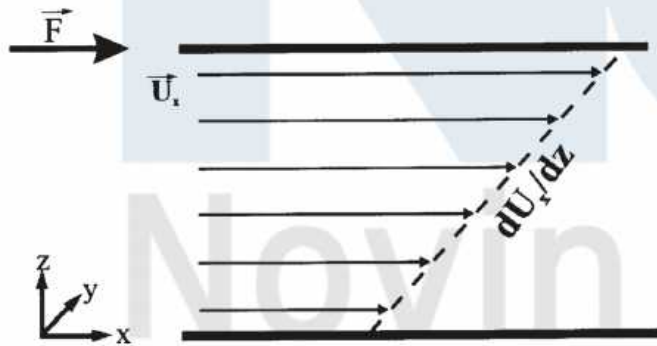




بررسی ویسکوزیته در جوهرهای دیجیتال

نویسنده: مهندس سمیرا برین
کارشناس شرکت نوین کنترل اریکه صنعت



شکل ۱- شماتیک ویسکوزیته نیوتنی. سیال بین دو صفحه موازی نزدیک به هم قرار گرفته است. نیروی F وارده به صفحه بالایی باعث حرکت مایع مجاور به صفحه در جهت نیروی F اعمالی می‌گردد. نیروی اعمالی، روی لایه‌های دیگر سیال نیز اثر گذاشته و باعث حرکت آن‌ها با سرعت‌های برداری کم‌تر، نسبت به لایه‌های بالاتر می‌گردد.

در این سیستم نیروی اعمالی τ_{zx} تحت عنوان تنش برشی (Shear Stress) وگرادیان سرعت دفرمه شدن مایع، به صورت dU_x/dz و به اصطلاح نرخ کرنش برشی (shear rate)، یا γ_{zx}^o نامیده می‌شود. فرمول ریاضی نحوه واکنش سیستم‌های ویسکوز به تنش برشی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\tau_{zx} = \eta \, dU_x/dz = \eta \gamma_{zx}^o \quad (1)$$

بنابراین فاکتور τ_{zx} ، نیروی اعمالی در واحد سطح صفحه بالایی در

ویسکوزیته، یکی از خصوصیات مکانیکی مهم سیالات می‌باشد. روغن کاری اجزا موتور، دینامیک قطره‌های باران، جریان خون، جوهرهای دستگاه‌های چاپ، فوران‌های آتشفشانی، همگی شامل سیالات می‌باشد و رفتار آن‌ها با عامل ویسکوزیته کنترل می‌گردد.

ویسکوزیته، به صورت اصطکاک داخلی یک سیال تعریف می‌شود. ماهیت میکروسکوپی اصطکاک داخلی سیال، مشابه ساختار ماکروسکوپی اصطکاک مکانیکی یک جسم در حال حرکت روی یک صفحه مسطح ثابت، می‌باشد.

برای غلبه بر اصطکاک بین جسم و صفحه و هم‌چنین برای شروع حرکت آن، بایستی نیروی مورد نیاز تامین گردد و به همین صورت در سیالات نیز برای شکستن پیوند بین اتم‌ها و مولکول‌ها و حرکت آن‌ها در کنار یکدیگر، نیاز به تامین نیرو می‌باشد.

مقاومت سیالات در برابر جریان به دلیل ویسکوزیته سیالات می‌باشد. سیالات را می‌توان به صورت سیستمی از ذرات در نظر گرفته و اندازه حرکت را برای هر ذره حساب کرد که مجموع آن، اندازه حرکت سیال را به دست می‌دهد. این سیستم حرکتی، انتقال مومنوم در سیال نامیده می‌شود. سرعت جابجایی سیالات بسیار متفاوت و بستگی به شرایط موجود دارد.

برای درک بهتر رفتار سیالات، فرض کنید سیال بین دو صفحه موازی نزدیک به هم قرار گرفته است. نیروی F وارده به صفحه بالایی باعث حرکت مایع مجاور به صفحه در جهت نیروی F اعمالی می‌گردد.

