..... ۶۸

شکل ۴- ۴- ساختار مساله ریمان برای مثال عددی پدیده FSI در حالت کوپله اتصال..... ۷۲

شکل ۴- ۵- نمای شماتیک سلول آخر محاسباتی..... ۷۵

شکل ۴- ۶- نمودار محاسبه هد فشاری در گره شیر در مثال عددی پدیده FSI در حالت کوپله اتصال با روش عددی گودونو و روش MOC..... ۷۷

شکل ۴- ۷- نمودار محاسبه فشار در گره شیر در مثال عددی پدیده FSI در حالت کوپله پواسن با روش عددی گودونو با روش MOC..... ۷۹

شکل الف- ۱- ساختار حل مساله ریمان برای یک سیستم خطی m×m معادلات هذلولوی با ضرایب ثابت.....۹۳

شکل الف- ۲- ساختار انواع امواج شکل گرفته در معادلات هذلولوی.....۱۰۱

شکل الف- ۳- حجم کنترل شامل موج تکانه ۱۰۲

شکل الف- ۴- تعریف مساله ریمان برای معادله اسکالر.....۱۰۵

شکل الف- ۵- نمای شماتیک حل مساله ریمان برای یک معادله اسکالر هذلولوی.....۱۰۷

فهرست جداول

جدول ۴- ۱- مشخصات مثال عددی ضربه قوچ ۶۲

جدول ۴- ۲- مشخصات مثال عددی پدیده FSI در حالت کوپله اتصال..... ۷۰

فهرست علائم

مساله ریمان	R_P
متغیر اصلی	U
متغیر مشخصه	W
نشانگر بعد زمان	n
نشانگر بعد مکانی	i
بعد مکانی مش	Δx
بعد زمانی مش	Δt
سرعت موج	λ
عدد کورانت	Cr
بردار ویژه	K
ارتفاع پیزومتری	H
سرعت سیال	V
ضریب اصطکاک	f
قطر داخلی لوله	D
ضریب پواسن	υ
جرم مخصوص مصالح لوله	ρ_t

دانسیته سیال	ρ_f
ضخامت دیواره لوله	e
مدول یانگ	E
دبی سیال	Q
سرعت محوری لوله	$\dot{u}_z$
تنش محوری لوله	σ_z
سطح مقطع سیال	A_f
ترم منبع	$S(U)$
تابع فلاکس عددی	$F(U)$
ماتریس ضرایب	$A(U)$
سرعت موج فشاری	c_f
سرعت موج برشی	c_t

فصل اول

مقدمه

۱-۱-طرح موضوع

در بخش هایی از حوزه های علوم فیزیکی و شاخه های مهندسی، شاهد مسائل انتشار امـواج هسـتیم. میتوان از این دسته، به مثالهایی چون جریان ترافیک، دینامیک گازها، جریانات گذرای سیال در شبکه توزیع شهری، مسائل چند فازی، حرکت آبهای سطحی و حمل مواد معلق در سیالات اشـاره نمـود. از جمله این مسائل، پدیده اندرکنش سیال – سازه[1] میباشد که به علت اثـرات مخربـی کـه میتوانـد در سیستم های توزیع سیال ایجاد کند، بررسی دقیق و. همه جانبه آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

این پدیده که دامنه وسیعی از علوم مختلف را از مهندسی عمران گرفته تا صنایع تولید انرژی، صـنایع شیمیایی و نفت، هوانوردی و حتی علومی مانند زیست شناسی (حرکت خون در بدن انسـان)، شـامل میشود، در سیستم های توزیع سیال میتوان به عنوان بیان کننده تبادل انرژی میان سیال متحـرک و سازه غیر قابل تغییر شکل تفسیر کرد که میزان این تبادل انرژی تا حد زیادی بـه مقاومـت سـازه در برابر عدم تغییر شکل بستگی دارد (سختی[2]).

