

تعیین آزمایشی ویسکوزیته محیط (سیال) ماشینکاری جریان ساینده

چکیده:

ماشین کاری جریان ساینده (AFM) یک فرایند جدید برای پلیسه گیری، هموار سازی، صیقل دهی و حذف لایه های ریکست (لایه های دوباره منجمد شده) ترکیبات و اجزاء در طیف وسیعی از زمینه ها می باشد. حذف مواد در ماشین کاری جریان ساینده از طریق یک جریان دارای ذرات ساینده در سطحی که قرار است ماشینکاری شود، اتفاق می افتد. سیال، یک مولفه کلیدی در فرایند به دلیل توانایی آن برای سایش مناطق تعیین شده و منتخب در امتداد مسیر جریان آن است. مرور منابع نشان داد که بایستی ویسکوزیته سیال مشخص باشد زیرا اثر معنی داری بر روی پارامتر های عملکرد فرایند دارد. در این مطالعه، یک دستگاه ویسکومتر بر اساس اصول ویسکوالاستیسیته ساخته شده است. وادادگی خزش و مدول حجمی تعیین شده است و ویسکوزیته سیال ساینده محاسبه شده است. اندازه گیری هایی برای بدست آوردن ویسکوزیته همراه با ارزیابی طول نمونه و بار اولیه، اثر نقاط داده های کاهش یافته و تکرارپذیری آزمایشات انجام شده است. علاوه بر این، آزمایشاتی در غلظت ها و دما های مختلف سیال ساینده انجام شده است. آزمایشات نشان می دهد که ویسکوزیته سیال با افزایش درصد غلظت ساینده افزایش و با افزایش دما، کاهش می یابد. ویسکوزیته ها در یک غلظت متفاوت مواد ساینده با مقادیر بدست آمده از یک ویسکومتر شیشه ای (مویینه) مقایسه شده و نتایج مقایسه نیز خوب بود.

کلمات کلیدی: سیالات AFM، مدول حجمی، وادادگی خزش، جامد کلوین، ویسکوزیته

استناد به این مقاله بایستی به صورت زیر باشد: آگراول، ای. جین، وی. کی. ومورالدیهار، ک (2005)، تعیین آزمایشی ویسکوزیته سیالات ماشین کاری جریان ساینده، مجله مدیریت و فناوری تولید، جلد 7، شماره 4/3/2، صص 142-156.

ویجی کومار جین به عنوان عضو هیئت تحریریه شش مجله بین المللی برگزیده شده است. او هم چنین به عنوان سردبیر مهمان سه شماره در TQM, CAPP و ماشین کاری پیشرفته کار کرده است. پرفسور جین هم چنین داور مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس انجمن مهندسان مکانیک هند (1982)، که در IIT کانپور

در 1999 برگزار شد و سومین همایش SERC در مهندسی ابزار دقیق در 2002 بوده است. او استاد راهنمای 10 رساله دکتری و 70 رساله کارشناسی ارشد بوده و حدود 200 اثر چاپ شده از جمله 4 کتاب دارد. دکتر جین، دارای زمینه های تحقیقاتی مختلف می باشد از جمله فنون ماشینکاری پیشرفته، ماشینکاری مواد مهندسی پیشرفته، پدیده شتاب کرنش برشی در برش فلز، تولید به کمک کامپیوتر، CAPP و سایر زمینه های مربوط به علوم تولید و مهندسی است.

دکتر ک. مورالدهار، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، موسسه فناوری هند، کانپور از سال 1987 بوده است. ایشان دکتری خود را در زمینه علوم کاربردی از دانشگاه دلاور امریکا در 1985 اخذ کرده و سپس در مقطع فوق دکتری در آزمایشگاه لاورنس برکلی تا 1987 تحصیل کرد. او به عنوان استادیار به IIT کانپور پیوسته و سپس به سطح دانشیاری در 1993 ارتقا و در 1995 به استاد تمام تبدیل شد. زمینه های مورد علاقه ایشان شامل مکانیک سیالات و علوم حرارتی است. ایشان آزمایشات و شبیه سازی های عددی انجام داده و تحقیقاتشان شامل حل مسائل بنیادین و زمینه های مهندسی است. آزمایشات او مستلزم استفاده از فنون اندازه گیری لیزری است که برخی از این فنون در آزمایشگاه خود او ابداع شده است. علایق فعلی او مربوط به رشد کریستال های نوری، دینامیک ورتیسیتی، کاهش درگ اصطکاکی، پدیده های بین سطحی و تعیین معکوس خواص ترموفیزیکی است. او نویسنده کتاب با عنوان " جریان سیالات محاسباتی و انتقال گرما" است. او بیش از 60 مقاله را در مجلات بین المللی، 15 مقاله در مجلات هند و بیش از 70 مقاله همایشی منتشر کرده است.

1- مقدمه

ماشینکاری جریان ساینده یک فرایند پرداخت کاری است که در آن یک مقدار کمی از مواد از طریق جریان بتونه دارای ذرات ساینده و نیمه جامد (موسوم به سیال) در سطح ماشینکاری شده حذف می شود. سیال، یک ماده خمیر مانند با ویسکوزیته بالا می باشد و با اعمال فشار اندک دفورمه شده و تغییر شکل می یابد. دو استوانه عمودی متقابل، سیال ساینده را از طریق مسیر تشکیل شده قطعه کار و شکل دهی و یا از طریق تنها قطعه کار، اکستروود می کنند. سیال ساینده نیمه جامد از طریق قطعه کار و یا از طریق معبر محدود تشکیل شده توسط قطعه کار، اعمال می شود. ذرات ساینده به عنوان ابزار های برش عمل کرده

