بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

مدل‌سازی عددی دو بعدی/ با تقارن محوری تعامل یک جسم جامد تغییر شکل‌پذیر با یک سیال تراکم‌ناپذیر با استفاده از روش نسبت حجمی سیال

نگارش:

حامد اسماعیل‌زاده خسرویه

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنما:

دکتر محمد پسندیده‌فرد

بهمن ماه ۱۳۹۱

تقدیم به:

مادرم، که زندگی‌ام میوه ایثار اوست و موفقیتم حاصل نیایش‌های شبانگاهی‌اش. او که در تنگنای زندگی همراه و همراز من بوده است.

پدرم، که حمایت‌های بی‌دریغش اطمینان‌بخش دنیای نگرانی‌هایم است. او که دست‌هایش همیشه دستیارم بوده است.

برادرانم، که لحظات زندگی‌ام سرشار از شادی‌ها و دوستی‌های بی‌پایان آن‌ها بوده است.

دکتر محمد پسندیده فرد، که عشق به کردار او مرا شیفته تحقیق و پژوهش نمود و راهنمایی‌هایش راه‌گشای کارهای من بوده است.

تشکر و قدردانی

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم که مراتب تشکر و قدردانی خود را از استاد راهنمای عزیزم، جناب آقای دکتر محمد پسندیده‌فرد، اعلام دارم که تنها با حمایت کامل و بی‌دریغ ایشان امکان پیش‌برد این پژوهش فراهم شد.

همچنین از آقا و خانم دکتر یزدی که در طول چند سال اخیر مشوق و راهنمای من در تحصیل بوده‌اند، تشکر می‌کنم.

در پایان، از پدر و مادر عزیزم تشکر می‌کنم که همواره پشتیبان و مایه آرامش من بوده‌اند.

تأییدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: **حامد اسماعیل‌زاده خسرویه** امضا:

تاریخ:

استاد راهنما: **دکتر محمد پسندیده‌فرد** امضا:

تاریخ:

صورت‌جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

پایان‌نامه حاضر تحت عنوان:

مدل‌سازی عددیِ دو بعدی/ با تقارن محوری تعاملِ یک جسم جامد تغییر شکل‌پذیر با یک سیالِ تراکم‌ناپذیر با استفاده از روش نسبت حجمی سیال

که توسط آقای **حامد اسماعیل‌زاده خسرویه** تهیه و به هیات داوران ارائه گردیده است به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته در گرایش تبدیل انرژی، مورد تأیید کمیته تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

تاریخ دفاع: **۱۳۹۱/۱۱/۱۴** نمره: **۲۰** درجهٔ ارزشیابی: **عالی**

اعضای هیات داوران:

نام و نام‌خانوادگی	هیات داوران	مرتبه علمی	امضا
دکتر محمد پسندیده‌فرد	استاد راهنما	دانشیار	
دکتر محمد باقر آیانی	استاد دفاع	استادیار	
دکتر محمد جواد مغربی	استاد دفاع	دانشیار	
دکتر محمد باقر آیانی	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	

فرم چکیده پایان‌نامه تحصیلی دوره تحصیلات تکمیلی

عنوان پایان نامه: **مدل‌سازی عددی دو بعدی/ با تقارن محوری تعامل یک جسم جامد تغییر شکل‌پذیر با یک سیال تراکم‌ناپذیر با استفاده از روش نسبت حجمی سیال**

دانشجو: **حامد اسماعیل‌زاده خسرویه**

استاد راهنما: **دکتر محمد پسندیده‌فرد**

دانشکده: **مهندسی** گروه: **مکانیک** گرایش: **تبدیل انرژی**

مقطع تحصیلی: **کارشناسی ارشد** تاریخ دفاع: **بهمن‌ماه ۱۳۹۱** تعداد صفحات: **۱۲۵**

واژه‌های کلیدی: تعامل سیال-جامد، ماده هایپرالاستیک، روش نسبت حجمی سیال، حل عددی، پردازش تصویر

چکیده:

