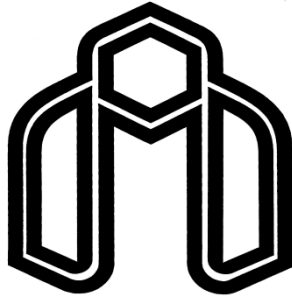


الله محمد



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

بررسی عددی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در حفره

نگارش:

امیر نقی خانی

استاد راهنما:

دکتر محمد محسن شاه مردان

استاد مشاور:

دکتر محمود نوروزی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

زمستان ۱۳۹۱



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :
تاریخ :
ویرایش :

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیر نقی‌خانی رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان « بررسی عددی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در حفره » که در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز : ۱۸.۷) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	محمد محسن شاه مردان	۱- استاد راهنمای اول
			۱- استاد راهنمای دوم
	استادیار	محمود نوروزی	۲- استاد مشاور
	استادیار	پوریا اکبرزاده	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	محسن نظری	۴- استاد ممتحن
	استادیار	علی جباری مقدم	۵- استاد ممتحن

قناد کهنوبی - رئیس دانشکده مکانیک



تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که همواره در تمام طول زندگی بزرگترین حامی، دلسوز، پشتیبان و
یاور من بوده‌اند و تحصیلاتم و تمام موفقیت‌هایم را مدیون محبت‌ها، راهنمایی‌ها و
زحمات آن بزرگواران هستم.

امیر نقی‌خانی

با سپاس از:

- آقای دکتر محمد محسن شاه مردان و آقای دکتر محمود نوروزی که با راهنمایی‌های گره‌گشایشان و تلاش‌هایی که در جهت دلگرم کردن و هدایت من در مسیر صحیح انجام دادند.
- کلیه اساتید گروه مکانیک که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم.

تعهد نامه

اینجانب **امیر نقی خانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان "**بررسی عددی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در حفره**" تحت راهنمایی دکتر محمد محسن شاه مردان و دکتر محمود نوروزی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

فهرست مطالب

فصل ۱. مقدمه و پیشینه تحقیق	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- طبقه بندی سیالات ویسکوالاستیک	۲
۳-۱- برخی رفتارهای سیال ویسکوالاستیک	۶
۱-۳-۱- تغییر شکل سطح آزاد یک سیال در حال چرخش	۶
۲-۳-۱- آماسیدگی جت	۷
۳-۳-۱- بازگشت فنی	۷
۴-۳-۱- تغییر جهت جریانهای ثانویه یک جریان در حال چرخش	۸
۴-۱- پیشینه تحقیق	۸
۱-۴-۱- حفره با سرپوش متحرک	۹
۱-۱-۴-۱- سیال نیوتنی	۱۰
۲-۱-۴-۱- سیال غیرنیوتنی	۱۲
۲-۴-۱- جریان سیال در کانال با یک حفره	۱۷
۱-۲-۴-۱- سیال نیوتنی	۱۷
۲-۲-۴-۱- سیال غیرنیوتنی	۱۸
۳-۲-۴-۱- سیال ویسکوالاستیک	۲۰
۵-۱- انتقال حرارت	۲۹
۶-۱- ضرورت پژوهش حاضر	۳۰
۷-۱- تحقیق حاضر و جنبه‌های نوآوری	۳۰
فصل ۲. معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت	۳۲
۱-۲- مقدمه	۳۳
۲-۲- پارامترهای بی بعد جریان	۳۳
۳-۲- معادلات حاکم بر جریان و شرایط مرزی مربوطه	۳۴
۴-۲- معادله حاکم بر انتقال حرارت و شرایط مرزی مربوطه	۳۶
۵-۲- معادله متشکله	۳۹
۱-۵-۲- معرفی مدل CEF	۳۹
۲-۵-۲- توابع ویسکومتريک	۴۱
۶-۲- چند قضیه معروف	۴۳
۷-۲- معادله متشکله سیال CEF در دستگاه مختصات دکارتی	۴۴
فصل ۳. روش عددی	۴۷
۱-۳- مقدمه	۴۸