و منجر به ایجاد یک فرایند برش چند نقطه ای می گردند. سرعت حذف مواد، بسیار پایین است. فرایند برای هر دو فلزات و غیر فلزات استفاده می شود. ماشین کاری جریان ساینده برای خودکار سازی عملیات پرداخت کاری مناسب است که نیازمند هزینه و نیروی کار بالاست. هم چنین ماشین کاری جریان ساینده برای عملیات پرداخت کاری (ظریفکاری) در هوا فضا، خودرو سازی، صنایع نیمه رسانا و تجهیزات پزشکی مورد استفاده قرار می گیرد. به طور اخص، ماشینکاری جریان ساینده برای پرداخت کاری سطوح قالب های اکستروژن، نازل های (دهانه های) مشعل برش دهنده و سطح ایرفویل یک پروانه، پلیسه گیری بدنه دریچه های هواپیما و حذف لایه منجمد شده پس از ماشینکاری تخلیه الکتریکی بسیار مفید است.

ویژگی های سیال از جمله ویسکوزیته آن، غلظت ذرات ساینده و دما، تعیین کننده قدرت عمل ذرات ساینده در طی فرایند ماشینکاری جریان ساینده است. سیالات مورد استفاده در ماشین کاری سیال ساینده، یک ماده با انعطاف پذیری کافی می باشد به طوری که وقتی از درون یک معبر عبور می کند، به عنوان سنگ سنباده عمل می کند (راداس 1989). این سیالات متشکل از یک سری ذرات ساینده و بازی با دو یا سه اندازه متفاوت می باشند. ماده بازی، ویسکوالاستیک بوده و متشکل از یک ژل هیدروکربنی و پلیمر ارگانیک است. ترکیب ماده بازی تعیین کننده درجه سفتی آن است. سفت ترین سیال، برای حفره های کوچک استفاده می شود. سفتی بالای سیال منجر به اکستروژن خالص می شود در حالی که سیال های نرم منجر به افزایش سرعت جریان در مرکز به جای دیواره ها می شود. گفته می شود که جریان های با سفتی بالا به طور یکنواخت تری معبر را پرداخت کاری می کنند، و این در حالی است که سیال با سفتی پایین منجر به افزایش شعاع دهانه معبر می شود (وليامز و راجارکر 1989، 1992). تجربه انواع مختلف سیالات و ذرات ساینده در منابع گزارش شده است (ایناسکی و همکاران 1993، لاولس و همکاران 1994، پری 1989). شواهد مبرهنی وجود دارد که نشان می دهد ویسکوزیته سیالات نقش بسیار مهمی در ماشین کاری جریان ساینده ایفا می کند. اگرچه تلاش های محدودی در منابع گزارش شده است (دیویس و فلچر 1995، فلچر و همکاران 1990، هال و همکاران 1992)، یک رویکرد سیستمی در راستای ارزیابی ویسکوزیته سیال ارایه نشده است.

در مطالعه پیشین (جین و همکاران 2001)، محققان، ساخت یک ویسکومتر موین را برای اندازه گیری ویسکوزیته سیالات ماشین کاری جریان ساینده گزارش کردند. مزیت طرح مربوط به سادگی آن بود به ویژه این که امکان اندازه گیری در حالت پایدار وجود داشت. با این حال، با دو محدودیت مواجه بود: اولاً، این دستگاه بزرگ بوده و نیازمند حجم زیادی مواد است. دوماً، بار استاتیک مورد نیاز برای حفظ جریان، بسیار زیاد و بین 100-150 کیلوگرم بود. سوماً، بقایای روغن در نمونه سیال منجر به پراکندگی قابل توجهی در داده های اندازه گیری شد. دستگاه تولید شده در این مطالعه مستلزم تعداد نمونه ها و بار کم تری است با این حال این روش وابسته به پاسخ و واکنش موقت سیال است و از این روی مستلزم این است که اندازه گیری ها تابعی از زمان باشند. فشردگی دستگاه در زمانی که ویسکوزیته به صورت تابعی از دما محاسبه شود، دارای یک مزیت ذاتی است.

اهداف اصلی این مطالعه را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- 1- طراحی و ساخت یک دستگاه برای اندازه گیری ویسکوزیته سیالات ساینده
 - 2- مطالعه تغییرات در ویسکوزیته با غلظت و دمای ذرات ساینده
 - 3- مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از یک ویسکوزیته شیشه ای (موین)
- 2- مدل ویسکوالاستیک

سیالات AFM در این مطالعه به صورت یک جامد کلویین (فلاگ 1967) مدل سازی شده است. این را می توان به صورت ترکیبی از یک فنر و دمپر که به طور موازی به هم متصل شده اند ترسیم کرد. در همه اوقات، کرنش ε دو عنصر برابر بوده و تنش کل σ به σ' (فنر) و σ'' (دمپر) تقسیم می شود به طوری که آن ها کرنش ε برابری را تجربه می کنند. این شرایط را می توان به صورت زیر بیان کرد

$$\sigma' = E\varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma'' = \eta \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

در این جا، E مدول کشسانی و η ویسکوزیته است. تنش کل، مجموع هر دو تنش وارده بر فنر و دمپر خواهد بود یعنی

$$\sigma = \sigma' + \sigma'' \quad (3)$$

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}. \text{ Or, } \dot{\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{T} = \frac{\dot{\sigma}}{\eta} \quad (4)$$

که $T = \frac{\eta}{E}$ است. معادله 4 رفتار یک جامد کلومین را تعریف می کند. برای یک تنش اعمال شده واحد

$$\sigma = H(t). \quad (5)$$

معادله 4 را می توان به صورت زیر باز نویسی کرد

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} (1 - \exp(-\frac{t}{T})) \quad (6)$$

برای مطالعه رفتار مواد ویسکوالاستیسیته، یک آزمون خزش استاندارد اغلب استفاده می شود. در این جا یک