در تحقیق حاضر، مدل‌سازیِ عددی شبیه‌سازی برهمکنش بین یک جسم جامد تغییر شکل‌پذیر دو بعدی/ با تقارن‌محوری و محیط سیال توسعه داده شده است. جسم جامد به‌صورت یک ماده هایپرالاستیک در نظر گرفته شده است که کاربردهای فراوانی در سیستم‌های بیولوژیکی دارد. مدل توسعه‌یافته از روش اویلری برای سیال و جسم جامد تغییر شکل‌پذیر و از روش نسبت حجمی سیال برای تعیین موقعیت جسم جامد بهره می‌برد. برای محاسبات مربوط به جسم جامد از یک تانسور کرنش استفاده شده است که در هر گام زمانی، توسط یک رابطه انتقال محاسبه می‌گردد. بر اساس مقادیر کرنش به‌دست آمده و نیز معادله مشخصه جسم جامد، تنش‌های الاستیک در جسم جامد قابل محاسبه می‌باشند. این عبارت که فقط در ناحیه جامد دارای مقداری غیر صفر است، به معادلات حاکم بر سیال افزوده می‌شود.

تنش‌های الاستیک در فصل مشترک سیال- جامد دارای ناپیوستگی می‌باشند، لذا شرط مرزی دینامیکی به طور کامل برقرار نخواهد بود. به منظور بهبود شرط مرزی، ویسکوزیته در جسم جامد افزایش یافته است که این امر تأثیر تنش‌های الاستیک در فصل مشترک سیال-جامد را کاهش داده و سبب پایداری شبیه‌سازی می‌شود. محاسبات تنش الاستیک در مدل عددی با استفاده از هر دو طرح صریح و شبه‌ضمنی انجام شده‌اند.

به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، آزمایشِ تجربی انجام شد که در آن حرکت جسم جامد تغییر شکل‌پذیرِ کروی در هوا و برخورد آن با سطح صلب بررسی شد. در این آزمایش، از یک دوربین CCD برای گرفتن عکس از حرکت جسم جامد استفاده شد. در ادامه، روش پردازشِ تصویر به منظور به‌دست آوردن داده‌های مورد نیاز استفاده گردید. همین مورد با استفاده از برنامه عددیِ توسعه‌یافته نیز شبیه‌سازی شد و نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند.

اعتبارسنجی بیشتر مدل، با مقایسه نتایج شبیه‌سازیِ برهمکنش سیال-جامد با دیگر نتایج عددی موجود در منابع صورت پذیرفت. این موارد شامل، تغییر شکل یک دیواره تغییر شکل‌پذیر تحت تاثیرِ جریان سیال در یک حفره دو بعدی، حرکت جسم جامد تغییر شکل‌پذیر در یک حفره دو بعدی، حرکت یک دیسک تغییر شکل‌پذیر در محیط یک سیال با اعمال حرکت اولیه نوسانی و حرکت یک ماده هایپرالاستیک در جریان برشی متغیر با زمان می‌باشند. در همه موارد، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق و دیگر نتایج عددی موجود در منابع تطابق خوبی دارند.

امضا استاد راهنما

فهرست

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	۲
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ مواد هایپرالاستیک	۴
۱-۳ حالت‌های مختلف حرکت جسم جامد در محیط سیال	۵
۱-۴ مدل‌سازی حرکت جسم جامد تغییر شکل‌پذیر در محیط سیال	۶
۱-۴-۱ رویکرد لاگرانژی-لاگرانژی	۱۰
۱-۴-۲ رویکرد اویلری-لاگرانژی	۱۲
۱-۴-۳ رویکرد اویلری-اویلری	۱۳
۱-۵ پژوهش حاضر	۱۵
۱-۶ دورنمای پایان‌نامه	۱۷
فصل دوم: معادلات حاکم و مدل‌سازی عددی	۲۰
۲-۱ مقدمه	۲۰
۲-۲ فرضیات و معادلات حاکم	۲۱
۲-۲-۱ فرضیات	۲۱
۲-۲-۲ معادلات ناویر-استوکس	۲۱
۲-۲-۳ روش نسبت حجمی سیال	۲۲
۲-۲-۴ شرایط مرزیِ جریان سیال	۲۶
۲-۲-۵ جسم جامد تغییر شکل‌پذیر	۲۷