- ۳-۲- تحلیل عددی جریانهای دائمی ۴۸
- ۳-۳- تولید شبکه محاسباتی ۴۹
- ۳-۴- گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت ۵۰
- ۳-۵- شکل گسسته معادلات حاکم ۵۲
- ۳-۶- شرایط مرزی جریان و انتقال حرارت ۵۵
- ۳-۷- پایداری عددی ۵۶
- ۳-۸- الگوریتم تحلیل ۵۷
- فصل ۴. بررسی نتایج ۶۰
- ۴-۱- مقدمه ۶۱
- ۴-۲- شرایط و الگوی همگرایی ۶۱
- ۴-۳- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه ۶۳
- ۴-۴- ارزیابی صحت نتایج ۶۴
- ۴-۵- حل میدان جریان ۶۶
- ۴-۶- حل میدان دما برای جریان ۸۵
- فصل ۵. نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۲
- ۵-۱- نتیجه گیری ۹۳
- ۵-۲- پیشنهادات ۹۴

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) طرح شماتیک جریان برشی ساده. ۴
- شکل (۲-۱) اعمال چرخش به سیال نیوتنی (N) - سیال ویسکوالاستیک (V) ۶
- شکل (۳-۱) تورم جت یک سیال ویسکوالاستیک در نزدیکی سر نازل ۷
- شکل (۴-۱) بازگشت فنری یک سیال ویسکوالاستیک ۷
- شکل (۵-۱) تغییر جهت جریان‌های ثانویه در عمق یک جریان در حال چرخش ۸
- شکل (۶-۱) شکل شماتیک حفره با سرپوش متحرک ۹
- شکل (۷-۱) مقایسه خطوط جریان دوبعدی برای سیال نیوتنی در حفره با سرپوش متحرک به ازای رینولدز ۰، ۱۰۰، ۴۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ ۱۱
- شکل (۸-۱) نمودار سرعت الف) u در امتداد خط $x = 0.5$ ب) v در امتداد خط $y = 0.5$ به ازای رینولدز ۱۰۰۰ ۱۲
- شکل (۹-۱) مقایسه خطوط جریان دوبعدی برای سیال نیوتنی تعمیم‌یافته و ویسکوالاستیک به ازای رینولدز ۱ و ۱۰۰ در حالت‌های مختلف مرزها الف) مرز بالا متحرک ب) مرز بالا و پایین متحرک (هم جهت) ج) مرز بالا و پایین متحرک (خلاف جهت هم) (جریان از چپ به راست) ۱۳
- شکل (۱۰-۱) نمودار سرعت الف) u در امتداد خط $x = 0.5$ ب) v در امتداد خط $y = 0.5$ به ازای رینولدز ۱۰۰ ۱۴
- شکل (۱۱-۱) مقایسه خطوط جریان دوبعدی برای سیال ویسکوالاستیک در حفره با سرپوش متحرک به ازای رینولدز ۱۰۰ ۱۵
- شکل (۱۲-۱) موقعیت مکانی مرکز گردابه اصلی به عنوان تابعی از عدد وایزنبرگ به ازای رینولدز ۱۰۰ ۱۶
- شکل (۱۳-۱) مقایسه خطوط جریان دوبعدی برای سیال نیوتنی در رینولدز ۱۰، ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰ ۱۸
- شکل (۱۴-۱) هندسه پژوهش بین و همکاران ۱۸
- شکل (۱۵-۱) الف) خطوط جریان ب) توزیع سرعت ۱۹
- شکل (۱۶-۱) مقایسه خطوط جریان برای سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در حفره مربعی با $Re = 5, 10$ ۲۰
- شکل (۱۷-۱) مقایسه خطوط جریان برای سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در حفره عمیق با $Re = 3, 6$ ۲۱
- شکل (۱۸-۱) مقایسه جریان برای سیال نیوتنی در حفره با $Re = 4.8E - 3, 1, 5, 10$ ۲۲
- شکل (۱۹-۱) مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی جریان برای سیال غیرنیوتنی در گذر از حفره با $De = 0.22, 0.38, 1.1, 2.4, 3.6, 7.5$ ۲۳
- شکل (۲۰-۱) شکل شماتیک هندسه پژوهش هسو و همکاران ۲۳