نیروی اعمالی، روی لایه‌های دیگر سیال نیز اثر گذاشته و باعث حرکت آن‌ها با سرعت‌های برداری کم‌تر، نسبت به لایه‌های بالاتر می‌گردد.

جهت محور x و dU_x/dz تغییرات سرعت در جهت محور Z در سیال و η ویسکوزیته می‌باشد.

بنابراین اگر در یک سیال، تنش برشی باعث حرکت سیال شود، ویسکوزیته سیال، تحت عنوان ویسکوزیته دینامیکی شناخته می‌شود. ولی اگر حرکت سیال مستقل از نیروی وارد بر آن باشد تحت عنوان ویسکوزیته سینماتیکی شناخته می‌شود و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$v = \eta / \rho$$

از مایعات نیوتنی می‌توان به سیالات تک فازی، مایعات و محلول‌هایی با وزن مولکولی پایین مثل آب اشاره نمود

سیال غیر نیوتنی

سیالاتی هستند که ویسکوزیته آن با تنش برشی وارد بر آن‌ها تغییر می‌کند. رفتار این مواد تحت عنوان رئولوژی بررسی می‌شود.

در سیالات غیر نیوتنی ارتباط غیرخطی بین تنش برشی و نرخ کرنش وجود دارد.

انواع سیالات غیر نیوتنی در جدول یک دسته‌بندی شده است.

این سیالات به دو دسته کلی، سیالات دارا و فاقد تنش تسلیم تقسیم می‌شوند. در موادی که دارای تنش تسلیم هستند، شرط جریان ماده، رسیدن تنش، به حد مشخصی برای شروع سیلان آن است. برای مثال خمیردندان، مثال بسیار مناسبی برای این مواد است به نحوی که تا زمانی که میزان فشردگی پوسته آن به حد مشخصی نرسد، خمیر دندان از آن خارج نمی‌شود. علت این رفتار فیزیکی معمولاً به ساختمان سه بعدی ماده نسبت داده می‌شود. ساختمان این مواد قادر است که تنش برشی کم‌تر از حد تسلیم را بدون ایجاد جریان تحمل نماید، ولی پس از آن، ساختمان داخلی شکسته شده و ماده اجازه حرکت برشی را پیدا می‌کند. تصور می‌شود که ساختمان داخلی ماده، پس از کاهش تنش به مقدار کم‌تر از تسلیم دوباره ترمیم می‌شود. معروف‌ترین این دسته از مواد، پلاستیک بینگهام است. در واقع پلاستیک بینگهام یک سیال نیوتنی دارای تنش تسلیم است (ویسکوزیته آن ثابت است). نمونه‌هایی از سیالات دارای تنش تسلیم عبارتند از: برخی پلاستیک‌های مذاب، گل حفاری چاه نفت، مخلوط آب و شن، دوغاب‌های گچ و ماسه، شکلات مایع، کرم‌های طبی و گریس‌ها.

سیالاتی که فاقد تنش تسلیم هستند به دو دسته سیالات شبه پلاستیک (pseudo-plastic material) و سیالات دایلاتانت (dilatant material) تقسیم می‌شوند.

در این سیالات غیر نیوتنی، با افزایش سرعت برشی، نرخ کرنش به صورت غیر خطی، افزایش می‌یابد، به این رفتار Shear Thinning یا Dialtant گفته می‌شود. در برخی دیگر از مایعات غیر نیوتنی، با افزایش سرعت برشی، تنش برشی به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. این رفتار تحت عنوان Shear Thinning یا Pseudo-Plastic شناخته می‌شود. به عنوان نمونه می‌توان به کرم، خون، تعدادی از پلیمرها و سیمان مایع اشاره کرد.