۲-۳ گسسته‌سازی معادلات حاکم ۲۸
۲-۳-۱ روش تجزیه سه مرحله‌ای ۲۸
۲-۳-۲ گسسته‌سازی جمله‌ی جابه‌جایی ۳۰
۲-۳-۳ گسسته‌سازی ترم ویسکوزیته ۳۲
۲-۳-۴ تنش الاستیک ۳۶
۲-۳-۴-۱ اثبات رابطه انتقال ۳۶
۲-۳-۴-۲ مدل‌های بررسی شده‌ی مواد هایپرالاستیک ۳۸
۲-۳-۴-۳ گسسته‌سازی صریح جمله‌ی الاستیک ۳۹
۲-۳-۴-۴ گسسته‌سازی شبه‌ضمنی جمله‌ی الاستیک ۴۱
۲-۳-۵ معادله تفاضلی فشار ۴۵
۲-۳-۶ ردیابی حجمی ۴۷
۲-۳-۷ ملاحظات پایداری ۴۹
۲-۳-۸ نمودار مراحل انجام محاسبات ۵۰
فصل سوم: روش تجربی ۵۳
۳-۱ مقدمه ۵۳
۳-۲ روش آزمایش ۵۴
۳-۳ روش پردازش تصویر ۵۶
فصل چهارم: ارائه نتایج ۶۲
۴-۱ مقدمه ۶۲
۴-۲ حرکت یک جسم کروی تغییر شکل‌پذیر در محیط سیال و ضمن برخورد با یک سطح صلب ۶۳

۴-۳ تغییر شکل یک دیواره‌ی تحت تاثیر جریانِ سیال در یک حفره‌ی دو بعدی ۷۵
۴-۴ حرکت یک جسم جامد تغییر شکل‌پذیر در یک حفره‌ی دو بعدی ۷۸
۴-۵ حرکت یک دیسک تغییر شکل‌پذیر در محیط یک سیال با حرکت اولیه نوسانی ۸۳
۴-۶ ماده هایپرالاستیک در جریان برشی متغیر با زمان ۸۸
فصل پنجم: جمع‌بندی و ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۹۵
۵-۱ جمع‌بندی ۹۵
۵-۲ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۹۷
منابع و مآخذ ۱۰۲
پیوست ۱۰۸
پیوست الف: صحت ابزار اندازه‌گیری ۱۰۸
پیوست ب: محاسبه مقادیر تانسور کرنش و تنش الاستیک در حالت صریح و شبه‌ضمنی ۱۰۸
ب-۱ گسسته‌سازی صریح تنش الاستیک ۱۰۹
ب-۲ گسسته‌سازی شبه‌ضمنی تنش الاستیک ۱۱۵
پیوست ج: برنامه پردازش تصویر برای به‌دست آوردن موقعیت مرکز حجم جسم جامد ۱۲۰
ج-۱ برنامه کالیبراسیون عکس‌ها با استفاده از قطعه‌ی کالیبراسیون ۱۲۰
ج-۲ برنامه عددی تعیین موقعیت مرکز حجم جسم جامد قبل و بعد از برخورد جسم کروی با سطح صلب ۱۲۱
ج-۳ برنامه عددی تعیین موقعیت مرکز حجم جسم جامد ضمن برخورد جسم کروی با سطح صلب ۱۲۲

نمادها

ضرایب ثابت در معادلات شبه‌ضمنی	a, b, c
تانسور تغییر شکل کوشی-گرین چپ	B
تانسور تغییر شکل کوشی-گرین راست	C
ضرایب موجود در معادله مشخصه جسم جامد	c_1,c_2,c_3
سمت راست معادله شبه‌ضمنی جمله ویسکوزیته و جمله الاستیک	D^*
دترمینان ماتریس	det
تانسور کرنش گرین-لاگرانژ	E
انرژی جنبشی	E_k
تانسور گرادیان کرنش	F
شتاب جاذبه	$\vec{\mathrm{g}}$
ضریب الاستیک برشی در مدل نئوهوکین	G
بردار یکه در جهت افقی x	$\hat{\imath}$
ماتریس یکه	I
تانسور ژاکوبین مرتبه چهار	J
بردار یکه در جهت عمودی y	$\hat{J}$
تانسور گرادیان سرعت	L
بردار یکه عمود بر سطح	$\hat{n}_\perp$
فشار	P
فاصله شعاعی از محور تقارن در مختصات استوانه‌ای	r^δ
عدد رینولدز	Re
تنش پایولا-کرشاهف	S
عدد پایداری الاستیک	Se
تابع پله بر اساس شار سرعت در جهت افقی	S_u
تابع پله بر اساس شار سرعت در جهت عمودی	S_v
زمان (ثانیه s و میلی‌ثانیه ms)	t
بردار یکه موازی سطح	$\hat{t}_\perp$
تریس ماتریس (مجموع المان‌های قطری ماتریس)	tr
مؤلفه افقی سرعت	u
شار سرعت افقی	u^{fl}
مؤلفه عمودی سرعت	v
شار سرعت عمودی	v^{fl}
بردار سرعت	$\vec{V}$
حجم جسم جامد	V_s

