

اصول رئولوژی

مؤلف: دکتر غلامحسین صدری

عضو هیئت علمی دانشگاه کاشان

سرشناسه	: صدیقیان، غلامحسین، ۱۳۵۰ -
عنوان و نام پدیدآور	: اصول رئولوژی / غلامحسین صدیقیان.
مشخصات نشر	: کاشان: دانشگاه کاشان، ۱۳۹۱.
مشخصات ظاهری	: ۴۷۲ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۹۳۲۴۸-۸-۰
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: واژه نامه.
یادداشت	: کتابنامه.
موضوع	: رئولوژی
شناسه افزوده	: دانشگاه کاشان
ردیف کتبی	: ۱۳۹۱ ۶ الف ۴ ص / ۵ / QC۱۸۹
ردیف پند	: ۵۳۱ / ۱۱۳۴
شماره کتابخانه	: ۲۷۹۴۶۹۳



اصول رئولوژی

دکتر غلامحسین صدیقیان

ناشر: انتشارات دانشگاه کاشان

نوبت چاپ: اول ۱۳۹۲

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

لیتوگرافی: بهار

چاپ: الهادی

قیمت: ۱۵۰۰۰ تومان

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۳۲۴۸-۸-۰

انتشارات دانشگاه کاشان - کیلومتر شش بلوار قطب راوندی - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی شیمی -

صندوق پستی: ۵۱۱۶۷-۸۷۳۱۷

تمامی حقوق این اثر متعلق به مولف بوده و هرگونه کپی برداری از آن، با اجازه کتبی مولف امکان پذیر خواهد بود. پست الکترونیک مولف: sodeifian@kashanu.ac.ir تلفن همراه: ۰۹۱۲۱۹۶۰۴۷۲
این اثر توسط معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان حمایت شده است.

پیشگفتار مولف:

دانش رئولوژی علی‌رغم اینکه جزء علوم مدرن محسوب می‌گردد ولی انسان‌ها از مدت‌ها قبل بطور غیرمستقیم با آن سروکار داشته و از این دانش بهره می‌جستند. به عنوان مثال هنگام خوردن غذا و چگونگی جریان یافتن و بلعیدن آن از طریق مری، عبور، دهان، با اعمال نیرو و تغییر شکل ماده مواجه هستیم، در واقع ما با انجام عمل برشی سعی در کاهش نیروی مقاوم در برابر سیال یا کاهش گرانروی آن هستیم. هنگام عبور از حلق، ماده غذایی بیش از پیش، جریان نوع کششی را تجربه می‌نماید.

امروزه دانش رئولوژی در تمامی صنایع نظیر شیمیایی، معدنی، کشاورزی، غذایی، زیست فناوری، نانوفناوری و حتی پزشکی در توسعه کاربردهای جدی و مهمی پیدا نموده است.

زمانیکه جریان سیالات غیرنیوتنی را مورد مطالعه قرار می‌دهیم، عوامل مختلفی قادر است بروی گرانروی این مواد اثر گذار باشد. به عنوان مثال، برای جریان ماده مذاب پلیمری در حال عبور از میان یک قالب، تابع گرانروی علاوه بر نرخ برشی به وزن مولکولی و توزیع وزن مولکولی نیز وابسته می‌باشد. از اینرو، پیش‌بینی و مدل نمودن این سیال به مراتب مشکل‌تر از یک سیال نیوتنی است و یا هنگامیکه مواد نانوکامپوزیت را مورد مطالعه قرار می‌دهیم حضور ذرات نانو

در زمینه یک ماده پلیمر، ایجاب می‌نماید تا پارامترهای مختلفی را در نظر گرفته تا بتوان ارتباط میان جریان و تغییر شکل را شناسایی و پیش‌بینی نمود. گاهی اوقات با استفاده از دانش رئولوژی، می‌توان ریخت‌شناسی یک آمیزه نانوکامپوزیت را نیز تحلیل نمود. از سویی دیگر دانش رئولوژی در گل‌های حفاری مورد استفاده در صنعت نفت کاربرد داشته و تسلط به این امر، خواص گل حفاری را بهبود می‌بخشد. به علاوه، در صنایع غذایی و کشاورزی مطالعه خاص رئولوژی انواع مواد غذایی نظیر گونه‌های مختلف پنیر، شکلات‌ها، برنج‌ها و ... ضرورت دارد تا متناسب با کاربردهای مطلوب، نتایج آن مورد استفاده کاربران علاقه‌مند قرار گیرد. همچنین در رشته عمران، رئولوژی انواع سیمان از اهمیت خاصی برخوردار است تا بتوان سیمانی با درجه کیفیت مطلوب فراهم نمود. اضافه می‌شود در صنایع داروسازی، گرانروی انواع کرم‌ها همراه با لحاظ نمودن تنش تسلیم آنها در محاسبه و تخمین فرآوری اینگونه مواد، امری لازم و اجتناب ناپذیر است.