هر دو رفتار ناشی از جهت‌گیری مولکول‌ها و ذرات در سیال می‌باشد که باعث کاهش یا افزایش اصطکاک بین ذرات می‌گردد.

در برخی سیالات غیر نیوتنی، ویسکوزیته سیال با مدت زمان اعمال تنش تغییر می‌کند. به عنوان مثال با افزایش مدت زمان اعمال تنش به مخلوط آرد ذرت و آب، ویسکوزیته افزایش می‌یابد که به این رفتار Rheopexy گفته می‌شود.

در برخی دیگر از سیالات، ویسکوزیته با افزایش تنش، کاهش می‌یابد. مثل رنگ که حرکت قلمو باعث حرکت راحت‌تر رنگ و پوشاندگی بهتر آن روی سطح می‌گردد. این رفتار تحت عنوان Thixotropic شناخته می‌شود. عنوان Thixotropic شناخته می‌شود.

تفاوت اصلی بین ویسکوزیته دینامیکی و سینماتیکی، دانسیته است و تبدیل آن‌ها به یکدیگر از طریق فرمول زیر انجام می‌گیرد:

$$\text{Kinematic Viscosity} * \text{Density} = \text{Dynamic Viscosity}$$

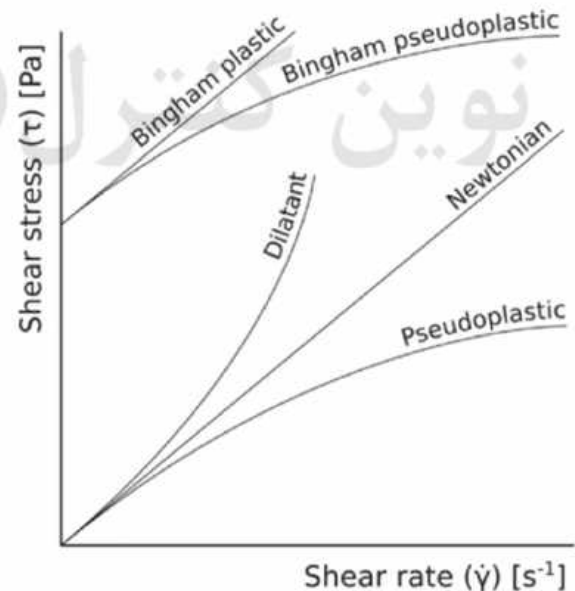
$$\text{Dynamic Viscosity} / \text{Density} = \text{Kinematic Viscosity}$$

دو سیالی که ویسکوزیته دینامیکی یکسان داشته باشند، می‌توانند ویسکوزیته سینماتیکی متفاوتی داشته باشند، به همین دلیل ویسکوزیته سینماتیکی بستگی به دانسیته سیال دارد در حالی که دانسیته، فاکتوری برای ویسکوزیته دینامیکی نمی‌باشد.

تعاریف ویسکوزیته در معادله یک، مربوط به سیالات در شرایط حرکتی آرام می‌باشد. ویسکوزیته در شرایط اغتشاش متفاوت بوده و 10^4 بار بزرگ‌تر از سیستم‌های آرام می‌باشد و بستگی به اعداد رینولدز دارد. ویسکوزیته برشی اکثر سیالات با افزایش دما، کاهش و با افزایش فشار، افزایش می‌یابد که دقیقاً عکس رفتار گازها می‌باشد. افزایش دما، باعث انبساط و کاهش جاذبه بین مولکولی و در نتیجه کاهش اصطکاک داخلی و ویسکوزیته می‌گردد. افزایش فشار باعث کاهش حجم و افزایش جاذبه بین مولکولی و در نتیجه افزایش اصطکاک داخلی و ویسکوزیته می‌شود.

سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی

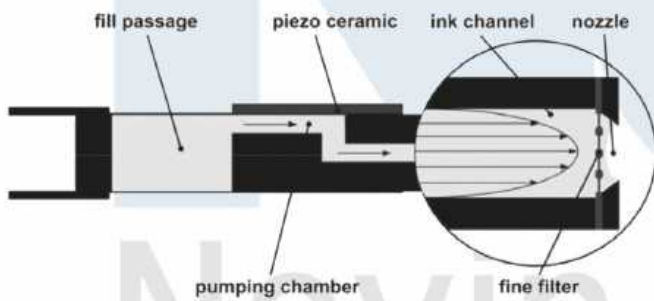
معادله یک قانون نیوتن ویسکوزیته می‌باشد که توسط اسحاق نیوتن فرموله شده است و تعریف رفتار سیالات نیوتنی می‌باشد.



شکل ۲- منحنی رفتار سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی

ویسکوالاستیک	ماده کلوین، ماده ماکسول	چیدمان موازی و خطی خواص کشسانی و گرانروی	پلیمرهای سیلیکونی، برخی از روانسازها و خامه زده شده
ویسکوزیته وابسته به زمان	رئوپکتیک	گرانروی ظاهری با افزایش مدت زمان اعمال تنش افزایش می‌یابد.	جوهرهای پرینتر، دوغاب گچی، مایع مفصلی
	تیکسوتروپیک	گرانروی ظاهری با افزایش مدت زمان اعمال تنش کاهش می‌یابد.	ماس، برخی از رس‌ها (از جمله بنتونیت و مونت‌موری‌لونیت)، سوسپانسیون‌های کربن سیاه در لاستیک تایر، برخی از رنگ‌ها و برخی از سوسپانسیون‌های کلونیدی
ویسکوزیته مستقل از زمان	دیلاتانت	با افزایش تنش، ویسکوزیته افزایش می‌یابد.	سوسپانسیون آرد ذرت در آب
	شبه پلاستیک	با افزایش تنش، ویسکوزیته کاهش می‌یابد.	خمیر کاغذ در آب، خون، ملاس، شربت‌ها، پوشش‌های سیلیکونی و شن در آب
	سیال نیوتنی	تنش تابعی از نرخ کرنش نرمال و برشی و همچنین فشار است.	پلازما خون

جدول ۱- انواع سیالات غیر نیوتنی



شکل ۳- شماتیک هد دستگاه دیجیتال پرینت. پروفایل سهمی شکل سرعت حرکت جوهر در هدهای نازل

این رفتار در برخی از دوغاب‌های سرامیکی، علی‌الخصوص دوغاب‌های چینی بهداشتی به واسطه استفاده از درصد بالای کائولن و بالکلی مشاهده می‌گردد.

این مدل به صورت عمومی به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\tau_{yx} = \tau_y + \gamma^n \eta_p (\dot{\gamma})$$

در این معادله

τ_{yx} تنش برشی اعمالی

τ_y تنش تسلیم

η_p ویسکوزیته پلاستیک و

γ کرنش برشی می‌باشد.

$n=1$ رفتار سیالات نیوتنی بینگهام را نشان می‌دهد. $n > 1$ مربوط به رفتار Shear Thinning و $n < 1$ مربوط به رفتار Shear Thickening سیالات می‌باشد.

طبق معادله شماره یک، واحد ویسکوزیته دینامیکی $ML^{-1}T^{-1}$ است که در سیستم SI، با Pa.S و در سیستم dyn/cm^2 یا S/cm^2 یا poise (p) مشخص می‌باشد.

واحد ویسکوزیته سینماتیکی طبق معادله شماره دو L^2T^{-1} است که در سیستم SI با m^2/s و در سیستم dyn/cm^2 یا s/cm^2 یا Stoke (st) می‌باشد.

رئولوژی جوهرهای چاپ دیجیتال

فناوری چاپ دیجیتال محدودیت‌های زیادی را بر جوهرهای سرامیکی تحمیل می‌کند که این محدودیت در رئولوژی سوسپانسیون‌های سرامیکی، پایداری سوسپانسیون، ویسکوزیته، کشش سطحی و اندازه ذرات رنگ‌دانه می‌باشد.