تنش اعمال شده و کرنش وابسته به زمان ε اندازه گیری می شود. برای مواد خطی، کرنش با

تنش متناسب بوده و می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t) \quad (7)$$

تابع $J(t)$ کرنش در هر واحد تنش اعمال شده می باشد و ویژگی مربوط به ماده است. به ازای $t > 0$ یک

تابع افزایشی بوده و موسوم به وادادگی خزش است. برای یک کلومین جامد، معادله (6) نشان می دهد که وادادگی

خزش به صورت زیر بیان می شود

$$J(t) = \frac{1}{E} (1 - \exp(-\frac{t}{T})) \quad (8)$$

وادادگی خزش که با معادله 8 بدست می آید را می توان به طور آزمایشی تعیین کرد. با کمک تابع وادادگی خزش، ویسکوزیته سیال AFM را می توان محاسبه کرد. مدول کشسانی را می توان به طور معادل از حیث مدول حجمی یافت (اگراول 1999، دروزدوف 1996، فلاگ 1996).

تعیین آزمایشی مدول حجمی و وادادگی خزش سیال AFM، و محاسبه ویسکوزیته از وادادگی خزش در زیر بحث شده است. فرضیات زیر اجرا شده اند:

- از نیرو های اینرسی چشم پوشی شده است
- فرض بر این است که نیرو های اجسام ناچیز هستند
- میدان های تنش و کرنش فرضا دارای تقارن محوری هستند
- شرط تنش صفحه بر قرار است (مولفه تنش در جهت Z، صفر است)

شرایط بار گذاری برای بدست آوردن مدول حجمی به صورت زیر است. یک قطعه استوانه ای به شعاع r و طول L رادر نظر بگیرید. فشار P_0 به طور شعاعی به زاویه $\alpha (= \pi)$ از هر دو طرف اعمال می شود. فرض بر این است که هیچ تغییری در شکل قطعه کار در طی بار گذاری وجود ندارد یعنی شرط اتساع خالص برقرار است. با استفاده از اصل تناظر، معادله برای تغییر حجم به صورت تابعی از زمان برای جامد کلویین را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$\Delta V(t) = \frac{-2}{3} r^2 \pi L P_0 B(t) \quad (9)$$

در این جا، $B(t)$ مدول حجمی ماده ویسکوالاستیک و تابعی از زمان است. شرایط بار گذاری برای اندازه گیری وادادگی خزش به صورت زیر است. یک استوانه ساخته شده از ماده الاستیک با شعاع r و طول L وجود دارد. فشار شعاعی در سراسر محیط استوانه اعمال می شود. مقدار Δ فاصله بین صفحه صلب و سطح فوقانی استوانه است. در زمان t^* ، استوانه با صفحه صلب تماس برقرار کند. همان طور که در مطالعه دیویس و فلچر (1995) گزارش شده است، معادله تابع وادادگی خزش را می توان به صورت زیر مشتق کرد:

$$J(t) = \frac{1}{3} \left[\frac{9\Delta}{L\sigma_0} + 2B(t) \right] \quad (10)$$

وادادگی خزش برای مواد ویسکو الاستیک را می توان به طور آزمایشی با معادله 10 بدست آورد. بر اساس داده های وادادگی خزش به صورت تابعی از زمان، یک منحنی به شکل

$$J(t) = a + b \times \exp(-c \times t) \quad (11)$$

رامی توان با $a-b-c$ به صورت ضرایب رگرسیون برازش داد. با مقایسه معادله فوق (11) با معادله 8، ویسکوزیته ماده η را می توان به صورت زیر $1/(a \times c)$ بدست آورد

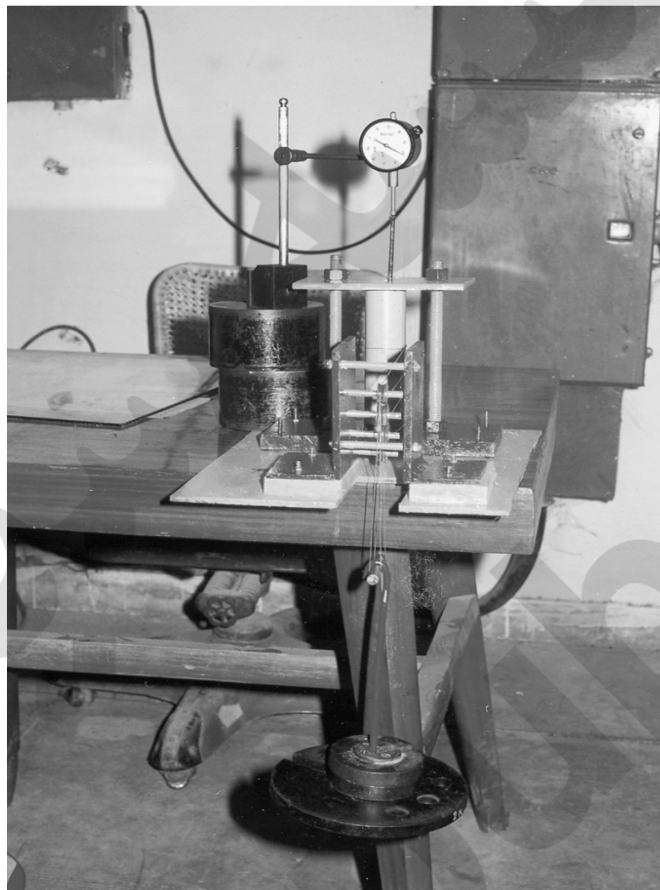
3- ابزار آزمایش

سیال مورد استفاده در این مطالعه، پلی بروسیلیکان (تهیه شده توسط اکسترود هون، امریکا) و مواد ساینده شامل ذرات سیلیکون کاربرد می باشند.