- شکل (۱-۲۱) مقایسه جریان برای سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در حفره با $Re = 20, 80, 165$ و $E = 0.0005$ ۲۴
- شکل (۱-۲۲) مقایسه جریان برای سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در حفره با $Re = 20, 80, 165$ و $E = 0.001$ ۲۵
- شکل (۱-۲۳) لزجت و اختلاف تنش عمودی اول سیال بوگر ۲۶
- شکل (۱-۲۴) توزیع تنش نرمال در اعداد وایزبرگ مختلف ۲۷
- شکل (۱-۲۵) خطوط جریان ب) توزیع سرعت ۲۸
- شکل (۲-۱) شکل شماتیک کانال با یک حفره ۳۵
- شکل (۳-۱) شبکه جابجاشده و نحوه تخصیص پارمترهای جریان و انتقال حرارت روی آن ۵۰
- شکل (۱-۴) نمونه‌ی تاریخچه همگرایی برای سیال نیوتنی ($n = 1$) ۶۲
- شکل (۲-۴) نمونه‌ی تاریخچه همگرایی برای سیال نیوتنی تعمیم یافته ($n = 0.7$) ۶۲
- شکل (۳-۴) مقایسه پروفیل سرعت سیال نیوتنی تعمیم یافته در مقطع خروجی به ازای $Re = 0.01$, $\lambda = 1$, $\eta_0 = 1$, $\eta_\infty = 0$ و $n = 0.8$ ۶۶
- شکل (۴-۴) خطوط جریان سیال نیوتنی تعمیم یافته در $Re = 20$ و به ازای $(n = 1, 0.9, 0.8, 0.7)$ ۶۷
- شکل (۴-۵) موقعیت مرکز گردابه اصلی به عنوان تابعی از توان نمایی n به ازای $Re = 20$ ۶۸
- شکل (۴-۶) توزیع سرعت محوری سیال نیوتنی تعمیم یافته در $y = 0$ به ازای $Re = 20$ و $(n = 1, 0.9, 0.8, 0.7)$ ۶۹
- شکل (۴-۷) توزیع سرعت عرضی سیال نیوتنی تعمیم یافته در $Re = 20$ و به ازای $(n = 1, 0.9, 0.8, 0.7)$ در مقطع $y = \frac{3}{2}$ ۷۰
- شکل (۴-۸) پروفیل سرعت سیال نیوتنی تعمیم یافته در $Re = 20$ و به ازای $(n = 1, 0.9, 0.8, 0.7)$ در مقطع $x = \frac{1}{2}$ ۷۰
- شکل (۴-۹) توزیع نرخ برش و لزجت بدون بعد سیال نیوتنی تعمیم یافته در $y = 0$ به ازای $Re = 20$ ۷۲
- شکل (۴-۱۰) پروفیل لزجت و نرخ برش بدون بعد سیال نیوتنی تعمیم یافته در مقطع $x = 16$ به ازای $Re = 20$ ۷۴
- شکل (۴-۱۱) توزیع فشار بدون بعد سیال نیوتنی تعمیم یافته در $y = 0$ به ازای $Re = 20$ ۷۵
- شکل (۴-۱۲) توزیع گرادیان فشار سیال نیوتنی تعمیم یافته در $y = 0$ به ازای $Re = 20$ ۷۵
- شکل (۴-۱۳) توزیع تنش برشی سیال نیوتنی و نیوتنی تعمیم یافته در $y = 0$ و $Re = 20$ ۷۶
- شکل (۴-۱۴) توزیع سرعت محوری سیال نیوتنی، نیوتنی تعمیم یافته و ویسکوالاستیک در $Re = 20$ و $y = 0$ ۷۷
- شکل (۴-۱۵) توزیع سرعت سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در مقطع $x = 17.5$ ۷۸