تابع انرژی کرنشی	W
محور مختصات افقی	x
محور مختصات عمودی	y
موقعیت مرکز حجم جسم جامد	$\bar{y}$

علائم یونانی

مقدار متغیر بین صفر تا ۱ در روش ون‌لیر	α
عملگر دلتا	$\vec{\nabla}$
ضخامت سلول در امتداد محور افقی	Δx
ضخامت سلول در امتداد محور عمودی	Δy
گام زمانی	Δt
حجم سلول	Ω
حجم سلول پس از انتقال تابع ϕ_s	$\Omega', \Omega"$
نشانگر مشتق جزئی	∂
ثابت جسم جامد در معادله ۲-۵۶	λ^s_{Lame}
ثابت جسم جامد در معادله ۲-۵۶	μ^s_{Lame}
ویسکوزیته دینامیکی	μ
ویسکوزیته سینماتیکی	ν
چگالی	ρ
تانسور تنش	$\overleftrightarrow{\tau}$
تانسور تنش ویسکوز	$\overleftrightarrow{\tau_v}$
تانسور تنش الاستیک	$\overleftrightarrow{\tau_e}$
مؤلفه‌ای از تانسور تنش	τ_{ik}
نسبت حجمی جامد	ϕ_s
مقدار میانی نسبت حجمی جامد	$\overline{\phi_s}$

زیرنویس‌ها

سلول در حوزه محاسباتی	$cell$
بردار یکه محور افقی	i
بردار یکه محور عمودی	j
مربوط به فاز سیال	f
مخفف سلول‌های همسایه	nb
مربوط به فاز جامد	s
نشانگر مؤلفه‌های تنش برشی ویسکوز و الاستیک	xx, xy, yy
نشانگر مؤلفه تنش الاستیک در راستای شعاعی	tt
علامت امتداد عمود بر سطح	$\perp$
علامت شرط مرزی تقارن	$\parallel$

بالانویس‌ها	
شار سرعت روی سطوح حجم کنترل	fl
نشانگر گام زمانی قبل	n
نشانگر دو گام زمانی قبل	$n\text{-}1$
نشانگر مؤلفه لزجت در سمت راست سلول	R
نشانگر مؤلفه لزجت در سمت راست و پایین سلول	RBC, BRC
نشانگر مؤلفه لزجت در سمت راست و بالای سلول	RTC, TRC
ترانهاده ماتریس	T
نشانگر نوع مختصات (دکارتی یا استوانه‌ای)	δ

علائم اختصاری

دستگاه مختصات لاگرانژی-اویلری دلخواه (Arbitrary Lagrangian Eulerian)	*ALE*
تعداد سلول در شعاع (Cell per Radius)	*CPR*
نیروی سطحی پیوسته (Continuum Surface Force)	*CSF*
سی‌تی‌اسکن (Computed Tomography scanning)	*CT scan*
مقدار نشان‌گر مختصات (cyl=1: Cylindrical, cyl=0: Cartesian)	*cyl*
فریم در ثانیه (Frame per Second)	*FPS*
برهمکنش سیال- جامد (Fluid Structure Interaction)	*FSI*
روش گرادیانِ مزدوجِ ناقصِ چالسکی (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Decomposition)	*ICCG*
روش مرز غوطه‌ور (Immersed Boundary Method)	*IBM*
مقدار بیشینه	*max*
مقدار کمینه	*min*
ام‌آرآی (Magnetic Resonance Imager)	*MRI*
تقریب قطعه به قطعه خطی سطح تماس (Piecewise Linear Interface Construction)	*PLIC*
معادله گسسته شده پواسون فشار (Pressure Poisson Equation)	*PPE*
گلبول‌های قرمز خون (Red Blood Cells)	*RBC*
روش تقریب خط راست سطح تماس (Simple Line Interface Construction)	*SLIC*
روش حل ماتریس سه قطری (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)	*TDMA*
روش نسبت حجمی سیال (Volume of Fluid)	*VOF*