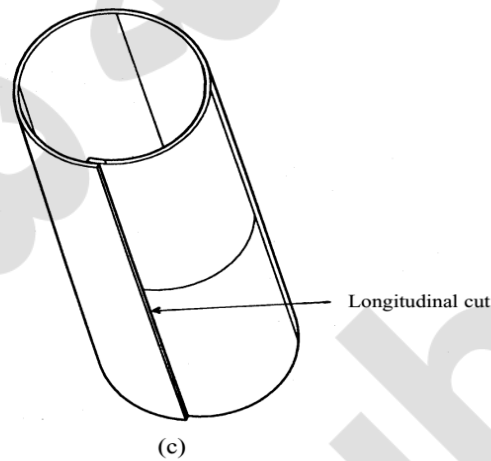
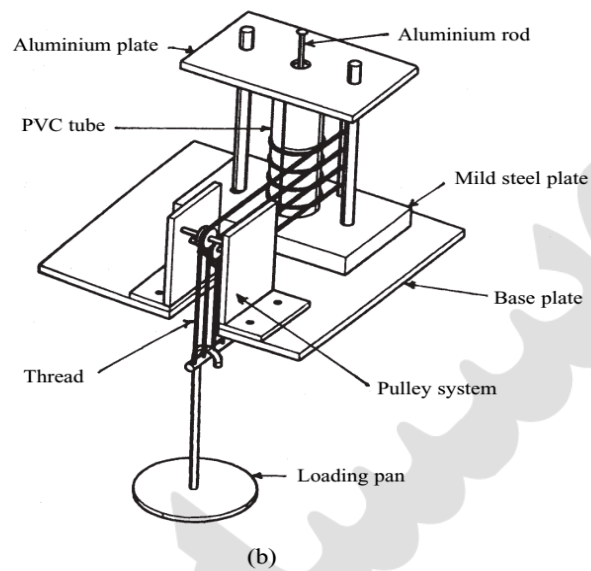
بارگذاری نمونه شامل اعمال یک توزیع فشار شعاعی یکنواخت در امتداد طول قطعه استوانه ای سیال AFM می باشد. برای این منظور، یک لوله پلی وینیل کلرید (PVC) با طول 160 میلی متر، قطر خارجی 40 میلی متر و ضخامت 1 میلی متر استفاده می شود. این لوله در امتداد طول خود برش داده می شود به طوری که یک انتهای طولی آزاد لوله را بتوان بر روی انتهای دیگر قرار داد و فشار شعاعی را به قطعه استوانه ای انتقال داد. فشار شعاعی به لوله PVC با کمک یک طناب نایلونی اعمال می شود. طناب در یک انتهای لوله فولادی تثبیت می شود یعنی بر روی یک ورق فولادی سفت می شود. دستگاه طوری طراحی شده است که فشار اعمال شده از طریق لوله بر روی سیال ساینده کاملاً شعاعی بوده و توزیع یکنواختی در طول قطعه استوانه ای داشته باشد. اصطکاک بین سیال و سطح درونی لوله، ناچیز در نظر گرفته می شود. اصطکاک بین نخ نایلونی و سطح بیرونی لوله نیز در مقایسه با بار به کار رفته در آزمایش ناچیز است. طراحی، ساخت و تست دستگاه در مقاله

اگراول(1999) مورد بحث قرار گرفته است. تصویر دستگاه و نیز طرح شماتیک آن در شکل 1 نشان داده شده است. طرحی از ویسکومتر موین در شکل 2 نشان داده شده است.

شکل 1: الف: تصویر دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته بر اساس اصول ویسکوالاستیسیته ب: طرح شماتیک از دستگاه آزمایش پ: طرح لوله PVC حاوی سیال با برش طولی

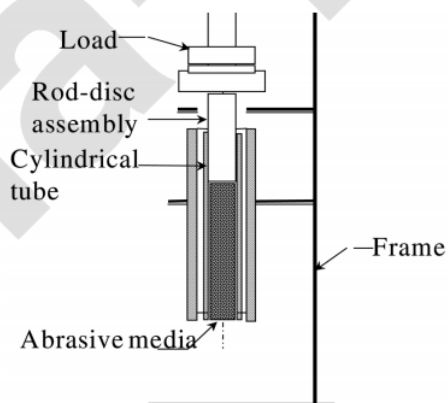


(a)



ورق آلومینیوم، لوله آلومینیوم، لوله PVC، ورق فولادی نرم، ورق پایه، ریسمان، سیستم قرقره، کفه بارگذاری، برش طولی،