با این توضیحات مختصر، در می‌یابیم که دانش رئولوژی در تمامی حوزه‌های علوم و مهندسی دارای کاربردهای عملیاتی است و از اینرو ضروری است با دانستن مفاهیم اصلی و اساسی این دانش مدرن که اساس یک پارامتر خاص نظیر گرانروی معطوف نمی‌گردد، قادر شویم بیش از پیش در توسعه روزافزون آن کوشا باشیم. لذا مطالعه کتاب مذکور زمینه مناسبی را فراهم می‌سازد تا محقق، پژوهشگران، اساتید و دانشجویان در دستیابی به این مهر به‌یاد بجز گردند.

دکتر غلامحسین صدیقیان

عضو هیئت علمی دانشگاه کاشان

فهرست

عنوان	شماره صفحه
۱. گرانروی و حالت انتقال های روزمره آن	
مقدمه	۱
رنولوژی چیست ؟	۳
رنولوژی، بسته بندی و تولید محصول	۵
رنولوژی در کجا اهمیت دارد؟	۶
سخن آخر	۸
منابع	۸
۲. جریان و تغییر شکل چیست؟	
مقدمه	۱۱
تنش برشی و نرخ برشی	۱۳
محدوده نرخ برش	۱۴
واحدها و ابعاد اولیه	۱۵
واحدهای متداول در رنولوژی	۱۶
منبع	۱۶
۳. چگونه داده های نمودار را تفسیر کنیم؟	
مقدمه	۲۳
نمایش در مقیاس لگاریتمی	۲۴
روش های مختلف رسم داده ها	۲۵

عنوان	شماره صفحه
نمایش شروع مسابقه	۲۷
دویدن برای مسافت‌های طولانی	۲۸
نواحی دیگر	۲۹
خلاصه و نتیجه‌گیری	۳۲
منابع	۳۳

۴. رسم نمودارهای رئولوژیکی

مقدمه	۳۵
نمایش شکل‌ها	۳۶
منابع	۳۹

۵. مایعات نیوتنی

مقدمه	۴۱
گرانروی	۴۱
یادآوری	۴۴
گرانروی مایعات نیوتنی رایج	۴۵
تغییرات گرانروی نیوتنی با دما	۴۶
تأثیر فشار روی گرانروی	۴۸
مثال‌های روزمره گرانروی نیوتنی	۵۰
محدوده رفتار نیوتنی	۵۰
منبع	۵۲

۶. روابطی برای مایعات نیوتنی

مقدمه	۵۲
جریان در ویسکومترهای چرخشی	۵۴
هندسه استوانه‌های هم محور با فاصله بسیار کم	۵۵
هندسه صفحه مخروط با زاویه کم	۵۶
جریان در لوله‌های مستقیم با سطح مقطع دایره‌ای	۵۷
نیمرخ سرعت و افت فشار در جریان آرام کاملاً توسعه یافته درون لوله	۵۷
جریان از مخازن بزرگ به لوله‌های کوچک	۶۰

عنوان	شماره صفحه
پر کردن لوله با مکش ثابت	۶۱
تخلیه لوله در فشار ثابت	۶۱
جریان از درون بستر کرات پر شده درون لوله	۶۲
کراتی که درون مایعات نیوتنی رو به پایین حرکت می کنند.	۶۲
کره ایزوله افتان	۶۲
حرکت توده های از کرات	۶۴
گوی پلتان رو به پایین در لوله مورب	۶۴
دیگر بیان های مهم	۶۵
ریزش از یک دیواره	۶۵
جریان در طول حفره	۶۶
جریان در فضای بین استوانه های هم محور	۶۶
حرکت میله در حفره از یک دیواره	۶۷
جریان بین دیسک های متحرک	۶۸
لوله ای متحرک در لوله ای متحرک که شکاف بین آنها از مایع پر شده است	۶۹
صفحه زاویه دار که درون مایع حرکت می کند	۶۹
استوانه دندانه داری که درون ماده ای با گرانش زیاد نفوذ می کند.	۷۰
دیسک دوار در حجم بزرگ مایع	۷۱
برهم کنش بین گرانیروی و جرم حجمی در جریان های مختلف	۷۱
جریان در مدخل لوله	۷۱
اندازه جت مایع خروجی از لوله	۷۴
جریان استوکس همراه با اینرسی	۷۴
گردابه های تیلور در جریان استوانه های هم محور	۷۵
جریاناتی که در آنها کشش سطحی اهمیت دارد	۷۷
پوشش دهی آزاد	۷۷
هموار شدن سطح موجدار	۷۷
جریان در لوله موئینه	۷۹
حباب مسطح بزرگی که درون لوله صعود می کند	۷۹
منابع	۸۰

عنوان	شماره صفحه
۷. ویسکومتری	
مقدمه	۸۳
نکاتی مهم در مورد استفاده از ویسکومترها	۸۵
کالیبره بودن	۸۵
خطاهای متداول	۸۶
اثرات دیواره	۸۶
تبخیر	۸۹
رسانایی و ته نشینی - جدایش	۹۰
محلات شیمیایی	۹۰
محلات سیالیت مکانیکی	۹۱
نمونه هد	۹۱
آزمایش در سرعت های بالا	۹۱
ذرات معلق	۹۳
طراحی ویسکومتر	۹۳
ملاحظات عمومی	۹۳
ویسکومترهای تجاری با تنش کنترل شده	۹۶
روند توسعه ویسکومترها با تنش کنترل شده	۹۷
هندسه های پیچیده در ویسکومترها	۹۹
استوانه های هم محور با فاصله های زیاد	۹۹
ویسکومتر صفحات موازی چرخان	۱۰۱
ویسکومتر لوله ای	۱۰۲
منابع	۱۰۲
۸. آزمایشگاه رئولوژی	
چه چیزهایی را می توان در آزمایشگاه رئولوژی مجهز یافت؟	۱۰۳
مشکل چیست؟	۱۰۴
انواع رئومتر	۱۰۵
ویسکومترهای استاندارد آزمایشگاهی	۱۰۵
رئومترها	۱۰۶
ویسکومترهای کششی	۱۰۷

عنوان	شماره صفحه
منابع	۱۰۷

۹. مایعات رقیق‌شونده

۱۰۹	بررسی کیفی منحنی‌های جریان
۱۱۹	بیان ریاضی منحنی‌های جریان
۱۱۹	مدل کراس
۱۲۱	مدل بینگهام
۱۲۳	مایعات پیرو قانون توانی
۱۲۴	مدل سیسکو
۱۲۵	برآزش داده‌ها به معاملات ریاضی

۱۰. معادلات سیال غیر نیوتونی

۱۲۷	مقدمه
۱۲۷	جریان پایدار در لوله مستقیم
۱۲۷	مایعات توانی
۱۲۹	مدل سیسکو
۱۲۹	سیال کاسون
۱۳۰	سیال بینگهام
۱۳۱	ریزش روی دیواره تحت نیروی جاذبه
۱۳۱	حرکت کره درون مایعی غیر نیوتونی
۱۳۲	جریان در کانال پهن
۱۳۳	جریان شعاعی بین دو دیسک موازی
۱۳۳	جریان خروجی از مخزن و ورودی به لوله
۱۳۴	جریان مایع توانی بین دو دیسک فشرده به هم
۱۳۴	جریان در نازل
۱۳۵	سطح موج تحت کشش سطحی
۱۳۶	دیسک گردان در مایع توانی
۱۳۷	روابطی برای مایعات دارای تنش تسلیم ظاهری
۱۳۷	جریان در همزن
۱۳۸	استوانه‌های هم محور با فاصله زیاد

عنوان	شماره صفحه
صعود مایعی با تنش تسلیم در لوله‌ی موئینه	۱۳۸
منابع	۱۳۹

۱۱. سیالاتی با رفتار رقیق‌شوندگی زیاد یا دارای تنش تسلیم

مقدمه	۱۴۱
سابقه تنش تسلیم	۱۴۷
مقادیر تنش تسلیم خاص	۱۴۹
عوامل ورود رئومترهای تجاری با تنش کنترل شده	۱۵۰
مهندسه تیغه‌ای	۱۵۱
بررسی و مدل‌سازی برای تنش تسلیم	۱۵۲
منابع	۱۵۵

۱۲. جریان مواد جامد

مقدمه	۱۵۷
گرانروی غیرخطی جامدات	۱۵۹
نتیجه‌گیری	۱۶۳
منابع	۱۶۴

۱۳. ویسکوالاستیسیته خطی و اثرات زمان

مقدمه	۱۶۵
مدل‌های مکانیکی برای مایعات ویسکوالاستیک	۱۶۸
اندازه‌گیری ویسکوالاستیسیته خطی	۱۷۱
کلیات	۱۷۱
آزمایش‌های خزشی	۱۷۲
رفتار مواد در تست‌های خزشی	۱۷۶
آزمایشات نوسانی یا اسپکتروسکوپی ارتعاشی مکانیکی	۱۷۹
آزمایش‌های نوسانی برای مدل ماکسول	۱۸۲
عناصر دو یا چندگانه در مدل ماکسول	۱۸۴
رفتار نوسانی با مدل ویت - کلوبین	۱۸۶
پاسخ نوسانی سیستم‌های حقیقی	۱۸۶

شماره صفحه	عنوان
۱۹۰	ناحیه گرانرو / ترمینال - رفتار ساده مدل ماکسول
۱۹۲	سیستم‌های پلیمری
۱۹۶	پراکنه‌ها
۲۰۱	از داده‌های نوسانی، چه اطلاعاتی می‌توان استخراج نمود؟
۲۰۴	ارتباط بین پارامترهای نوسانی و جریان پایدار
۲۰۴	کلیات
۲۰۵	داده‌های نوسانی و خزشی
۲۰۶	ارتباط ساده بین داده‌های نوسانی و خزشی
۲۰۶	پایان غیر خطی داده‌های نوسانی
۲۱۰	استفاده از داده‌های نوسانی برای مشاهده فرآیند پخت و بازآرایی
۲۱۴	آزمایش آسودگی از تنش
۲۱۵	آزمایشات شروع
۲۱۶	منابع

۱۴. ویسکوالاستیسیته غیر خطی

۲۲۱	مایعات روزمره کشسان
۲۲۲	برخی از مثال‌های مشهود ویسکوالاستیسیته کشسان (گرانرو - کشسان)
۲۲۷	توصیف صحیح نیروهای ویسکوالاستیک
۲۳۰	اندازه‌گیری نیروهای ویسکوالاستیک
۲۳۲	مثال‌هایی از اختلافات اولین تنش نرمال
۲۴۱	برخی از روابط ویسکوالاستیک
۲۴۱	کلیات
۲۴۲	تورم در خروج از اکسترودر
۲۴۳	جریان در لوله‌ی مورب
۲۴۳	فشار در مجاری و حفرات
۲۴۳	اینرسی در هندسه صفحه مخروط
۲۴۴	جریان مایع ویسکوالاستیک در حالت انقباض
۲۴۵	منابع

۱۵. جریان سوسپانسیون

۲۴۹	مقدمه
۲۵۰	گرانروی امولسیون‌ها و پراکنده‌ها
۲۵۰	فاز پیوسته
۲۵۱	تاثیر غلظت‌های بسیار کم ذرات جامد
۲۵۲	اثر فاز پیوسته
۲۵۵	اثر فاز پراکنده
۲۵۷	اثر غلظت‌های متوسط تا زیاد فاز پراکنده
۲۶۱	اثرات اندازه ذرات در مخلوط‌های غلیظ
۲۶۳	اثرات اشباع و اشباع‌شدنی ذرات در محلول‌های غلیظ
۲۶۵	قابلیت تغییر شکل
۲۶۵	مروری بر دیدگاه هم‌نش‌های ذرات
۲۷۱	گرانروی سیسماها و لخته
۲۷۶	ژل‌گرایی
۲۷۸	غلظت‌شوندگی گرانروی
۲۸۰	لغزش دیواره
۲۸۵	مواد خمیری شکل با غلظت زیاد
۲۸۶	کنترل رشد توده ذرات در گرانروی سوسپانسیون
۲۸۹	پایداری سوسپانسیون‌ها
۲۹۱	منابع

۱۶. رئولوژی پلیمرها

۲۹۳	مقدمه
۲۹۴	انواع مختلف زنجیرهای پلیمری
۲۹۴	میل‌های بلند
۲۹۶	چنبه‌ها و زنجیرها
۳۰۰	محلول‌های پلیمری
۳۰۴	پلیمرهایی با شاخه‌های زیاد
۳۰۴	پلیمرهای زنده یا مایسل‌های کرمی شکل
۳۰۶	پلیمرهای تجمع‌یافته

عنوان	شماره صفحه
محلول پلیمری به عنوان مایعی غیرنیوتنی	۳۰۹
منابع	۳۱۱

۱۷. گرانروی و جریان کششی

مقدمه	۳۱۳
مثال هایی از جریان کششی	۳۱۵
گرانروی کششی	۳۱۶
نسبت نیروتن	۳۲۲
نمونه ها، گرانروی کششی	۳۲۳
اثر زمانی و مقدار کشش در گرانروی کششی	۳۳۰
برخی دیگر از جریان های کششی	۳۳۲
اندازه گیری گرانروی کششی با کمک ویسکومتر	۳۳۳
ویسکومترهای کششی در جود در بازار	۳۳۶
برخی از تجهیزات جالب	۳۳۶
منابع	۳۴۰

۱۸. رئولوژی سیستم های فعال سطحی

مقدمه	۳۴۱
فازهای سورفاکتانت (ماده فعال سطحی)	۳۴۲
رئولوژی سیستم های سورفاکتانت (ماده فعال سطحی)	۳۴۵
خواص رئولوژیکی ضروری	۳۴۶
منبع	۳۴۸

۱۹. رئولوژی محصولات غذایی

مقدمه	
رئولوژی مواد غذایی شبه مایع	۳۵۰
بررسی جریان مواد غذایی در محیط بیولوژی	۳۵۱
رئولوژی فرآورش مواد غذایی	۳۵۲
منابع	۳۵۳

۲۰. نانوکامپوزیت‌های پلیمری

۳۵۵	مقدمه
۳۵۷	ملاحظات اولیه
۳۶۱	نانوکامپوزیت‌های پلیمری بر پایه خاک رس
۳۶۱	ساختار مونت‌موریلونیت
۳۶۴	تشکیل نانوکامپوزیت
۳۶۴	بازشدگی لایه‌ها
۳۷۰	شناسایی مورفولوژی (ریخت‌شناسی) نانوکامپوزیت‌ها
۳۷۴	برای مکانیکی نانوکامپوزیت
۳۷۴	تقریب و استحکام
۳۷۸	خواص پرمایه نانوکامپوزیت‌ها
۳۷۸	پایداری پلیمر
۳۸۰	کاربردها و خواص نانوکامپوزیت‌های پلیمری
۳۸۱	خواص جداسازی پلیمری
۳۸۳	مقاومت در برابر اشتعال
۳۸۶	سازگار کننده‌های آمیزه‌های پلیمری
۳۸۷	کاربردهای بیوپزشکی
۳۸۸	کاربرد پیل‌های سوختی
۳۸۹	کاربرد در صنایع الکتریک، الکترونیک، الکتریک حسگرها
۳۹۰	کاربردهای تجاری نانوکامپوزیت‌های پلیمری *
۳۹۰	رفتار ویسکوالاستیک نانوکامپوزیت‌های پلیمری
۳۹۲	نتایج
۳۹۸	منابع

۲۱. رئولوژی محاسباتی

۴۰۳	مقدمه
۴۰۴	نحوه عملکرد CFD
۴۰۵	توصیف رئولوژی مایعات غیر نیوتنی و کدهای CFD
۴۰۶	کجا می‌توان از CFD استفاده کرد؟
۴۰۶	بعضی از نتایج حل مسائل به کمک CFD

عنوان	شماره صفحه
موضوع مهم و هشداردهنده	۴۰۷
منابع	۴۰۷
ضمیمه:	
فرآیند اندازه‌گیری برخط گرانیروی	
مقدمه	۴۰۹
جمله‌های مطلوب ویسکومتر بر خط	۴۱۱
قابلیت تکراری ارتباط	۴۱۳
مایل به میان بودن	۴۱۳
روش‌های مختلف اندازه‌گیری به کمک تجهیزات موجود	۴۱۴
اثر گرانیروی بر نیروی	۴۱۶
نظافت و ضدعفونی	۴۱۸
نظرات کلی در مورد تجهیزات و	۴۱۸
بررسی دقیق وسیله‌ای خاص	۴۲۰
نتیجه‌گیری	۴۲۲
منابع	۴۲۳
واژه‌نامه بلند	۴۲۵
واژه‌نامه کوتاه	۴۴۲