- شکل (۴-۱۶) توزیع سرعت محوری u در $Re = 20$ برای سیال الف) نیوتنی ب) نیوتنی تعمیم یافته ج) ویسکوالاستیک. ۷۹.....
- شکل (۴-۱۷) توزیع تنش برشی τ_{xy} در $Re = 20$ برای سیال الف) نیوتنی ب) نیوتنی تعمیم یافته ج) ویسکوالاستیک. ۸۰.....
- شکل (۴-۱۸) لزجت η ب) ثابت اختلاف تنش عمودی اول Ψ_1 ج) ثابت اختلاف تنش عمودی دوم Ψ_2 . ۸۱.....
- شکل (۴-۱۹) توزیع ثابت اختلاف تنش عمودی اول در $y = 0$ و $Re = 20$. ۸۳.....
- شکل (۴-۲۰) موقعیت مرکز گردابه اصلی سیال مرتبه دو در حفره به ازای $Re = 20$. ۸۳.....
- شکل (۴-۲۱) مقایسه خطوط جریان سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک ($n = 0.7, We = 0.12$) در نسبت‌های مختلف حفره. ۸۴.....
- شکل (۴-۲۲) توزیع دمای متوسط سیال نیوتنی در طول کانال به ازای $Re = 20$ و $Pr = 0.6$. ۸۶.....
- شکل (۴-۲۳) مقدار ناسلت سیال نیوتنی در طول کانال به ازای $Re = 20$ و $Pr = 0.6$. ۸۶.....
- شکل (۴-۲۴) توزیع دمای متوسط سیال نیوتنی در $Re = 20$ و $Pr = 0.5$. ۸۷.....
- شکل (۴-۲۵) توزیع دمای متوسط در $Re = 20$ و $Pr = 0.5$ برای الف) سیال نیوتنی ب) سیال ویسکوالاستیک ($n = 0.7, We = 0.1, \chi = 0.2$). ۸۸.....
- شکل (۴-۲۶) توزیع ناسلت در $Re = 20$ و $Pr = 0$ برای الف) سیال نیوتنی ب) سیال ویسکوالاستیک ($n = 0.7, We = 0.1, \chi = 0.2$). ۸۹.....
- شکل (۴-۲۷) توزیع دمای سیال ویسکوالاستیک در $Re = 20$ و $Pr = 0.5$ برای اعداد برینکمن مختلف. ۹۰.....
- شکل (۴-۲۸) توزیع دمای سیال ویسکوالاستیک در امتداد محور مرکزی در $Re = 20$ و $Pr = 0.5$ برای اعداد برینکمن مختلف. ۹۱.....

فهرست جداول

- جدول (۱-۱) سرعت کمینه افقی، سرعت کمینه و بیشینه عمودی در امتداد خطوط $x = 0.5$ و $y = 0.5$ و موقعیت مکانی آن‌ها در حفره به ازای رینولدز ۱۰۰ ۱۶
- جدول (۲-۱) ضرایب مدل توانی از برازش سیال بوگر ۲۶
- جدول (۱-۴) تعداد سلول سه نوع شبکه ۶۳
- جدول (۲-۴) مقادیر سرعت و خطای نسبی سرعت طولی سیال خروجی کانال در $Re = 20$ ۶۴
- جدول (۳-۴) سرعت طولی سیال خروجی کانال در رینولدز ۱ تا ۴۰ ۶۵
- جدول (۴-۴) ضرایب مدل کاریو-یاسودا و خواص سیال ۶۶

علايم اختصاری

$H(m)$	ارتفاع ورودی کانال (ارتفاع مرجع)
$u\left(\frac{m}{s}\right)$	مولفه سرعت افقی
$v\left(\frac{m}{s}\right)$	مولفه سرعت عرضی
$W_0\left(\frac{m}{s}\right)$	سرعت مرجع
$p(Pa)$	فشار
$\tau(Pa)$	تانسور تنش
$\rho\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	چگالی
$\eta_0(Pa.s)$	لزجت در نرخ برش صفر
$\gamma_{(1)}\left(\frac{1}{s}\right)$	مشتق زمانی همبسته نرخ برش اول
$\gamma_{(2)}\left(\frac{1}{s^2}\right)$	مشتق زمانی همبسته نرخ برش دوم
$\Psi_{(1)}(Pa.s^2)$	ثابت اختلاف تنش عمودی اول
$\Psi_{(2)}(Pa.s^2)$	ثابت اختلاف تنش عمودی دوم
$T(k)$	دما
Re	عدد رینولدز
We	عدد وایزنبرگ
Pr	عدد پرانتل