شکل 2: طرح شماتیک از ویسکومتر مویینه از جین و همکاران 2001



بار، مجموعه دیسک-میله، لوله استوانه ای، فریم، سیال ساینده

4-روش آزمایشی

سیال AFM با غلظت مورد نیاز ذرات ساینده و دمای مناسب به شکل یک قطعه استوانه ای در نظر گرفته می شود. قطعه درون لوله PVC قرار می گیرد (شکل 1پ). قطر استوانه سیال موسوم به استوانه آزمایشی برابر با قطر درونی لوله است. لوله به طور عمودی بر روی ورقه فولادی نرم قرار می گیرد به طوری که قطعه استوانه ای با ورق فولادی نرم در پایین تماس برقرار می کند. انتهای دیگر استوانه آزمایشی آزاد است و به طور قائم حرکت می کند. طناب نایلونی بر روی لوله پیچیده می شود. یک لوله الومینیومی بر بالای استوانه آزمایشی قرار می گیرد. این انتهای لوله با ورقه آلومینیوم پوشش دهی می شود. به منظور اندازه گیری نوسان و حرکت استوانه آزمایشی، یک گیج اندازه گیری دقیق (که در شکل 1 ب نشان داده نشده است) بر روی سطح فوقانی میله الومینیومی قرار داده شده است به طوری که پیستون آن دقیقاً با میله الومینیومی در تماس است. فشار شعاعی بر لوله با وارد شدن اوزان در کفه بار گذاری، اعمال می شود. در آزمایشات، اوزان 5-10 کیلوگرم، استفاده شده است. به دلیل فشار شعاعی، انتهای طولی لوله ها بر روی یک دیگر می لغزند، با این حال تحت فشار مواد درون لوله قرار دارند. فشار شعاعی اعمال شده بر روی لوله به طور کامل به سیالات اعمال می شود. به دلیل این فشار، قطر استوانه کاهش یافته و در عین حال، طول آن افزایش می یابد. افزایش طول استوانه منجر به حرکت و جا به جایی لوله الومینیومی واقع در سطح فوقانی استوانه می شود. حرکت صعودی لوله الومینیومی را می توان با گیج اندازه گیری، اندازه گیری کرد. دقت این گیج اندازه گیری 0.01 میلیمتر است. کاهش قطر با کمک یک ورنیر کالیپر دیجیتال اندازه گیری می شود که دارای حداقل تعداد 0.01 میلی متر است. اندازه گیری های طول و قطر در واحد های زمانی از پیش تعریف شده اجرا می شوند. زمان آزمایش حدوداً 200 تا 300 ثانیه است. برای اثبات کیفیت دستگاه، آزمایش برای طول های مختلف اولیه استوانه و در بار های مختلف انجام شده است. برای درک تکرار پذیری، آزمایشات 5 بار برای یک طول و بار معین قطعه آزمایشی استوانه ای انجام شده است. اثر غلظت ذرات ساینده بر روی ویسکوزیته از طریق آزمایشات انجام شده در غلظت های مختلف مطالعه شده است. به منظور مطالعه اثر دما، آزمایشات در دما های مختلف برای یک غلظت خاصی از ذرات ساینده انجام شده است.

نتایج این مطالعه با نتایج ویسکومتر مویینه (شکل 2) ارایه شده توسط محققان قبلی مقایسه شده است (جین و همکاران 2001).

5-نتایج و بحث

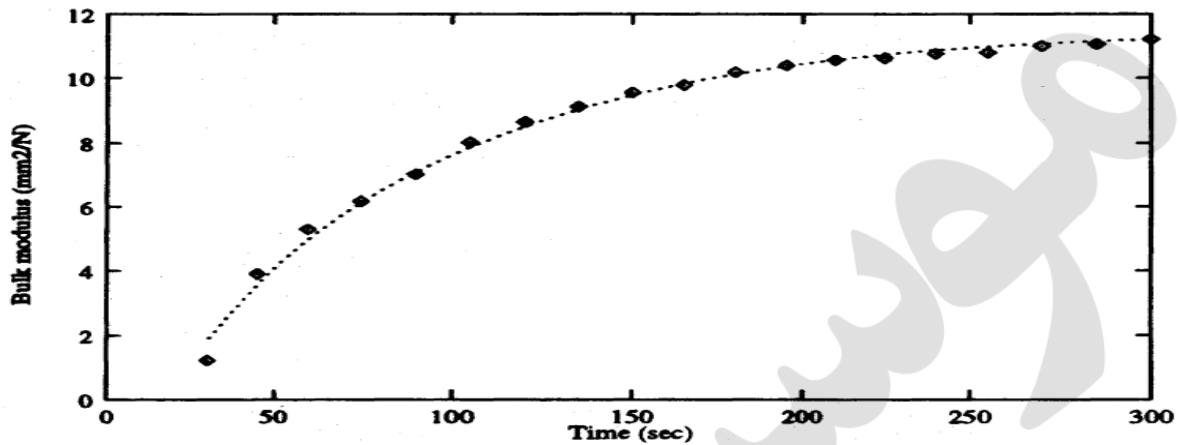
داده های ویسکوزیته همراه با بحث مربوط به حساسیت این داده ها به طول نمونه و بار اولیه، نقاط داده های کاهشی و تکرار پذیری آزمایش در این بخش بررسی شده اند. به علاوه، آزمایشات بر روی ویسکوزیته سیال در غلظت های مختلف ساینده و دما های مختلف نیز گزارش شده است. نتایج آزمایشات برای تعیین ویسکوزیته در غلظت های مختلف ذرات ساینده از ویسکومتر فعلی با نتایج بدست آمده از ویسکومتر مویینه مقایسه می شود (جین و همکاران 2001).

5-1 اثر طول نمونه و بار اولیه

شکل 3-4 مدول حجمی و وادادگی خزش را به صورت تابعی از زمان برای یک مقدار معین طول اولیه نمونه و بار اولیه نشان می دهد. نمودار ها نشان می دهند که مدول حجمی و وادادگی خزش هر دو به مرور زمان، به طور نمایی افزایش می یابند. این نمودار ها کاملاً مشابه با نمودار های ایجاد شده برای یک جامد کلوین بوده و در حقیقت، اعتبار این فرض را اثبات می کند. در اصل، ویسکوزیته محاسبه شده از تابع وادادگی خزش نبایستی تحت تاثیر تغییرات در طول اولیه نمونه و بار اولیه اعمال شده قرار گیرد. این داده ها در جدول 1 ارایه شده اند که در آن اطلاعات مربوط به بار به طور معادل از حیث تنش شعاعی بیان می شود. تابع نمایی بهترین برازش (معادله 1) برای $B(t)$ و نیز $J(t)$ در جدول 1 گزارش شده است. ضریب همبستگی برازش منحنی در همه آزمایشات 95 درصد است. توابع نمایی با خط چین ها در شکل های 3 و 4 نشان داده شده است. بر اساس جدول 1 می توان گفت که ویسکوزیته بدست آمده در طول های مختلف اولیه (به جز در 120 میلیمتر) و بار های اولیه کاملاً نزدیک به هم هستند. عدم مطابقت در طول 120 میلی متر را می توان به دلیل پراکندگی در نظر گرفت زیرا در آزمایشات دیگر حاصل نشده اند.