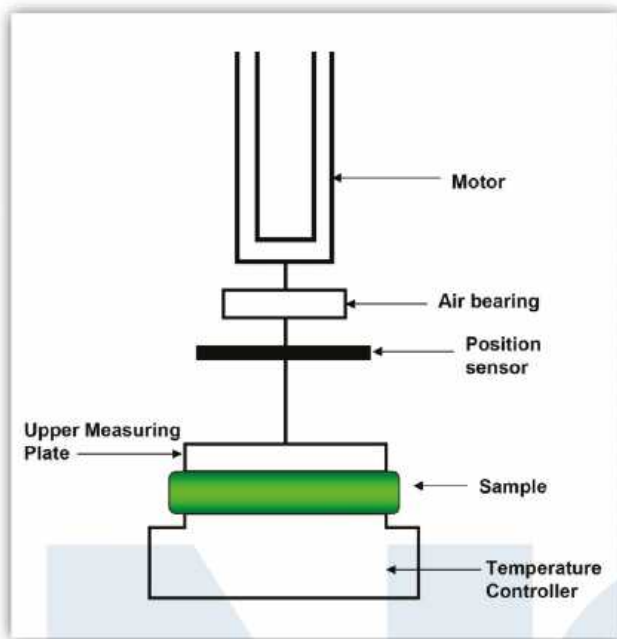
ویسکوزیته جوهرهای سرامیکی، رفتار وابسته به برش از خود نشان می‌دهد، که این رفتار بستگی به جز حجمی جامد، اندازه ذرات، شکل ذرات و نیروی بین ذرات دارد.

در حین فرآیند چاپ، سرعت برشی بالایی بر جوهر وارد می‌شود. ویسکوزیته جوهر وابسته به برش و جز حجمی جامد می‌باشد و این پارامتر روی مکانیزم پاشش جوهر تاثیر به‌سزایی دارد.

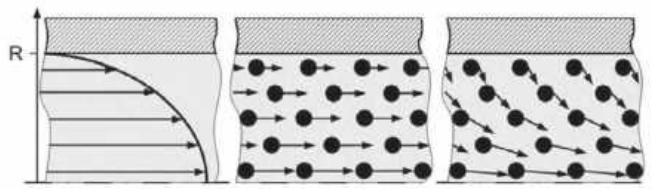
رئولوژی سوسپانسیون‌ها، که جوهر سرامیکی نیز از این دسته می‌باشد، معمولاً از مایعات متفاوت است که این تفاوت به علت نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر ذرات می‌باشد. شکل ۳ رفتار سوسپانسیون را در یک هد پرینتر نشان می‌دهد.

زمانی که جریان در هدها در رنج پایین اعداد رینولد $Re \sim (1-10)$ زمان تشکیل قطره) باشد پروفایل سرعت در مدار سهمی خواهد بود که در شکل (۳) نشان داده شده است.

در یک سوسپانسیون پایدار در نرخ‌های برشی پایین، سرعت بسیار کم (Flow Velocities)، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، ذرات سرعت ثابتی را دنبال می‌کنند.



شکل ۵- شماتیک دستگاه رنومتر چرخشی



شکل ۴- جریان آرام در هدها، نیروهای هیدرودینامیکی ذرات را از مسیر سرعت ثابت خارج می‌کند.

اما در سرعت‌های برشی بالا، نیروهای هیدرودینامیک، ذرات را از مسیر سرعت ثابت خارج می‌کنند. رقابت بین نیروهای هیدرودینامیک که ریزساختار سوسپانسیون را بهم می‌ریزد و باعث انحراف ذرات می‌گردد و همچنین نیروی براونی (حرکت رندم ذرات) و نیروی دافعه‌ای که ذرات را از هم دور نگه می‌دارد، منجر به ویسکوز شدن سوسپانسیون می‌شود. این اثرات و واکنش‌ها بستگی به حجم موثر جامد (غلظت یک ماده در محلول)، میزان دافعه و جاذبه بین ذرات، سایز، شکل و مشخصات کشش سطحی دارد.