اما از نظر فیزیکی، تشکیل این پدیده در اثر ایجاد جریان گذرایی همچون ضربه قـوچ در سـیال درون سیستم است که این مساله، نیروهای قابل ملاحظه ای به سیستم سازه ای شبکه، وارد و ایـن نیروهـا

1- Fluid-Structure interaction (FSI)

2- Stiffness

باعث حرکت و ارتعاش این سیستم میشوند. لکن در مرحله بعد این نیروهای سازه ای هستند که با تاثیر گذاری متقابل بر امواج فشاری سیال مجدداً بر پارامترهای هیدرولیکی سیال تاثیر می گذارند. در نتیجه این فعل و انفعالات، اثرات تخریبی و ویران کننده زیادی به سیستم سازه ای وارد میگردد که

بی توجهی به آنها، عواقب بسیاری را به همراه می آورد. بهمین دلیل اثرات پدیده FSI در حین شرایط وقوع جریان گذرا در سیستمهای توزیع سیال، همواره مورد توجه دقیق محققین و پژوهشگران بوده است و چنانکه در فصل دوم بیان خواهد شد، تاریخچه مطالعاتی این پدیده دامنه وسیعی از تحقیقات و مطالعات را به خصوص در طی پنجاه سال اخیر، در بر می گیرد.

از اینرو با توجه به مدل ریاضیاتی پدیده FSI و معادلات حاکم بر مساله اندرکنش سیال- سازه که از نوع معادلات دیفرانسیل پاره ای[1] هذلولوی[2] میباشند، بحث ما در این پایان نامه معطوف به روشهای حل معادلات هذلولوی می باشد. از جمله روشهای رایج و متداول جهت حل سیستم معادلات هذلولوی، روش خطوط مشخصه[3] است. با وجودیکه این روش در بسیاری از مسائل هذلولوی کاربرد دارد و به عنوان ابزاری مناسب جهت بررسی این معادلات شناخته شده است، لکن در برخی موارد با محدودیتهایی همراه است. از جمله این محدودیتها میتوان به استفاده از این روش در مسائل سه بعدی و یا مسائلی اشاره نمود که در آنها با جملات غیر خطی سر و کار داریم.

در واقع این روش بصورت خاص برای تحلیل و آنالیز مدلهای ریاضیاتی خطی با ماتریس ضرایب ثابت[4] جوابهای با دقت مناسبی را به دست میدهند. در این مدلها سرعت امواج موجود در مساله مقادیر ثابتی هستند و وابسته به متغیر نمی باشند.

1- Partial Differential Equations (PDEs)

2- Hyperbolic Systems of PDEs.

3- Method Of Characteristics (MOC)

4- Constant Coefficient Linear Models

از سوی دیگر غالباً سیستمها و مدلهای ریاضی مسائل انتشار امواج به صورت غیر خطی میباشند و یا با مواردی روبرو میشویم،که سرعت امواج موجود درحل مقادیر ثابتی نمیباشند. از این دسته امواج میتوان موج شوک[1] را مثال زد. در تمامی این موارد روش مشخصه کارآیی خود را به عنوان یک ابزار قوی از دست میدهد؛ و استفاده از آن با پیچیدگی و اتلاف وقت بسیار همراه میشود.

میتوان برای نمونه به بحث انتقال گرما اشاره نمود؛ در سیستمهای گرمایشی که از مایع تحت فشار پرحرارت و داغی جهت انتقال گرما بین منبع گرما و تولید کننده هوای گرم، استفاده میشود، مدلهای غیر خطی و پیچیده تری برای توضیح جریان گذرا، مطرح میگردند و اصولاً با وارد کردن ترمهای انتقال گرما به مساله، با مدلی غیرخطی روبرو هستیم که نمیتوان به سادگی آن را با روش MOC حل نمود[۱۶]. همچنین میتوان از مواردی نام برد که به عنوان جزئیات مساله در برخی موارد حضور دارند و باعث میشوند تا ماتریس ضرایب مدل ریاضی مساله به صورت غیر ثابت و متغیر در آید. به طور کلی مواردی همچون وجود تغییرات هندسی در سیستم سازه ای یا تغییر خواص مصالح لوله در برخی از قسمتهای مسیر آن، و یا افزودن ترمهایی که شبیه سازی پدیده FSI را در هر سیستم لوله با شکل و هندسه دلخواه مقدور میسازد، همگی نیاز به مدلسازی های عددی بیشتر را به صورت یک امر ضروری در می آورند که استفاده از روش MOC در این موارد را بسیار پیچیده و گاهاً غیر ممکن میسازد[۲۰]. دلیل عمده این امر میتواند بروز ناپیوستگیهایی در حل مسائل و مدلهای غیر خطی باشد که این ناپیوستگیها به صورت امواجی با سرعت های متغیر (موج شوک) در حل ظاهر میشوند و در این موارد دیگر با امواج با سرعت ثابت سرو کار نداریم و در نتیجه نمیتوان از فرضیاتی همچون ثابت بودن متغیر مشخصه در امتداد خطوط مشخصه استفاده کرد.

همچنین نتایج مطالعات دانشمندان در سالهای اخیر نشان داده، استفاده از روشهای غیر بقایی یا

1- Shock Wave

تفاضل محدود نیز در مواردی همچون مثالهای فوق میتواند باعث بروز خطاهایی هم در دامنه امواج و هم درسرعت آنها شود[۴۸]. هرچند نمیتوان منکر این واقعیت شد که استفاده از روشهای عددی تفاضل محدود[۱] بخصوص در مواردی همچون مدلهای سه بعدی و یا حتی دو بعدی و یا مش بندیهای منظم، بر استفاده از روشهای عددی احجام محدود[۲] برتری دارد و با سادگی و سرعت بیشتری به جوابهای صحیح همگرا میشوند.

با این توضیحات، استفاده از روش بقایی یا احجام محدود صریح و بالادست گودونو [۳] به عنوان یک جایگزین جدی برای روشهای غیر بقایی و روش مشخصه مطرح میگردد. علاوه برمزیتی که این روش همچون سایر روشهای احجام محدود در قابلیت استفاده در قلمروهای پیچیده و مش های نامنظم دارد، به صورت خاص میتوان از این روش جهت تحلیل و حل کلیه مسائل هذلولوی اعم از خطی و غیر خطی و مدلهای ریاضی با و بدون ضرایب ثابت استفاده نمود و از این نظر بر روش مشخصه رجحان می یابد.

در حقیقت این روش عددی که توسط گودونو، برای غلبه برکمبودها و محدودیتهای روش مشخصه، ابداع شد، حل مساله را از همان ابتدا به صورت ناپیوسته در نظر میگیرد. برای این منظور در این روش، از طریق تعریف مسائل مقدار اولیه ای به نام مساله ریمان در محل مرزهای دو طرف سلولهای محاسباتی، از همان ابتدا ناپیوستگی در محل مرزهای بین سلولهای مش در نظر گرفته شده و در گامهای بعدی از طریق موازنه های صورت گرفته در مرزها، کار پیش میرود. براین اساس، حتی حلهای پیوسته و هموار که ناشی از مدلهای خطی و با ضرایب ثابت می باشند، در روش عددی گودونو، به

1- Finite Difference Method

2- Finite Volume Method

3 - Explicit Upwind Godunov Method

صورت حالت خاصی از یک حل ناپیوسته در نظر گرفته میشوند.

۱-۲-هدف از تحقیق حاضر

با توجه به اینکه مزیت عمده روش عددی گودونو نسبت بـه روش مشخصـه، امکـان تحلیـل مـدلهای غیرخطی میباشد، لکن در این تحقیق، پدیده اندرکنش سیال- سـازه از طریـق در نظـر گـرفتن یـک سیستم مخزن- لوله- شیر که لوله مستقیم میباشد، به صورت یک مساله خطی با روش گودونو مـورد تحلیل قرار میگیرد. هدف از این تحلیل، در درجه نخست بررسی میزان توانمندی روش عـددی فـوق الذکر در زمینه تحلیل مدلها و مسائل خطی بوده است که نقطه قوت روش مشخصه میباشد.

همچنین مقایسه روش عددی گودونو با روش خطوط مشخصه و بررسی این مطلب که آیـا میتـوان از روش گودونو به عنوان یک گزینه مناسب و قابل رقابت با روش مشخصه در مدلهای خطـی نیـز سـود برد یا خیر، از اهداف اصلی این تحقیق به شمار میرود.

برای این منظور، ابتدا با ذکر یک مثال عددی به تحلیل و حل معادلات ضربه قوچ در حالـت سـاده بـا روش گودونو پرداخته شده و پس از آن مساله مرجع اول آزمایشگاه Delft [1] که به عنوان یـک مسـاله مرجع بارها در مقالات متعدد علمی مورد بحث و تحلیل قرار گرفته اسـت، در دو حالـت اثـر مکـانیزم کوپله پواسن و اتصال با روش عددی گودونو حل شده است و نتایج حاصل از آن با نتایج مشابهی کـه توسط روش مشخصه بدست آمده و بر حل تحلیلی این مساله مطابقت بسیار خوبی دارد، مقایسه شده است.

به طورکلی، تمام آنچه در مورد روش پرکاربرد گودونو به عنوان یک روش احجام محدود بایـد بـدانیم،

1- Delft Hydraulic Benchmark Problem A