چکیده

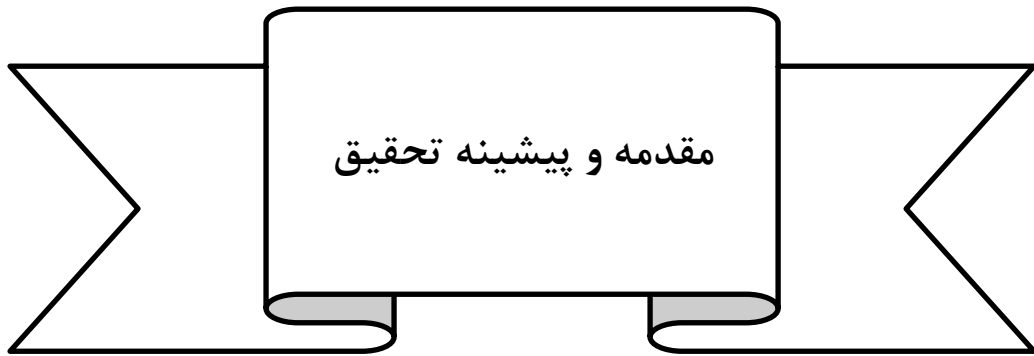
در این پژوهش، مدل‌سازی دوبعدی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در کانال با یک حفره با استفاده از مدل CEF به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، پیرامون سیالات غیرنیوتنی و پیشینه تحقیقات در هندسه یادشده مطالبی گردآوری شده است. در ادامه معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی در حالت کلی در مختصات دکارتی بیان شده و روابط معادله متشکله سیال ویسکوالاستیک و توابع ویسکومتريک لزجت، اختلاف تنش عمودی اول و دوم با استفاده از مدل کاریو-یاسودا ارائه گشته است. پس از آن، روش عددی مورد استفاده تشریح و معادلات حاکم با استفاده از روش تفاضل محدود به شکل صریح گسسته‌سازی شده است. بدین ترتیب که تقریب مرکزی مرتبه دو برای مشتقات مکانی و تقریب پیشروی مرتبه اول برای مشتقات زمانی استفاده گردیده است. با توجه به اینکه بین معادلات پیوستگی و ممنتوم وابستگی وجود نداشته و برای استفاده از روش صریح در معادلات، روش تراکم پذیری مصنوعی استفاده گردید و جهت پایداری عددی بیشتر، شبکه جابجا شده به کار گرفته شده است.

نتایج عددی برای سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک شامل خطوط جریان، توزیع سرعت، توزیع فشار، تنش برشی، لزجت و دما و ... ارائه و در ذیل به گزیده‌ای از نتایج حاصله از این حل عددی اشاره شده است.

- طول توسعه یافتگی جریان سیال نیوتنی تعمیم یافته و ویسکوالاستیک نسبت به سیال نیوتنی بیشتر می‌باشد. در حالت کلی، کاهش اندیس توانی، باعث افزایش طول توسعه یافتگی جریان و افزایش خاصیت الاستیک باعث کاهش این طول می‌شود.
- کاهش توان نمایی باعث کاهش بیشینه سرعت طولی در مرکز کانال می‌شود.
- افت فشار سیال نیوتنی در مقایسه با سیال نیوتنی تعمیم یافته و ویسکوالاستیک بیشتر می‌باشد. کاهش اندیس توانی n ، باعث افت فشار کمتر می‌شود.

- با کاهش توان نمایی، گرابه مرکزی به طرف پایین دست و بالای حفره و با افزایش اختلاف تنش نرمال اول گردابه مرکزی به عمق حفره و با اختلاف تنش نرمال دوم گردابه مرکزی به سوی بالادست جریان حرکت می کند.
- نفوذ جریان اصلی (جریان کانال) در حفره با کاهش توان نمایی و اختلاف تنش نرمال دوم، کاهش و با افزایش اختلاف تنش نرمال اول، افزایش می یابد.
- نرخ برش تعمیم یافته سیال در خط مرکزی در قسمت توسعه یافته جریان و مناطق مرکزی گردابه ها مقادیر کوچکی دارد و همین موضوع باعث می شود لزجت بی بعد سیال تقریباً به مقدار یک برسد.
- توزیع ناسلت در ناحیه حفره به دلیل وجود دیواره های عمودی در محل تغییر سطح مقطع، دارای بیشینه محلی می باشد و پس از آن در کانال پایین دست حفره به مقدار ثابتی میل می کند.

کلمات کلیدی: سیال ویسکوالاستیک، مدل کریمنتال-اریکسون-فیلیبی، تحلیل عددی، شبکه جابه جاشده، حفره



در این فصل، بحث اجمالی بر مکانیک سیالات غیرنیوتنی بخصوص سیالات ویسکوالاستیک صورت می‌گیرد. ابتدا ضمن طبقه‌بندی سیالات غیرنیوتنی، در مورد برخی رفتارهای خاص این سیالات بحث می‌شود و پس از آن پیشینه تحقیقات در حفره با مرز متحرک^۱ و کانال با یک حفره ارائه شده است.