در پروسه پرینت کردن، در پروسه ارسال پالس به هدها، نرخ‌های برشی بالایی به جوهر اعمال می‌گردد که در حدود $10^4 S^{-1}$ - $10^6 S^{-1}$ می‌باشد که این مقدار بستگی به تک‌پالسی یا چندپالسی بودن هد برای ایجاد قطر دارد، یعنی binary یا grayscale بودن نوع پرینت حائز اهمیت می‌باشد.

انجام آزمایشات در نرخ‌های برشی بالا سخت می‌باشد، به همین دلیل کلیه آزمایشات و بررسی‌های رئولوژی در نرخ‌های برشی پایین انجام می‌گیرد.

رنومتر چرخشی

بررسی رفتار جوهر در زمان تشکیل قطره و حین چاپ و همچنین رابطه بین تنش برشی، کرنش و ویسکوزیته جوهر توسط دستگاهی به نام رنومتر چرخشی بررسی می‌گردد. این دستگاه یک تکنیک قوی برای اندازه‌گیری رئولوژی سیالات از جمله جوهرهای سرامیکی است. هم‌چنین با استفاده از این تکنیک می‌توان در مورد تغییرات ساختاری و ترکیبی مواد، نحوه جریان و تغییر شکل آن‌ها، ثبات ترکیب و نحوه عملکرد آن‌ها اطلاعات مفیدی کسب کرد.

یکی دیگر از مزایای این روش، تحقیق در مورد تاثیر دانه بندی جوهر و حجم موثر جامد بر روی ویسکوزیته می‌باشد. این دستگاه مجهز به سیستم اندازه‌گیری است. این سیستم شامل یک کولپینگ می‌باشد که توسط یک موتور با اینرسی بسیار پایین حرکت می‌کند و به یک اینکودر با دقت بسیار بالا متصل است. دمای نمونه و سیستم اندازه‌گیری کنترل می‌شود.

نمودار خروجی دستگاه رنومتر چرخشی

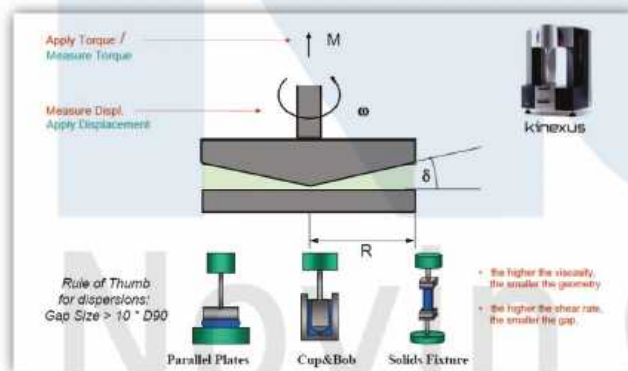
خصوصیات رئولوژیکی نمونه با چرخش یا نوسان سیستم که به صورت کنترل گشتاور موتور یا با تغییر مکان سیستم اندازه‌گیری صورت می‌گیرد، تعیین می‌شود.