شکل 3: مدول حجمی (mm^2/N) به صورت تابعی از زمان در بار 5 کیلوگرم و یک طول نمونه اولیه 110

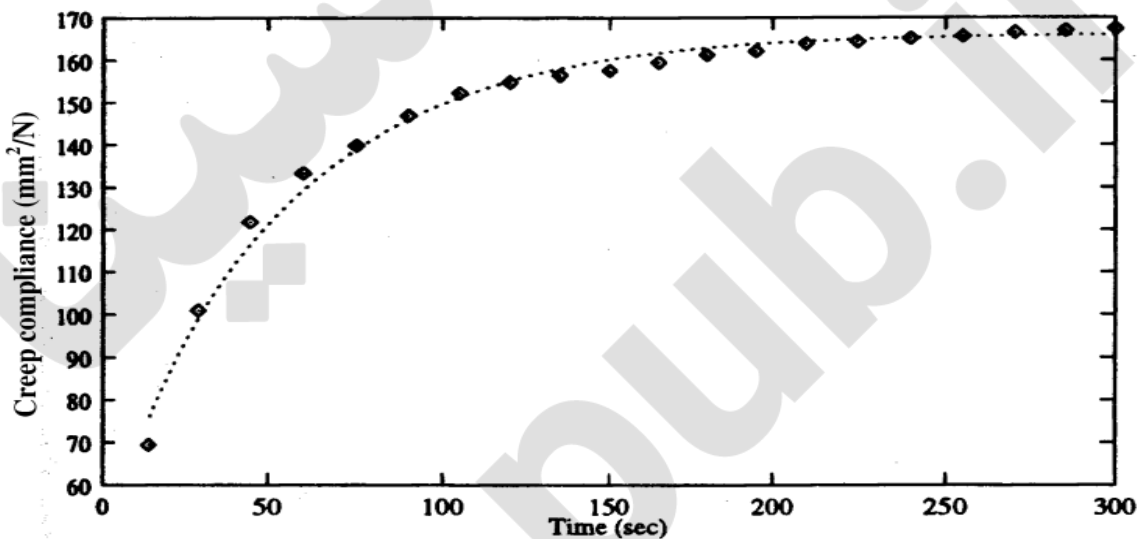
میلی متر. دمای نمونه، 30 درجه است



مدول حجمی، زمان

جدول 4: وادادگی خزش (میلیمتر مربع بر نیوتون) به صورت تابعی از زمان در بار 5 کیلوگرم و طول نمونه

اولیه 110 میلی متر. دمای نمونه 30 درجه است



وادادگی خزش

2-5 نقاط داده کاهش

بر اساس شکل های 3-4 می توان گفت که نرخ اولیه افزایش مدول حجمی و وادادگی خزش بسیار بالا است با این حال شی با گذشت زمان، کاهش می یابد. ویسکوزیته مواد به شدت تحت تاثیر نرخ یا سرعت اولیه قرار می گیرد. برای ارزیابی اهمیت داده های جمع اوری شده در زمان کم، نقاط جمع اوری شده پس از 120 ثانیه نادیده گرفته شدند. ویسکوزیته محاسبه شده از مجموعه داده ها در چارچوب 1-10 درصد مقادیر در جدول

1 است و در جدول 2 گزارش شده است. این موید این نتیجه است که ویسکوزیته اساساً بستگی به بخش متغیر از نظر زمانی تابع نمایی است و اندازه گیری ها بایستی دقیقاً ثبت شوند. همه نتایج ارائه شده در مقاله به صورت مجموعه داده کامل بیان شده اند.

جدول 1: ویسکوزیته سیال AFM در طول های اولیه متفاوت بارها و قطعه کارها

Initial length mm	Radial stress N/m^2	Bulk modulus $B(t)$ mm^2/N	Creep compliance $J(t)$ mm^2/N	Viscosity $N-s/mm^2$
90	0.00457	20.01–20.0 $\exp(-0.014 t)$	121.08–108.64 $\exp(-0.024 t)$	0.344
100	0.00575	16.65–16.45 $\exp(-0.017 t)$	115.65–94.075 $\exp(-0.026 t)$	0.332
110	0.00373	11.51–14.27 $\exp(-0.013 t)$	166.23–122.47 $\exp(-0.02 t)$	0.308
115	0.00357	19.19–20.95 $\exp(-0.011 t)$	121.88–110.51 $\exp(-0.026 t)$	0.315
120	0.00205	42.61–45.34 $\exp(-0.013 t)$	193.51–187.23 $\exp(-0.02 t)$	0.258
130	0.0019	19.78–16.58 $\exp(-0.01 t)$	152.65–154.31 $\exp(-0.021 t)$	0.327

طول اولیه، تنش شعاعی، مدول حجمی، وادادگی خزش، ویسکوزیته

جدول 2: ویسکوزیته سیال AFM با مجموعه نقاط داده کامل و کاهش

Initial length mm	Radial stress N/m^2	Creep compliance $J(t)$ mm^2/N	Viscosity (full data points) $N-s/mm^2$	Viscosity (reduced data points) $N-s/mm^2$	Percentage change in viscosity (%)
90	0.00457	119.39–98.91 $\exp(-0.025 t)$	0.344	0.335	2.64
100	0.00575	109.88–78.29 $\exp(-0.03 t)$	0.332	0.303	8.78
110	0.00373	164.01–124.09 $\exp(-0.022 t)$	0.308	0.277	10.07
115	0.00357	119.32–100.85 $\exp(-0.027 t)$	0.315	0.310	1.63
120	0.00205	186.98–184.09 $\exp(-0.022 t)$	0.258	0.243	5.91
130	0.0019	147.79–147.99 $\exp(-0.0215 t)$	0.327	0.314	3.91

طول اولیه، تنش شعاعی، وادادگی خزش، ویسکوزیته (نقاط داده کامل)، ویسکوزیته (نقاط داده کاهش

یافته)، درصد تغییرات در ویسکوزیته

3-5 تکرار پذیری آزمایشات

یک اندازه گیری آزمایشی در صورتی تکرار پذیر است که نتایج یکسان و مشابهی را برای هر مجموعه از آزمایشات انجام شده به طور مکرر تحت طول اولیه و شرایط بار گذاری مشابه ارائه کند. نتایج این مطالعه نشان داده

است که ویسکوزیته سیال برای آزمایشات انجام شده تحت شرایط اولیه مشابه کاملاً مشابه بوده است. داده ها در جدول 3 گزارش شده اند. میزان عدم قطعیت برای داده های ویسکوزیته را می توان برابر با +4 درصد با حدود اطمینان 95 درصد در نظر گرفت

جدول 3: تست تکرار پذیری برای تعیین ویسکوزیته سیال AFM از 5 آزمایش مستقل

Initial length mm	Radial stress N/m ²	Bulk modulus B(t) mm ² /N	Creep compliance J(t) mm ² /N	Viscosity N-s/mm ²
110	0.00224	32.57–35.23 exp(-0.008 t)	186.01–185.98 exp(-0.016 t)	0.336
110	0.00224	40.37–46.98 exp(-0.006 t)	176.83–157.17 exp(-0.016 t)	0.345
110	0.00224	29.80–36.55 exp(-0.009 t)	190.81–178.39 exp(-0.015 t)	0.349
110	0.00224	34.35–31.48 exp(-0.007 t)	182.64–153.3 exp (-0.0165 t)	0.332
110	0.00224	25.30–25.01 exp(-0.018 t)	170.86–155.08 exp(-0.017 t)	0.344

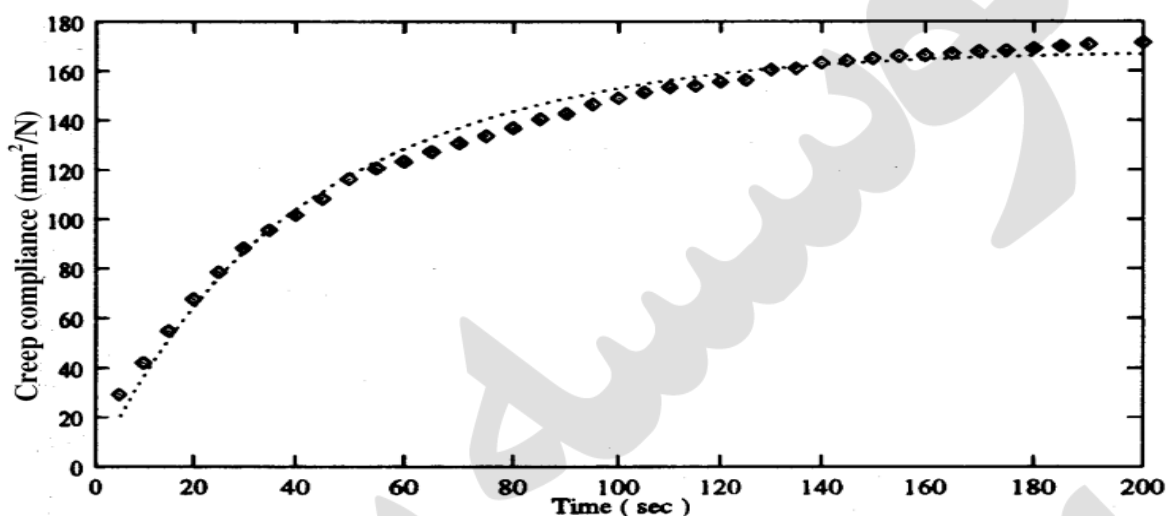
طول اولیه، تنش شعاعی، مدول حجمی، وادادگی خزش، ویسکوزیته

4-5 اثر غلظت ذرات ساینده

شکل 5 وادادگی خزش را به صورت تابعی از زمان، موقعی که سیال AFM با ذرات ساینده بار گذاری می شود، نشان میدهد. اثر ذرات ساینده بر روی مدول حجمی حداقل بوده و گزارش نشده است. این کاملاً قابل درک است زیرا ذرات ساینده علاوه بر مواد AFM، هر دو عملاً تراکم ناپذیر هستند. بر عکس، در این مطالعه مشاهده شده است که با افزایش درصد غلظت ذرات ساینده در سیالات، ویسکوزیته سیال افزایش می یابد. ویسکوزیته در غلظت های مختلف سیالات در جدول 4 گزارش شده است. با افزایش درصد غلظت ذرات ساینده در سیالات، تحرک ذرات سیال کاهش می یابد.

در نتیجه، افزایش طول قطعه استوانه در ویسکومتر کاهش می یابد. این در نهایت منجر به افزایش ویسکوزیته سیال می شود. یک دلیل دیگر را می توان از حیث تئوری ترکیبات ارایه کرد. ویسکوزیته معادل ذرات ساینده بی نهایت بوده و ترکیب سیال حاوی ذرات ساینده دارای ویسکوزیته بزرگ تر از تنها سیال است.

شکل 5: وادادگی خزش (میلی متر مربع بر نیوتون) به صورت تابعی از زمان در بار 3 کیلو گرم و یک طول نمونه اولیه 110 میلی متر. دمای نمونه 30 درجه است. غلظت ذرات ساینده، 66 درصد است



جدول 4: ویسکوزیته سیال AFM در غلظت های مختلف ذرات ساینده

Initial length mm	Radial stress N/m^2	Abrasives concentration (%)	Creep compliance $J(t)$ mm^2/N	Viscosity $N-s/mm^2$
110	0.00224	56	$190.22-145.408 \exp(-0.037 t)$	0.142
110	0.00224	61	$169.494-140.807 \exp(-0.03 t)$	0.197
110	0.00224	66	$168.228-167.804 \exp(-0.024 t)$	0.248
110	0.00224	71	$140.722-124.352 \exp(-0.0254 t)$	0.279
110	0.00224	76	$169.91-143.23 \exp(-0.017 t)$	0.346

5-5 اثر دما

به منظور مطالعه اثر دما بر روی ویسکوزیته، آزمایشات در دما های مختلف سیالات انجام شده است. نمونه در یک حمام با دمای ثابت برای مدت زمان طولانی به منظور افزایش دمای آن به یک مقدار مطلوب نگه داشته شده است. جدول 5 ویسکوزیته سیالات را در دما های متوسط مختلف نشان می دهد. بدیهی است که با افزایش دما، کاهش ویسکوزیته سیال را خواهیم داشت. با افزایش دمای سیالات، افزایش در میزان تغییرات در طول قطعه

استوانه ای، در پاسخ زمانی مشاهده می شود. این معادل با کاهش وزیکوزیته میباشد. در این راستا، رفتار سیال متناسب با رفتار سیال ویسکوز کلاسیک است.

جدول 5: ویسکوزیته سیال AFM به صورت تابعی از دما

Initial length mm	Radial stress N/m^2	Temperature of the media ($^{\circ}C$)	Creep compliance $J(t)$ mm^2/N	Viscosity $N-s/mm^2$
110	0.00149	30	$150.164-136.35 \exp(-0.023 t)$	0.289
110	0.00149	36	$166.622-145.562 \exp(-0.026 t)$	0.231
110	0.00149	42	$202.86-180.043 \exp(-0.027 t)$	0.183
110	0.00149	50	$217.343-203.432 \exp(-0.038 t)$	0.121

به منظور مطالعه مستقل اثر غلظت بر روی ویسکوزیته سیال، آزمایشات با استفاده از ویسکومتر مویین انجام شده اند (جین و همکاران 2001). جدول 6 مقدار ویسکوزیته را در غلظت های مختلف ذرات ساینده بدست آمده از ویسکومتر مویین علاوه بر ویسکومتر فعلی نشان می دهد. مشاهده می شود که نتایج حاصل از ویسکومتر مویین، مشابه با نتایج حاصل از ویسکومتر فعلی است. مشاهده می شود که در غلظت ساینده 56 درصد، تفاوت در ویسکوزیته بالا است. دلیل این است که در غلظت های پایین تر ذرات ساینده، میزان تغییرات طول نمونه بالا است و عدم صحت در اندازه گیری زمان، نقش مهمی ایفا می کند. در غلظت های کوچک تر، انواع ترکیبات برای ذرات علاوه بر دسته بندی جریان ساینده ها امکان پذیر است. این عوامل منجر به پراکندگی در داده های ویسکوزیته شده اند. تفاوت در اندازه گیری حاصل از دو ویسکومتر کوچک تر از تفاوت در سایر غلظت های ساینده است.

جدول 6: ویسکوزیته سیال AFM در غلظت های مختلف ساینده: مقایسه ویسکومتر فعلی با ویسکومتر مویین (جین و همکاران 2001)

Abrasives concentration %	Average viscosity (capillary (Jain et al., 2001)) $kN-s/m^2$	Average viscosity (present viscometer) $kN-s/m^2$	Difference %
56	185.40	142.08	23.36
61	205.60	196.66	4.35
66	231.87	247.69	6.82
71	273.35	279.77	2.35
76	320.07	346.20	8.16

غلظت ساینده، ویسکوزیته متوسط (مویین، جین و همکاران 2001، کیلونیوتون بر ثانیه بر متر مربع)،
ویسکوزیته متوسط ویسکومتر فعلی، درصد تفاوت

6- نتیجه گیری

آزمایشات برای تعیین ویسکوزیته سیال AFM همراه با بحث مربوط به حساسیت ویژگی به طول اولیه نمونه، نقاط داده های کاهشی و تکرار پذیری اندازه گیری ها انجام شدند. تکرار پذیری خوب مشاهده شد و داده ها به پارامتر های فرایند نظیر بعد بار و نمونه حساس نمی باشد. آزمایشات در غلظت های مختلف ذرات ساینده و دمای حجمی سیال AFM تولید شده اند. هم چنین ویسکوزیته در غلظت های مختلف با استفاده از یک ویسکومتر مویین تعیین شده و ویسکومتر فعلی مقایسه شد. نتایج اصلی حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

- سیال AFM دارای یک ویسکوزیته مشخص و تعریف شده بوده و رفتار مکانیکی آن نزدیک به رفتار جامد کلویین است
- با افزایش درصد غلظت ذرات ساینده، یک افزایش پیوسته در ویسکوزیته وجود دارد
- اثر معنی دار دما بر روی ویسکوزیته سیال مشاهده می شود. ویسکوزیته سیال با افزایش دما کاهش می یابد
- ویسکومتر ایجاد شده در این مطالعه، چند منظوره و تکرار پذیر است. نتایج ویسکوزیته سیال در غلظت های مختلف ذرات ساینده نزدیک به نتایج ویسکومتر مویین است. اندازه گیری ویسکوزیته ذرات ساینده با استفاده از رویکرد فعلی ساده تر از ویسکوزیته مویین است.