۱-۲- طبقه بندی سیالات ویسکوالاستیک

سیال نیوتنی، سیالی است که در آن تنش برشی بدون وجود تنش تسلیم تنها تابعی خطی از نرخ برش است. در این صورت سیال غیرنیوتنی را به عنوان سیالی که فاقد رفتار نیوتنی است می‌توان تعریف نمود. دسته بندی خانواده سیالات غیرنیوتنی به صورت زیر می‌باشد [۱].

- سیالات غیرنیوتنی وابسته به زمان
- سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان
- سیالات ویسکوالاستیک

سیالات غیرنیوتنی وابسته به زمان، سیالاتی هستند که در آن‌ها لزجت علاوه بر نرخ برش، تابع زمان نیز می‌باشد. به طور کلی این سیالات به دو دسته سیالات رئوپکتیک^۲ و سیالات تیکسوتروپیک^۳ تقسیم می‌شوند. در سیالات تیکسوتروپیک، در صورتی که سیال در معرض یک برش ثابت قرار بگیرد بتدریج ساختمان مولکول‌های آن شکسته می‌شود و لزجت سیال با افزایش زمان کاهش می‌یابد. مولکول‌های شکسته شده در صورت برخورد در جهت مناسب، امکان بازگشت به ساختار اولیه خود را دارند. چون مکانیزم شکست و ترمیم هر دو با هم اتفاق می‌افتد بعد از گذشت زمان بین این دو مکانیزم تعادلی به وجود می‌آید و لزجت به مقدار معینی میل می‌کند. سیالات رئوپکتیک سیالات کمیابی هستند که رفتاری برعکس سیالات تیکسوتروپیک از خود نشان می‌دهند. از دیدگاه مولکولی،

1. Lid-driven cavity
2. Rheopectic
3. Thixotropic

این مواد ساختار مولکولی اولیه ای ندارند ولی با ایجاد برش و برخورد مولکول‌ها به یکدیگر شانس تشکیل یک ساختار را پیدا می‌کنند [۱].

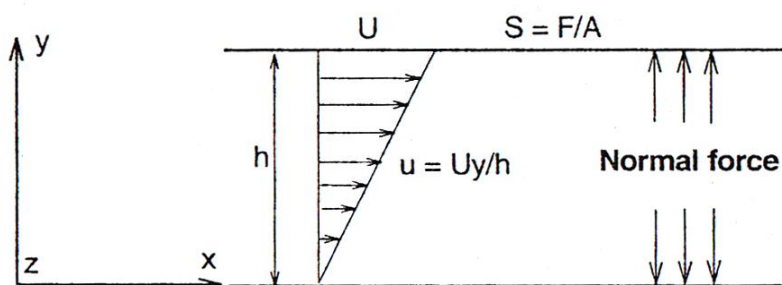
سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان، سیالاتی هستند که در آن‌ها رابطه تنش و نرخ برش به صورت غیرخطی می‌باشد. این سیالات به دو گروه فاقد و دارای تنش تسلیم تقسیم می‌شوند. در سیالات دارای تنش تسلیم، تنش به حد خاصی که برسد ماده جریان پیدا می‌کند و تا قبل از آن ماده مانند یک جامد عمل می‌کند برای این مواد، خمیردندان مثال خوبی می‌باشد به صورتی که فشار وارد بر پوسته به مقدار مشخصی که برسد خمیردندان از پوسته خارج می‌شود [۱].

سیالاتی که فاقد تنش تسلیم هستند، به دو گروه سیالات رقیق شونده^۱ و ضخیم‌شونده^۲ تقسیم می‌شوند نام دیگر این مواد، سیالات نیوتنی تعمیم یافته^۳ می‌باشد. برای این مواد تاکنون مدل‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از معروف‌ترین و ساده‌ترین آن‌ها مدل توانی^۴ است بدین صورت که، تنش برشی به عنوان یک تابع توانی از نرخ برش در نظر گرفته می‌شود [۱]. مدل‌های دیگری همچون مدل کراس^۵ و کاریو یاسودا^۶ نیز در مراجع آمده است [۲]. این مدل‌ها نسبت به مدل توانی، کاملتر می‌باشند زیرا مدل توانی لزجت سیالات رقیق شونده را در نرخ برش بی‌نهایت مقدار صفر پیش بینی می‌کند. در مواد رقیق‌شونده لزجت تابعی نزولی از نرخ برش است و در صورت استفاده از مدل توانی مقدار n کوچکتر از یک می‌باشد [۲]. در سیالات غلیظ شونده لزجت سیال با افزایش نرخ برش افزایش می‌یابد و چنانچه از مدل توانی استفاده شود مقدار n بزرگتر از یک خواهد بود [۱].