از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

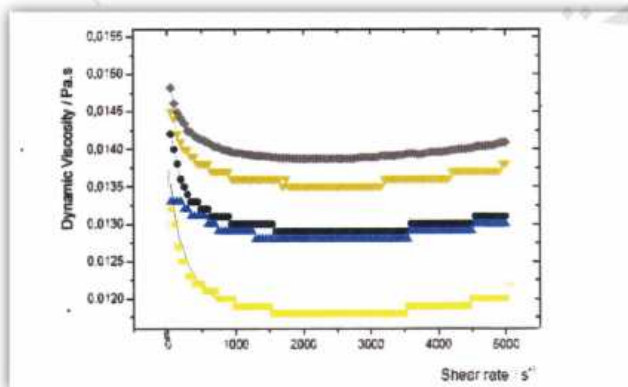
اعمال رنج وسیع گشتاور از $10^{-1} Nm$ تا $10^{-6} Nm$

زمان آنالیز بسیار کوتاه

طراحی دستگاه با اینرسی بسیار پایین



شکل ۶- شماتیک دستگاه رنومتر چرخشی



شکل ۷- نمودار خروجی دستگاه رنومتر چرخشی

1. Ainsley C, Derby B, Reis N. (2003) Viscosity and acoustic behavior of ceramic suspensions optimized for phase-change ink-jet printing. *J Am Ceram Soc* 88: 802–808.
2. Krishna Prasad PSR, Venumadhav RA, Rajesh PK, Pon-nambalam P, Prakasan K. (2006) Studies on rheology of ceramic inks and spread of ink droplets for direct ceramic ink jet printing. *J Mater Process Tech* 176: 222–229
3. Bossis G, Brady JF. (1989) The rheology of Brownian sus-pensions. *J Chem Phys* 91: 1866–1874.
4. T. A. Litovitz and C. M. Davis, Structural and shear relaxa-tion in liquids, in W. P. Mason (ed.),
Physical Acoustics: Principles and Methods, Vol. II. Part A, Properties of Gases, Liquids and Solutions, New York: Academic Press, 1965, 281-349.
5. Y. Bottinga and P. Richet, Silicate melts: The “anomalous” pressure dependence of the viscosity, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 2725-2731, 1995.
6. J. Ferguson and Z. Kemplowski, Applied Fluid Rheology, New York: Elsevier, 1991.
7. Davalos Orozco LA, del Castillo LF. (2006) Hydrodynamic behavior of suspensions of polar particles. In Somasundaran P (ed.), *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*, Vol. 4, pp. 2798–2820. Taylor & Francis Group, New York.

کلیه تولیدکنندگان جوهرهای چاپ دیجیتال برای گرفتن تاییدیه سازندگان دستگاه‌های چاپ دیجیتال ملزم به ارائه کلیه اطلاعات مربوط به رئولوژی جوهرهای چاپ می‌باشند. این اطلاعات برای بررسی رفتار جوهر در هدهای دستگاه و کیفیت پاشش، از اهمیت به‌سزائی برخوردار است.

پاورقی : عدد رینولدز، یک عدد بی‌بعد است که نسبت نیروهای اینرسی به ویسکوزیته را بیان کرده و درجه اهمیت نسبی این دو نیرو را به صورت کمی بیان می‌کند. این عدد در زمان آنالیز ابعادی مسائل دینامیک سیال، به طور مکرر استفاده شده و می‌تواند به منظور بررسی تشابه دینامیکی بین جریان‌های مختلف استفاده شود. این عدد هم‌چنین به منظور دسته‌بندی رژیم‌های مختلف جریان مثل آرام یا آشفته، به کار می‌رود. جریان آرام در اعداد رینولدز پایین اتفاق می‌افتد که در آن‌ها لزجت سیال به نیروهای اینرسی غالب است. جریان آشفته در اعداد رینولدز بالا اتفاق می‌افتد که در آن‌ها نیروهای اینرسی به نیروهای ناشی از لزجت، غالبند.

$$Re = \rho v L / \mu = V L / \nu$$

در رابطه بالا، V سرعت متوسط سیال، L طول مشخصه (به عنوان مثال در بررسی جریان در لوله، برابر با قطر لوله است)، ν لزجت دینامیکی سیال، ρ لزجت سینماتیکی و $(\nu = \mu / \rho)$ و چگالی سیال است.

Novin Control

نوین کنترل (اریکه صنعت)