فصل اول: مقدمه

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

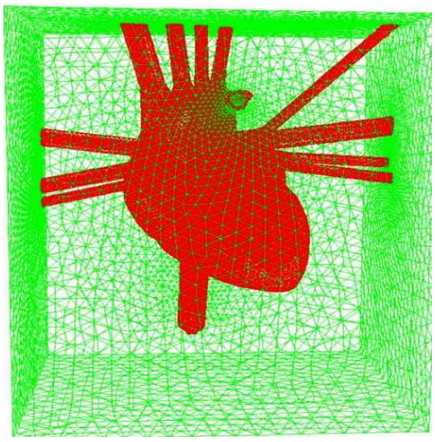
حرکت جسم جامد صلب و تغییر شکل‌پذیر در محیط سیال سال‌ها مورد مطالعه و بررسی محققین بوده است. هر چند این پدیده به ظاهر ساده و ابتدایی به نظر می رسد، اما به دلیل اهمیت و پیچیدگی‌های حاکم بر آن هنوز به‌صورت گسترده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این پدیده به خصوص در سیستم‌های بیولوژیکی[۱] (شکل ۱-۱الف)، ورود اجسام جامد به سیال (شکل ۱-۱ب)، رسوب اجسام جامد معلق در سیالات[۲] (شکل ۱-۱ج) و انیمیشن[۳] (شکل ۱-۱د) کابردهای گسترده‌ای دارد.

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی حرکت جسم جامد تغییر شکل‌پذیر در محیط سیال با استفاده از روش نسبت حجمی سیال[۴] مد نظر بوده است. جسم جامد تغییر شکل‌پذیر به‌صورت ماده هایپرالاستیک[۵] در نظر گرفته شده که عمدتاً در مطالعه سیستم‌های بیولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فصل حاضر ابتدا به طور

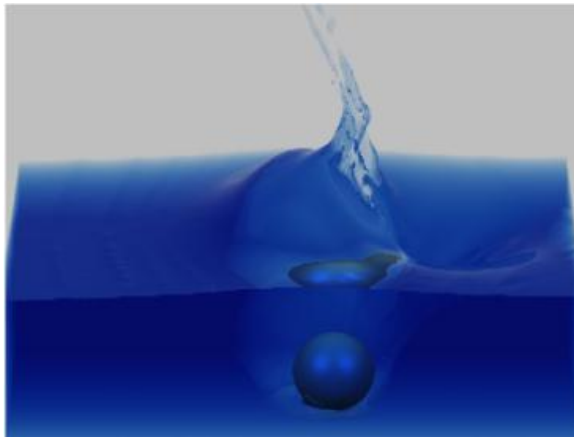
---

[1] Biological systems
[2] Sedimentation
[3] Animation
[4] Volume of Fluid (VOF)
[5] Hyperelastic material

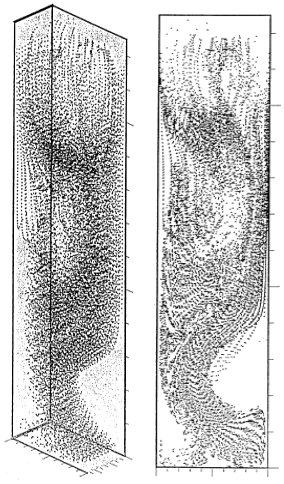
مختصر به معرفی مواد هایپرالاستیک پرداخته می‌شود. سپس به بررسی انواع مختلف حرکت جسم جامد تغییر شکل‌پذیر در محیط سیال پرداخته شده است. در ادامه، روش‌های حل عددی این گونه مسایل که اغلب با ضعف‌ها و مشکلات فراوانی همراه بوده‌اند، به اختصار ارائه می‌شوند. در انتهای این فصل نیز روش به کار رفته به منظور مدل‌سازی حرکت جسم جامد تغییر شکل‌پذیر معرفی و به اختصار توضیح داده می‌شود. به منظور اعتبارسنجی، نتایج عددی به‌دست آمده با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش و نیز نتایج عددی سایر مقالات، مقایسه شده‌اند.



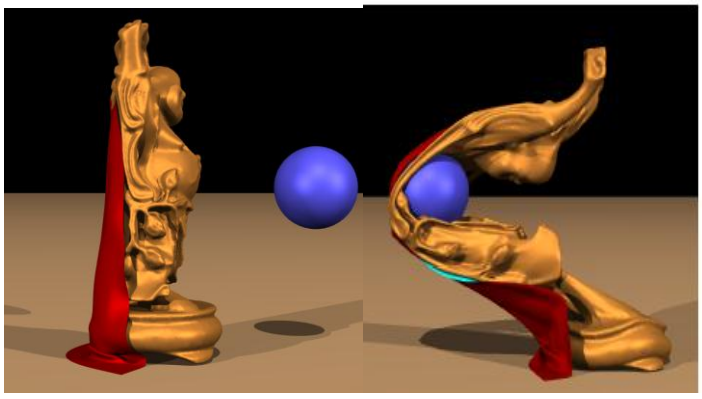
(الف)



(ب)



(ج)

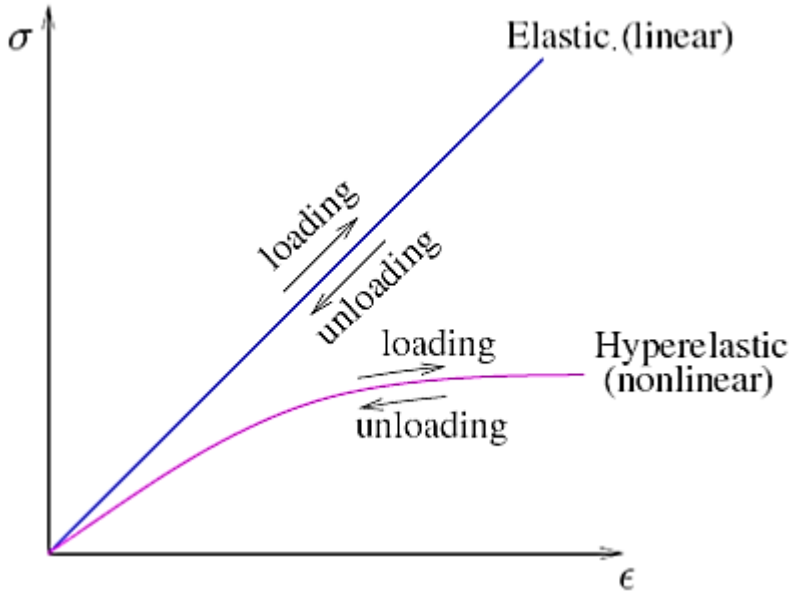


(د)

شکل ۱-۱ نمونه‌ای از کارهای انجام شده با استفاده از حل معادلات حاکم بر سیال به منظور (الف) مدل‌سازی قلب [۱]، (ب) ورود جسم جامد به سیال [۲]، (ج) رسوب ذرات معلق [۳] و (د) مدل‌سازی در صنعت انیمیشن [۴].

۲-۱ مواد هایپرالاستیک

مسئله اصلی در تئوری الاستیسیته[1]، یافتن رابطه تنش و کرنش در اجسام جامد، تحت تأثیر نیروهای وارد بر آن‌ها می‌باشد. قانون هوک[2] که توسط هوک در سال ۱۶۷۶ ارائه شد، رابطه خطی را بین تنش و کرنش بیان می‌کند. اما این قانون، رفتار صحیحی از موادی که تحت تغییر شکل‌های بزرگ قرار می‌گیرند و یا موادی که رابطه بین تنش و کرنش در آن‌ها غیر خطی است، ارائه نمی‌کند [۵]. مواد هایپرالاستیک برای بیان رفتار بسیاری از جامدات لاستیکی[3]، پلیمرها[4] و در سیستم‌های بیولوژیکی مانند بافت‌ها[5] به کار می‌روند. این مواد برای بیان رفتار اجسام جامدی به کار می‌روند که تحت نیروی کم تغییر شکل زیادی می‌دهند، ولی بعد از برداشتن بار دوباره به شکل اولیه خود باز می‌گردند. همچنین برای توضیح رفتار غیر خطی بسیاری از جامدات از این مواد استفاده می‌شود. در شکل ۱-۲، رابطه بین تنش و کرنش در مواد الاستیک خطی و مواد هایپرالاستیک تحت بارگذاری کششی، با یکدیگر مقایسه شده‌اند [۶].



شکل ۱-۲ نمودار تنش-کرنش برای مواد الاستیک خطی و مواد هایپرالاستیک [۶].

[1] Elasticity
[2] Hook's law
[3] Rubber
[4] Polymer
[5] Tissue

خواص یک ماده هایپرالاستیک توسط یک تابع انرژی کرنشی[1] W بیان شده که به کمک آن رابطه‌ی بین تنش و کرنش استخراج می‌شود. مدل‌های مختلفی برای بیان این تابع انرژی کرنشی معرفی شده که در این پژوهش سه مدل معروف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سه مدل، شامل مدل مونی-ریولین[2]، مدل نئوهوکین[3] و مدل سینت-ونانت[4] می‌باشند. در تمام این مدل‌ها ضرایبی وجود داشته که از طریق آزمایش به‌دست می‌آیند و برای هر ماده مقدار منحصر به فرد دارند. به علت اجتناب از طولانی شدن کلام، از بیان روابط جزئیات حاکم بر مواد هایپرالاستیک صرف نظر شده است. در فصل دوم رابطه نهایی بین تنش و کرنش در مواد هایپرالاستیک، برای سه مدل ذکر شده در بالا، بیان خواهد شد.

۳-۱ حالت‌های مختلف حرکت جسم جامد در محیط سیال

در مدل‌سازی مسایل برهمکنش سیال-جامد[5] سه حالت مختلف قابل بررسی است. تأثیرگذاری یک طرفه جسم جامد به سیال، تأثیرگذاری یک طرفه سیال به جسم جامد و تأثیرگذاری متقابل جسم جامد و سیال. در تأثیرگذاری یک طرفه جسم جامد به سیال، مکان و حرکت جسم جامد از پیش تعیین شده است. قرارگیری یک جسم جامد در مسیر حرکت سیال داخل کانال‌ها و یا حرکت یک جسم جامد با سرعت ثابت در محیط سیال نمونه‌هایی از این پدیده هستند. در صورتی که میزان غلظت و اندازه اجسام جامد در سیال به گونه‌ای باشند که مشخصه‌های سیال (سرعت، دما و ...) تحت تأثیر جسم جامد قرار نگیرند، تأثیرگذاری یک طرفه سیال به جامد را خواهیم داشت. حرکت غبار رقیق در جریان هوا از این دسته است. هنگامی‌که جسم جامد و جریان سیال هر دو در مشخصه‌های سرعتی و دمایی یکدیگر تغییر ایجاد نمایند، تأثیرگذاری متقابل سیال و جامد را خواهیم داشت. از این قبیل جریان‌ها به رسوب و معلق‌سازی اجسام جامد و یا حرکت جسم جامد در سیال بدون داشتن سرعت از پیش تعیین شده می‌توان اشاره نمود. این گونه جریان‌ها با توجه به این‌که معادلات حاکم بر سیال و

---

[1] Strain energy function
[2] Mooney-Rivlin model
[3] Neo-Hookean model
[4] Saint-Venant model
[5] Fluid-Structure Interaction (FSI)

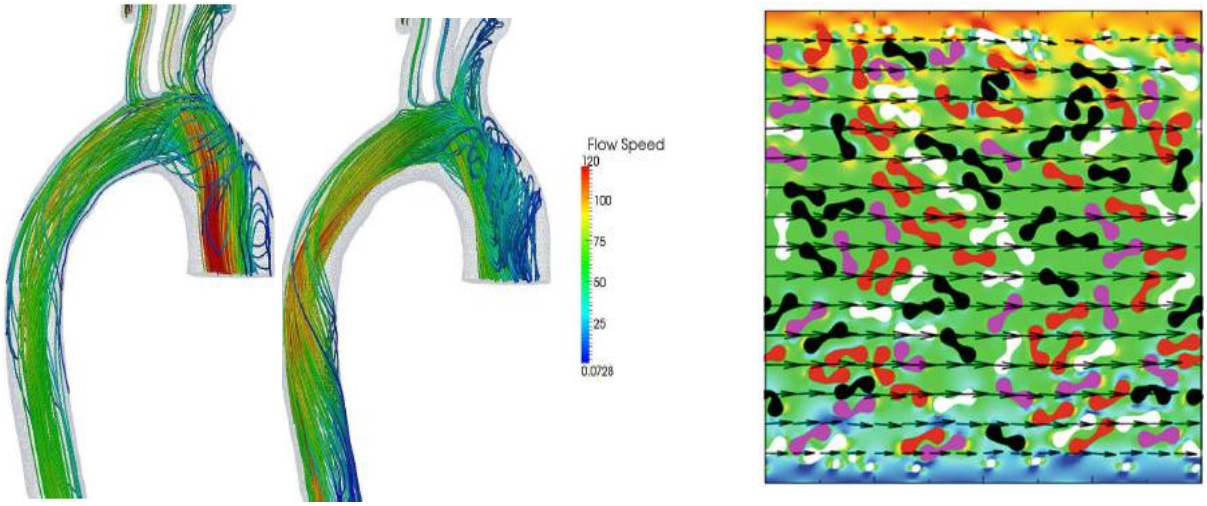
جسم جامد باید به طور همزمان در هر گام زمانی حل شوند، از پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به حالت‌های قبل برخوردار هستند. در تحقیق حاضر، هدف ارائه روشی به منظور بررسی این‌گونه از حرکت جسم جامد در محیط سیال است، به‌طوری‌که جسم جامد بتواند آزادانه در حوزه حل تحت تأثیر نیروهای وارده به آن حرکت نماید. در ادامه به بررسی روش‌های حل ارائه شده برای مدل‌سازی این‌گونه جریان‌ها می‌پردازیم.

۱-۴ مدل‌سازی حرکت جسم جامد تغییر شکل‌پذیر در محیط سیال

به دلیل وجود مرزهای متحرک پیچیده در مسایل مربوط به برهمکنش سیال-جامد، مدل‌سازی این‌گونه از پدیده‌ها همیشه چالش برانگیز بوده‌اند. این‌گونه مدل‌سازی‌ها نیاز به حل معادلات الاستیسیته غیر خطی، معادلات غیر خطی سیال و کوپل نمودن آن‌ها دارند. مسایل مربوط به برهمکنش سیال-جامد، در بسیاری از کاربردها با هندسه‌های پیچیده سروکار دارند.

به عنوان مثال، در پزشکی شبیه‌سازی حرکت گلبول‌های قرمز خون[1] (شکل ۱-۳الف) و مطالعه سیستم‌های عروقی[2] (شکل ۱-۳ب) نمونه‌هایی از پدیده برهمکنش سیال-جامد می‌باشند که در پژوهش‌های بسیار زیادی بررسی شده‌اند. مهمترین ویژگی رفتار مکانیکی عروق به عنوان یک جسم جامد تغییر شکل‌پذیر، رابطه غیر خطی بین تنش و کرنش است. لذا زمانی که تحت بارگذاری تغییر شکل می‌دهند، مدل‌سازی صحیح رفتار آن‌ها می‌تواند به تشخیص بیماری‌های قلبی-عروقی کمک نماید.

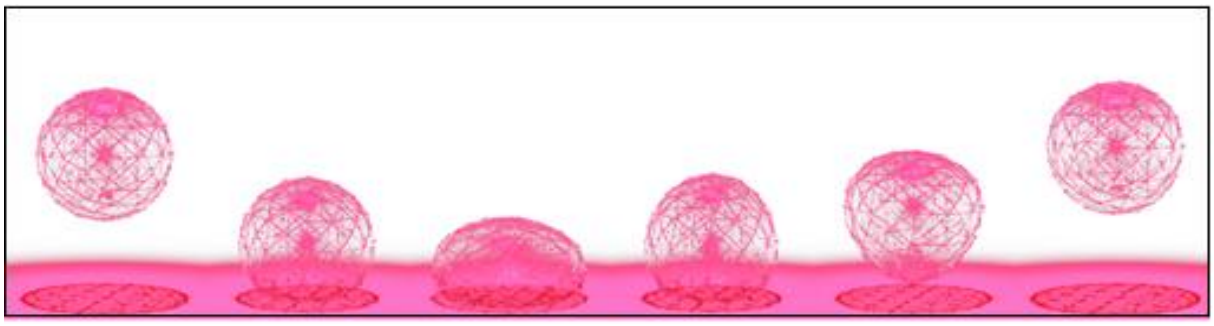
[1] Red Blood Cells (RBC)
[2] Vascular system



(ب) (الف)

شکل ۱-۳ (الف) شبیه‌سازی حرکت گلبول‌های قرمز خون [۲۳] و (ب) شبیه‌سازی خطوط جریان آئورت[1] در مرحله انقباض قلب[2] [۷].

در صنعت انیمیشن نیز شبیه‌سازی وقوع پدیده‌های طبیعی نظیر حرکت اجسام (شکل ۱-۴) و شبیه‌سازی حرکت حیوانات آبزی (شکل ۱-۵) مثال‌هایی از این پدیده پیچیده می‌باشند.



شکل ۱-۴ نمونه‌ای از برخورد اجسام تغییر شکل‌پذیر با سطح صلب و بازگشت آن در صنعت انیمیشن [۸].

[1]Aorta
[2]Systole