-
1. Pseudoplastic
 2. Dilatant
 3. Generalized Newtonian fluids
 4. Power-Law
 5. Cross
 6. Carreau-Yasuda

گروه سوم از سیالات غیرنیوتنی، سیالات ویسکوالاستیک هستند که همزمان دارای خواص ویسکوز و الاستیک می‌باشند.

آزمایشی که برای بررسی رفتار جریان سیال ویسکوالاستیک وجود دارد آزمایش جریان برشی ساده است بر طبق شکل (۱-۱)، جریان سیال ویسکوالاستیک بین دو صفحه را در نظر بگیرید که صفحه بالایی با سرعت U حرکت می‌کند. اگر صفحه بالایی بطور ناگهانی متوقف شود، تنش به طور آنی صفر نمی‌شود این در حالی است که تنش در سیالات نیوتنی، همزمان با توقف صفحه بالایی صفر خواهد شد [۴].



شکل (۱-۱) طرح شماتیک جریان برشی ساده [۴].

در صورتی که برای سیالات ویسکوالاستیک، در حالی که صفحه بالایی حرکت می‌کند چنانچه تنش برشی بطور آنی قطع شود یا به عبارت دیگر نیروی روی صفحه قطع و صفحه به حال خود رها گردد، صفحه بالایی مقداری به عقب باز می‌گردد این در حالی است که در سیال نیوتنی توقف صفحه نیز آنی است. در حقیقت بازگشت صفحه بالایی ناشی از خاصیت الاستیک ماده است، اما این بازگشت نسبت به مواد الاستیک (با خواص الاستیک یکسان) کندتر است که این موضوع به علت وجود خاصیت

ویسکوز در این سیالات است. بر این اساس ادعا می‌شود این مواد دارای یک حافظه^۱ جهت دار از تغییر شکل‌های خود بوده و از حالت قبلی خود آگاه هستند [۴].

از مهمترین تفاوت‌های میان سیالات ویسکوالاستیک و سیالات دیگر، وجود اختلاف تنش‌های عمودی اول و دوم در این سیالات است. به عنوان مثال در جریان برشی ساده سیال نیوتنی، تنش‌های عمودی مقداری معین دارد و برابر فشاراستاتیکی است. این در حالی است که در جریان کوئت سیال ویسکوالاستیک اختلافی بین تنش‌های عمودی مشاهده می‌شود [۴]. در جریان برشی ساده، در صورتی که جهت جریان را، جهت x و جهت عمود بر جریان (جهت تغییرات سرعت) جهت y در نظر بگیریم همچنین جهت z نیز معرف جهت راستگرد عمود بر جهات x و y باشد در یک سیال ویسکوالاستیک اختلاف تنش‌های عمودی اول و دوم به شکل زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \quad (1-1)$$

$$N_2 = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} \quad (2-1)$$

ثابت‌های اختلاف تنش‌های عمودی نیز با توجه به روابط (۱-۱) و (۲-۱) به صورت زیر قابل بیان می‌باشند [۲]:

$$\Psi_1 = \frac{N_1}{\dot{\gamma}^2} \quad (3-1)$$

$$\Psi_2 = \frac{N_2}{\dot{\gamma}^2} \quad (4-1)$$

در رابطه‌های (۳-۱) و (۴-۱)، Ψ_1 و Ψ_2 ثابت‌های اختلاف تنش عمودی اول و دوم و $\dot{\gamma}$ نرخ برش است. اختلاف تنش‌های عمودی و ثابت‌های تنش‌های عمودی همگی توابعی زوج از نرخ برش هستند. در حالت جریان پایدار، لزجت برای یک سیال ویسکوالاستیک به شکل زیر قابل تعریف می‌باشد [۳]: