

## بررسی وابستگی دمایی گرانیوی (ویسکوزیته) و هدایت الکتریکی

### یک مینای ویژه مس

علیرضا سبلانی، علیرضا میرحیابی، حسین قصابی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

ar\_mirhabibi@iust.ac.ir

**چکیده:** هدف از این پژوهش، بررسی تغییرات گرانیوی (ویسکوزیته) و هدایت الکتریکی یک مینای پروسیلیکات سرب‌دار ویژه مس نسبت به دما است. با استفاده از نمودار دیلاتومتری دماهای  $T_g$  و  $T_s$  این مینا به ترتیب ۴۷۸/۶ و ۵۲۳/۹ درجه سانتیگراد تعیین شدند. با استفاده از رویت انحنای مینا در میکروسکوپ حرارتی دمای  $T_{1/2}$  برای ویسکوزیته  $10^{2/55}$  Pa.s استخراج گردید. با استفاده از ۳ دما و ویسکوزیته مربوط به آن‌ها و به کمک معادله VFT، منحنی وابستگی ویسکوزیته نسبت به دما برای این مینا رسم شد. با توجه به منحنی گرانیوی و بررسی‌های میکروسکوپی شرایط بهینه پخت و دماهای مشخصه استخراج گردید. برای این مینا هدایت الکتریکی  $10^{-1} \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1}$  در دمای ۳۳۵ درجه سانتیگراد حاصل شد.

**کلید واژه:** مینای مس، پروسیلیکات سرب‌دار، گرانیوی، هدایت الکتریکی.

### ۱- مقدمه

رفتار ذوب و ویسکوزیته (گرانیوی) میناها و پوشش‌های شیشه‌ای بر روی خواصی چون صافی و همگنی سطح، تبلور، حلالیت اکسیدهای دیرگداز و رنگی، واکنش بین پایه و لعاب و نیز تشکیل فصل مشترک آن‌ها تاثیرگذار است. بنابراین بررسی رفتار ذوب لعاب‌ها در هنگام پخت دارای اهمیت زیادی است [۱-۳].

شیشه‌ها و لعاب‌ها (میناها) در زیر دمای  $T_g$  دارای رفتار آرنیوسی هستند و وابستگی گرانیوی آن‌ها به دما با رابطه‌ی ۱ بیان می‌گردد:

$$\eta = \eta_0 \exp(Q/RT) \quad (1)$$

که در آن  $Q$  انرژی اکتیواسیون برای جریان ویسکوز،  $\eta$  گرانیوی مذاب و  $\eta_0$  ضریبی مستقل از دماست [۲-۴]. اما در دماهای بالاتر از  $T_g$  گرانیوی حقیقی بیشتر از معادله فوق است، زیرا انرژی اکتیواسیون برای جریان ویسکوز ثابت نیست. معادله وگل - فولچر - تامان<sup>۱</sup> (VFT) متغیر دیگری،  $T_0$  (ثابتی که نشان دهنده درجه پیوستگی ذرات می‌باشد)، را به معادله آرنیوس اضافه می‌کند:

$$\log \eta = A + B/(T-T_0) \quad (2)$$

که در آن  $A$ ،  $B$  و  $T_0$  ثابت هستند [۲].

چون برای تعیین ثابت‌های معادله VFT جهت تعیین وابستگی گرانیوی از دما به سه زوج عددی (گرانیوی و دما) نیاز است پس به

<sup>1</sup> Vogel-Fulcher-Tamman

این طریق امکان یافتن ثابت‌های رابطه VFT شیشه‌ها و لعاب‌ها فراهم می‌گردد. یکی از روش‌ها برای دستیابی به ثابت‌های رابطه ۲ تعیین دماهای  $T_g$ ،  $T_s$  و  $T_{1/2}$  است که توسط دیلاتومتر و میکروسکوپ حرارتی قابل اندازه‌گیری هستند [۴-۵]. در فلزات تنها الکترون‌های آزاد و در نیمه‌هادی‌ها، الکترون‌ها و یا حفره‌های الکترونی عامل هدایت هستند. اما در سرامیک‌ها به دلیل حضور یون‌ها، اعمال یک میدان الکتریکی می‌تواند یون‌ها را تحریک به، مهاجرت نماید. بنابراین در رابطه با هدایت الکتریکی در سرامیک‌ها بایستی دانست که هر دو نوع هدایت، یونی و الکترونی، نقش خواهند داشت، در مذاب شیشه‌ها نیز عمدتاً یون‌های محرک عامل انتقال جریان الکتریکی هستند. بیشتر شیشه‌ها در دماهای معمول عایق بودن الکتریکی خوبی را از خود نشان می‌دهند، اما در برخی موارد افزایش دما منجر به افزایش قابل توجه هدایت الکتریکی در آن‌ها می‌گردد. در بیشتر شیشه‌های تجاری و بخصوص شیشه‌های بروسیلیکاتی هدایت الکتریکی قویاً به مقدار یون‌های سدیم و حرکت آن‌ها در شبکه شیشه بستگی دارد [۶-۹]. آگاهی از هدایت یونی در شیشه‌ها به چند دلیل دارای اهمیت می‌باشد. نخست آنکه کاربردهایی همچون عایق الکتریکی اساساً به هدایت الکتریکی و وابستگی آن از دما وابسته می‌باشند. علاوه بر آن هدایت یونی می‌تواند برای پیش‌بینی برخی دیگر از خواص، همچون پایداری شیمیایی، که با نقل و انتقال یون مرتبط می‌باشند نیز به کار رود. از سوی دیگر تغییر هدایت با ترکیب می‌تواند به شناسایی ساختار شیشه‌ها کمک کند [۱۰-۱۳].

مقاومت الکتریکی و مقاومت به خوردگی مهم‌ترین خواص مورد انتظار میناهای استفاده شده در سیم‌ها و سیم‌پیچ‌های مسی هستند که این سیم‌ها در دماهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمانی که جریان الکتریکی در این سیم‌ها جاری می‌شود به منظور عدم ایجاد میدان الکتریکی و محافظت از آن‌ها از پوششی استفاده می‌کنند که معمولاً پلیمری است ولی محدوده کاربرد این پوشش‌ها زمانی که دما از محدوده‌ای بالاتر رود کمتر می‌شود، از این رو میناهای سرامیکی پوشش‌هایی هستند که این عیب را برطرف می‌کنند. البته رفتار مقاومت الکتریکی میناهای سرامیکی نسبت به دما متفاوت است. بنابراین از این رو بررسی هدایت الکتریکی میناها نسبت به دما ضروری است [۱۴-۱۵].

## ۲- فعالیت تجربی

در این پژوهش از یک مینا بر پایه بروسیلیکاتی سرب‌دار و ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۱ استفاده شد: برای رسم نمودار گرانیروی بر حسب دما از روش پیشنهاد شده توسط Ahmed و Earl [۴] استفاده شد که بر اساس نتایج دیلاتومتری (Netzsch مدل 402E) و میکروسکوپ حرارتی (Hengtech) حاصل می‌شود.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مینای مورد مطالعه

اکسید	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	BaO	CaO	MgO	PbO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F
درصد وزنی	۷/۸۹	۵/۴۸	۲/۸۸	۱/۸۵	۰/۲۷	۲۷/۷۱	۳/۷	۰/۱	۰/۸	۳۵/۳	۱۲/۰۷	۰/۰۷	۱/۰۷	۰/۷۶

<sup>۱</sup> دمای انتقال شیشه

<sup>۲</sup> دمای نرم شدن

<sup>۳</sup> دمایی است که نمونه در میکروسکوپ حرارتی به شکل نیم کره (ارتفاع نمونه نصف عرض آن و زاویه تماس ۹۰°) در می‌آید.

بر اساس جدول ۲ با معلوم بودن دماهای مشخصه و گرانیوی آن‌ها ثابت A، B و T<sub>0</sub> با استفاده از روابط ۳، ۴ و ۵ قابل استخراج هستند.

جدول ۲- گرانیوی دماهای مشخصه و دستگاه تعیین کننده دماها

دما (°C)	گرانیوی (Pa.s)	دستگاه
T <sub>g</sub>	۱۰ <sup>۱۲</sup>	دیلاتومتر
T <sub>s</sub>	۱۰ <sup>۹/۲۵</sup>	دیلاتومتر
T <sub>1/2</sub>	۱۰ <sup>۳/۵۵</sup>	میکروسکوپ حرارتی

$$T_0 = \frac{12T_g - 3.55T_{1/2} + \frac{(9.25T_s - 12T_g) \left( \frac{T_{1/2} - T_g}{2} \right)}{K(T_s - T_g)}}{8.45 - 2.75 \frac{\left( \frac{T_{1/2} - T_g}{2} \right)}{K(T_s - T_g)}} \quad (3)$$

$$A = \frac{(9.25T_s - 12T_g + 2.75T_0)}{T_s - T_g} \quad (4)$$

$$B = (T_g - T_0)(12 - A) \quad (5)$$

برای بررسی ریز ساختاری مقطع عرضی نمونه‌های میناکاری شده بعد از سمباده زنی و پولیش از میکروسکوپ نوری (Meiji) استفاده شد. دو نمونه برای پیدا کردن زمان بهینه پخت انتخاب گردید و مورد بررسی قرار گرفت. به کمک رابطه ۶ مقدار هدایت الکتریکی شیشه (مینا) محاسبه می‌شود.

$$X_x = \frac{L}{R_p \left( \frac{U}{U_p} - 1 \right) A} \quad (6)$$

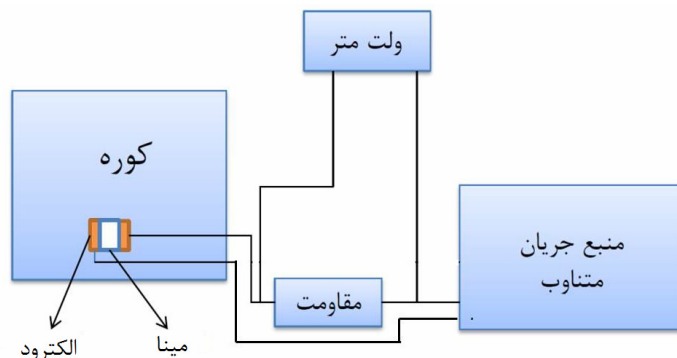
که در این رابطه X<sub>x</sub> هدایت الکتریکی، U اختلاف پتانسیل اعمال شده روی مینا، U<sub>p</sub> تغییرات اختلاف پتانسیل مقاومت A، R، سطح تماس مینا با الکترود، L ضخامت مینا و R<sub>p</sub> مقاومت معادل مقاومت داخلی ولت متر است. برای مقایسه هدایت الکتریکی شیشه‌ها دمایی که در آن هدایت الکتریکی ۱۰<sup>-۸</sup> cm<sup>-1</sup>Ω<sup>-1</sup> باشد، را بیان می‌کنند. وابستگی دمایی هدایت الکتریکی شیشه‌ها و لعاب‌ها بر اساس رابطه ۷ تعریف شده است [۱۶].

$$\log X_x = A' - B'/T \quad (7)$$

که در آن A' و B' ثابت معادله‌اند.

برای تعیین تغییرات هدایت الکتریکی مینای آزمایشی بر حسب دما از دستگاه طراحی شده بر اساس شکل ۱ استفاده شد. برای این منظور پس از ذوب مینا و آنیل نمودن آن، نمونه‌ای مکعب مستطیلی به ابعاد ۱/۱×۱/۴×۰/۶

سانتی متر مکعب از آن تهیه شد. برای بهبود رسانایی الکتریکی ابتدا دو سطح جانبی نمونه با نقره مایع پوشش داده شده و سپس با پخت در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد به پوشش نقره‌ای نازک تبدیل گردید. به کمک دو الکتروود مسی انتقال ولتاژ جریان متناوب به نمونه صورت گرفت در حالی که به وسیله کوره الکتریکی به صورت پیوسته و براساس نرخ ثابت دمای محل استقرار نمونه افزایش می‌یافت.

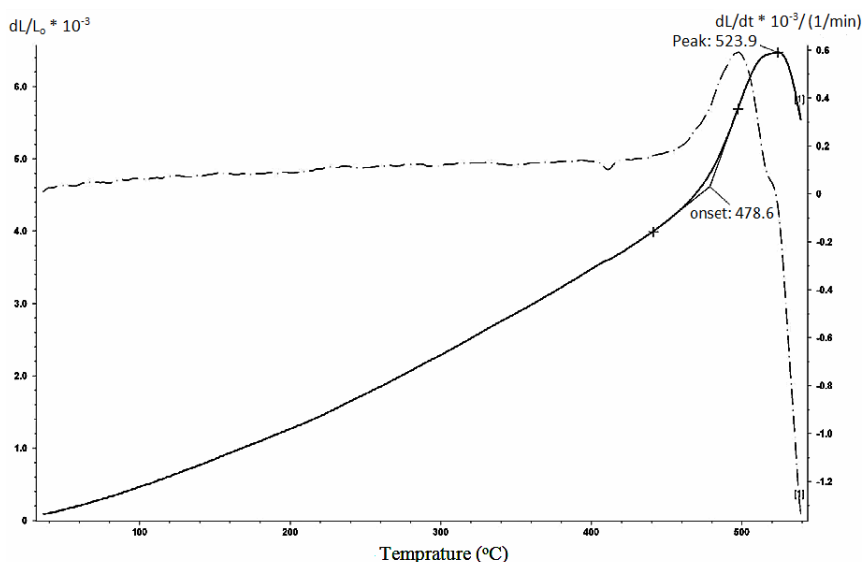


شکل ۱- شمای سیستم اندازه‌گیری تغییرات هدایت الکتریکی بر حسب دمای مینای آزمایشی

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ویسکوزیته (گرانروی)

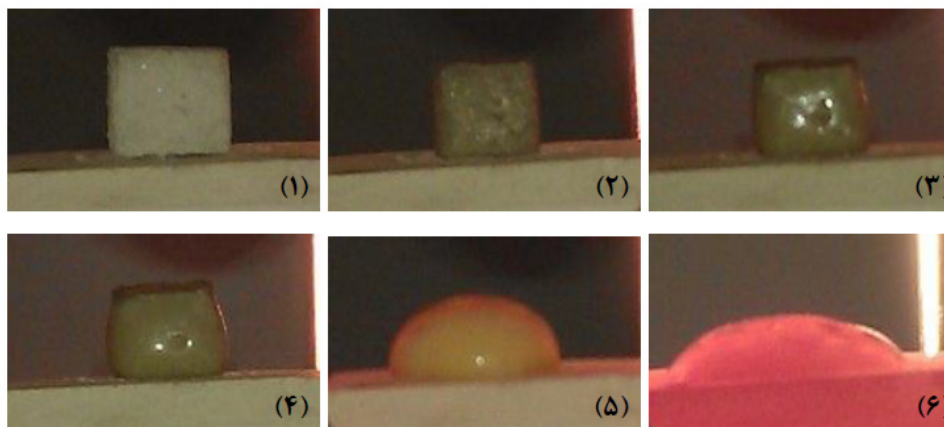
دو دمای  $T_g$  (۴۷۸/۶ °C) و  $T_s$  (۵۲۳/۹ °C) با توجه به نمودار دیلاتومتر که در شکل ۲ آمده است، تعیین گردیدند.



شکل ۲- نمودار دیلاتومتری مینای آزمایشی

دمای  $T_{1/2}$  به کمک میکروسکوپ حرارتی تعیین گردید. در شکل ۳ مراحل مختلف پخت مینا از دمای محیط تا دمای ذوب کامل نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود از دمای ۶۹۰ درجه سانتیگراد، تغییراتی در ابعاد نمونه بوجود می‌آید و نمونه

شروع به انقباض می کند که این نشان دهنده شروع اتصال ذرات به یکدیگر و آغاز زینتر شدن نمونه می باشد. زمانی که سطح نمونه براق می شود و گوشه ها شروع به پخ شدن می کنند، ذوب مینا آغاز می گردد، سپس با افزایش دما حالت نیم کره ای شدن ظاهر می شود، تا جایی که ارتفاع این نیم کره نصف حالت اولیه می گردد و زاویه تماس با سطح تقریباً ۹۰ درجه می شود که این دما همان دمای  $T_{1/2}$  ( $800^{\circ}\text{C}$ ) می باشد. در نهایت نیم کره پهن شده و ذوب شدن مینا در دمایی معادل  $850^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد صورت می گیرد.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ حرارتی مینای آزمایشی در دماهای: (۱) محیط، (۲) شروع زینتر  $690^{\circ}\text{C}$ ، (۳) پایان زینتر  $705^{\circ}\text{C}$ ، (۴) شروع ذوب  $710^{\circ}\text{C}$ ، (۵) نیم کره شدن  $800^{\circ}\text{C}$  ( $T_{1/2}$ ) و (۶) ذوب  $850^{\circ}\text{C}$

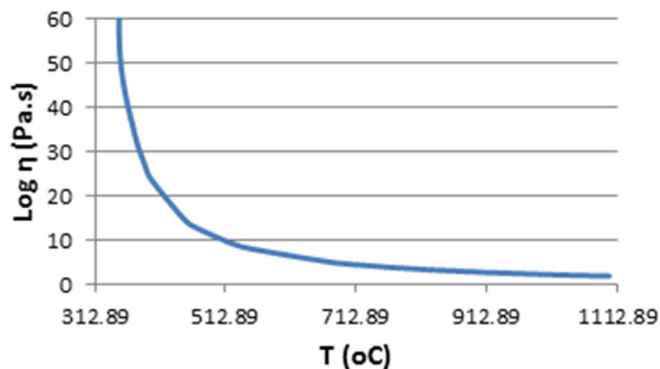
حال با مشخص شدن سه دما برای ویسکوزیته های معین محاسبه ثوابت معادله VFT صورت می گیرد. نتیجه در جدول ۳ و سپس پس از جایگزینی در رابطه ۶ مشاهده می شود:

جدول ۳- ثوابت محاسبه شده معادله VFT

A	B	$T_0$
-۰/۸۰۵	۲۱۲۱/۴۶	۳۱۲/۸۹

$$\log \eta = -0.805 + 2121.46/(T-312.89) \quad (6)$$

با استفاده از رابطه ۶ نمودار ویسکوزیته بر حسب دما برای این مینا در شکل ۴ رسم شده است.



شکل ۴- منحنی وابستگی ویسکوزیته از دما مینا

با توجه به شکل ۴ در دمای پخت ۸۵۰ درجه سانتیگراد، گرانروی برابر Pa.s<sup>۳/۵۵</sup> ۱۰ بدست می‌آید. که در بازه‌ی ایده‌آل گرانروی پخت قرار می‌گیرد. درکل بر اساس منحنی گرانروی اطلاعاتی به صورت جدول ۴ بدست می‌آید.

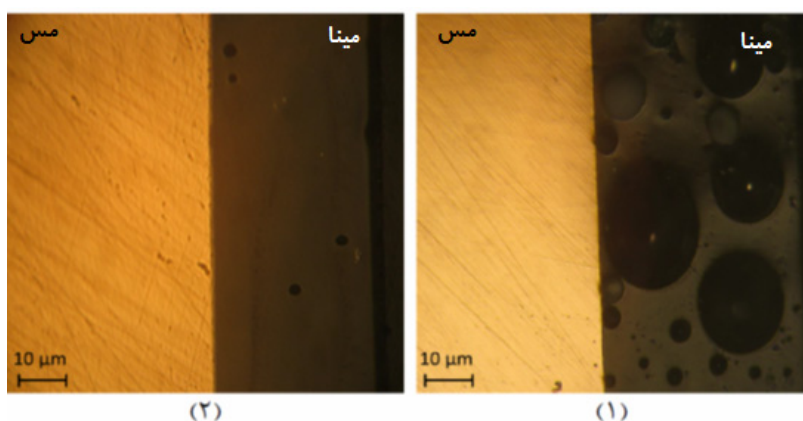
جدول ۴- اطلاعات استخراج شده از منحنی ویسکوزیته بر حسب دما

نقاط مشخصه	گرانروی (Pa.s)	دما (°C)
نقطه کارپذیری	۱۰ <sup>۳</sup>	۸۷۰
نقطه نرم‌شوندگی	۱۰ <sup>۶/۶۵</sup>	۵۹۷/۵
نقطه آنیل	۱۰ <sup>۱۲</sup>	۴۷۸/۶
نقطه کرنش	۱۰ <sup>۱۳/۵</sup>	۴۶۱/۲

نقطه کارپذیری دمایی است که توده شیشه‌ای برای شکل دادن بهترین شرایط را دارد. نقطه نرم‌شوندگی حداقل گرانروی که باید شیشه داشته باشد، پیش از آن که تحت تاثیر وزن خود تغییر شکل دهد. از نقطه کارپذیری تا نقطه نرم‌شوندگی را محدوده‌ی کارپذیری می‌گویند. نقطه آنیل و کرنش به ترتیب قسمت میانی و انتهایی محدوده‌ی انتقال به شیشه را مشخص می‌سازند که در عمل برای تنش‌زدایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷].

### ۳-۲- ریز ساختاری

شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی نمونه‌ی میناکاری شده را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود نمونه‌ی ۱ دارای حباب زیادی در بافت مینا است، در حالی که نمونه‌ی ۲ حباب خیلی کمتری نسبت به آن دارد. این دو نمونه با شرایط یکسان دمایی پخت شده‌اند ولی زمان پخت آن‌ها متفاوت است. نمونه‌ی ۱ در ۱۰ دقیقه پخت شده است و نمونه‌ی ۲ در ۲۰ دقیقه پخت شده است. زمان بیشتر باعث خروج بهتر حباب از مینا می‌گردد، به صورتی که اجازه می‌دهد حباب‌های کوچکتر به همدیگر بپیوندند (به دلیل گرانروی مناسب و زمان بیشتر برای حرکت حباب‌های ریز) و در نهایت از سطح مینا خارج گردند. بنابراین شرایط بهینه پخت از لحاظ زمانی به این صورت انتخاب می‌شود.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی نمونه‌های میناکاری شده،

(۱) زمان پخت ۱۰ دقیقه، (۲) زمان پخت ۲۰ دقیقه

### ۳-۳- هدایت الکتریکی

در جدول ۵ ابعاد نمونه آزمایشی و مشخصات ولت متر (Cen-Tech) و مقاومت مشاهده می شود.

جدول ۵- مشخصات مینا و مقاومت های ولت متر و مصرف کننده

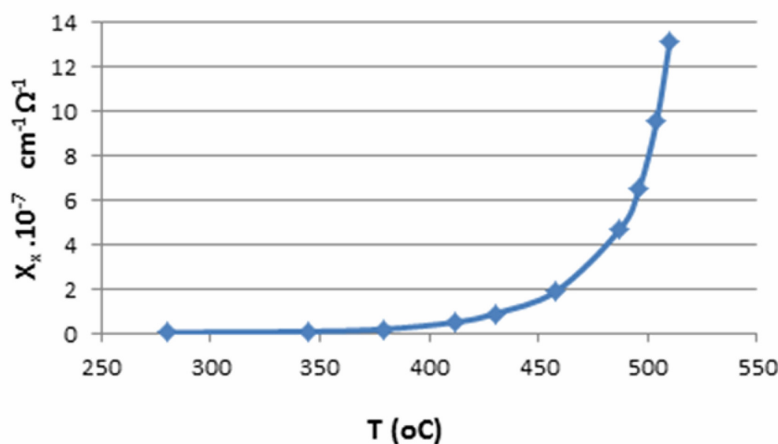
توان مقاومت ( $\Omega$ )	مقاومت داخلی ولت متر ( $\Omega$ )	Rp ( $\Omega$ )	U (v)	L (cm)	A ( $\text{cm}^2$ )
$10^7$	$10^6$	$10^7/11$	۷۰	۰/۶	۱/۲۵

به کمک رابطه ۶ و با استفاده از داده ها در جدول ۵ امکان محاسبه تغییرات ولتاژ بر حسب دما فراهم است (جدول ۶).

جدول ۶- تغییرات هدایت الکتریکی مینای آزمایشی بر حسب دما

T ( $^{\circ}\text{C}$ )	۲۸۰	۳۴۵	۳۷۹	۴۱۲	۴۳۰	۴۵۸	۴۸۷	۴۹۶	۵۰۴	۵۱۰
Up (v)	۰/۶	۱/۲	۲/۴۱	۵/۹۲	۹/۵	۱۶/۹۴	۳۰/۶	۳۶/۷	۴۳/۱	۴۷/۵
$X_x \Omega (\times 10^{-7} \cdot \text{cm}^{-1})$	۰/۰۴۷	۰/۰۹۶	۰/۱۹۹	۰/۵۱۴	۰/۹۰۳	۱/۹۰۵	۴/۶۷۲	۶/۵۳۵	۹/۵۷۷	۱۳/۱۸۰

شکل ۶ منحنی تغییرات هدایت الکتریکی مینا را نسبت به دما نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش دما، هدایت الکتریکی افزایش می یابد. افزایش هدایت الکتریکی در دمای تقریبی ۴۹۰ درجه سانتیگراد خیلی شدیدتر است که دلیلش می تواند رسیدن به دمای  $T_g (478/6^{\circ}\text{C})$  باشد. در جدول ۷ پارامترهای تاثیرگذار بر ثابت های A' و B' در رابطه ۷ آمده است.



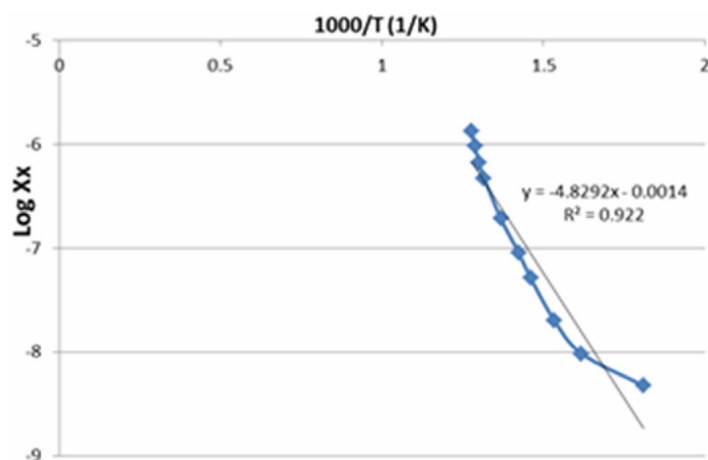
شکل ۶- منحنی تغییرات هدایت الکتریکی مینا نسبت به دما

جدول ۷- هدایت الکتریکی در دماهای مختلف مینای آزمایشی

T (K)	۵۵۳	۶۱۸	۶۵۲	۶۸۵	۷۰۳	۷۳۱	۷۶۰	۷۶۹	۷۷۷	۷۸۳
1000/T ( $\text{K}^{-1}$ )	۱/۸۰۸	۱/۶۱۸	۱/۵۳۴	۱/۴۶۰	۱/۴۲۲	۱/۳۶۸	۱/۳۱۶	۱/۳۰۰	۱/۲۸۷	۱/۲۷۷
log $X_x$	-۸/۳۲۴	-۸/۰۱۸	-۷/۷۰۱	-۷/۲۸۹	-۷/۰۴۴	-۶/۷۲۰	-۶/۳۳۰	-۶/۱۸۵	-۶/۰۱۹	-۵/۸۸۰

شکل ۷ منحنی تغییرات لگاریتمی هدایت الکتریکی مینا نسبت به عکس دما را نشان می دهد. دلیل انحراف منحنی از حالت

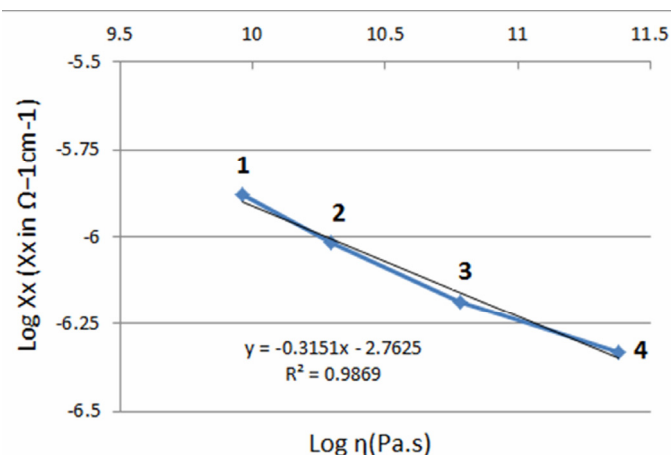
خطی بیشتر به دستگاه مورد استفاده ارتباط دارد. در اندازه گیری‌های دقیق الکترودهای متصل به آزمون از فلز پلاتین که در برابر اکسیداسیون مقاوم است، انتخاب می‌شود ولی در این تست الکترودهای مسی عامل انتقال جریان الکتریکی بودند.



شکل ۷- منحنی تغییرات لگاریتمی هدایت الکتریکی مینا نسبت به دما

این انتخاب می‌تواند منشاء بروز خطا در اندازه‌گیری به ویژه غیر خطی شدن نمودار باشد. هدایت الکتریکی مینای آزمایشی در دمای ۳۳۵ درجه سانتیگراد برابر  $10^{-8} \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1}$  شد. بر اساس طبقه بندی مواد از این نظر، مینای مورد استفاده کاملاً در محدوده‌ی عایق الکتریکی قرار می‌گیرد [۱۰].

جایگزینی اکسیدهای قلیایی توسط اکسید سیلیسیم در شیشه‌های بوروسیلیکاتی باعث افزایش ضریب مقاومت الکتریکی آن‌ها در دمای محیط شده و در نتیجه کاهش هدایت الکتریکی آن‌ها را به همراه دارد. وجود تعداد اکسیدهای بیشتر باعث کاهش تحرک یون‌ها در مینای آزمایشی شده در نتیجه هدایت الکتریکی را کاهش می‌دهد. بخش دگرگون‌ساز اکسید PbO با هر دو واحدهای بوراتی و سیلیکاتی ارتباط دارد. یون‌های  $\text{Pb}^{2+}$  زمانی که نقش دگرگون‌ساز داشته باشند یکی از عوامل انتقال جریان خواهند بود، به عبارتی باعث افزایش هدایت الکتریکی خواهند شد. البته تا ۲۵٪ وزنی از PbO هدایت الکتریکی کاهش پیدا می‌دهد و بیشتر از این درصد هدایت الکتریکی را افزایش خواهد داد [۱۸-۱۹].



شکل ۸- مقاومت الکتریکی و گرانروی مینای آزمایشی در دماهای ۱. (۴۸۷°C)، ۲. (۴۹۶°C)، ۳. (۵۰۴°C)، ۴. (۵۱۰°C)



شکل ۸ رابطه بین گرانی و مقاومت الکتریکی بعد از دمای  $T_g$  را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ارتباط گرانی و لگاریتم گرانی و مقاومت الکتریکی (لگاریتم مقاومت الکتریکی) با تقریب زیادی خطی است.

#### ۴ - نتیجه‌گیری

با توجه به منحنی تغییرات گرانی در دمای پخت بهینه (۸۵۰ درجه سانتیگراد) ویسکوزیته مینا در این دما  $10^{-3/145}$  بدست آمد. بررسی گرانی مینا نشان داد که گرانی آن در محدوده‌ی گرانی ایده‌آل ( $10^3 - 10^4$  Pa.s) مذاب‌ها در پیک دمایی پخت می‌باشد.

بررسی تغییرات هدایت الکتریکی مینا با دما نشان داد که هدایت الکتریکی مینا در دمای ۳۳۵ سانتیگراد برابر  $10^{-8-1} \text{ cm}^{-1} \Omega$  است. از این رو نتیجه می‌توان گرفت مینای آزمایش شده عایق است. همچنین مشخص شد که ارتباط لگاریتمی گرانی نسبت به مقاومت الکتریکی با تقریب بالایی خطی است.

#### مراجع

- [۱] ر. اپلر، د. اپلر، لعاب‌ها و پوشش‌های شیشه‌ای، ترجمه ع. میرحبیبی، س. باغشاهی، م. قهاری، ر آقابازاده، جهاد دانشگاهی امیرکبیر، چاپ اول، ۱۳۸۲.
- [2] M. Ahmed, and D. A. Earl, "Characterizing glaze-melting behavior via HSM". American Ceramic Society Bulletin, Vol 81, 2002, pp. 47-51.
- [3] B. Burzacchini, "Use of the hot stage microscope to evaluate the characteristics and behaviour of frits and glazes at different heating rates".in Qualicer 96. IV World Congress on Ceramic Tile Quality, General Conferences and Communications. Pt. 2, Castellon, 1996.
- [4] S. Link, and M. Engels, "Glaze characterisation using the hot stage microscope: A practical approach". Interceram, Vol 55, 2006, p. 334.
- [5] C. Baldwin, and S. Feldman. "Surface Tension and Fusion Properties of Porcelain Enamels". in Proceedings of the Porcelain Enamel Institute Technical Forum. Vol 69, 2007, pp. 1-10.
- [6] M. W. Barsoum, Fundamentals of ceramics, CRC Press, 2002, pp.190-209.
- [7] A. Fluegel, D. A. Earl, and A. K. Varshneya, "Electrical Resistivity of Silicate Glass Melts Calculation Based on the SciGlass Database". New York State College of Ceramics; Alfred University; Alfred NY 14802; USA, 2007, pp. 1-36.
- [8] E. Rasch, and F. Willy Hinrichsen, "Über eine Beziehung zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur". Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, vol 14,

- 1908, pp. 41-46.
- [9] D. Ehrhart, and R. Keding, "Electrical conductivity and viscosity of borosilicate glasses and melts". *Physics and Chemistry of Glasses-European Journal of Glass Science and Technology Part B*, Vol 50, 2009, pp. 165-171.
- [10] R. H. Doremus, *Glass science*, Wiley, 1973, pp. 260-273.
- [11] G. El-Damrawi, and E. Mansour, "Electrical properties of lead borosilicate glasses". *Physica B: Condensed Matter*, Vol 364, 2005, pp. 190-198.
- [12] R. M. Klein, and D. A. Ploof, "Technique to measure ionic conductivity of glass". *American Ceramic Society Bulletin*, Vol 57, 1978, pp. 582-586.
- [13] J. Forrest, "The Electrical Properties of Semi-Conducting Ceramic Glazes". *Journal of Scientific Instruments*, Vol 24, 1947, pp. 211-217.
- [14] E. Yatsenko, A. Zubekhin, and A. Nepomnyashchev, "Protection of copper against high-temperature corrosion". *Glass and Ceramics*, Vol 56, 1999, pp. 295-297.
- [15] E. A. Yatsenko, A. A. Nepomnyashchev, and A. P. Zubekhin, "New Glass-Enamel Lead-Free Coating for Copper, Modified with  $Fe_3O_4$ ,  $MnO_2$ , and  $Co_2O_3$ ", *Russian Journal of Applied Chemistry*, 73(3), July 1999, pp. 468-470.
- [16] E. Rasch, F. W. Hinrichsen, "Über eine Beziehung zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur", *Z. Elektrochem*, 14, 1908, pp. 41-46.
- [17] و. مارقوسیان، شیشه، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۸۱.
- [18] H. Bach, Baucke, K. G. Friedrich, D. Krause, *Electrochemistry of Glasses and Glass Melts, Including Glass Electrodes*, Schott glas hattenbergstr .10, 2001, pp. 269-283.
- [19] H. Scholze, *Glas Natur Struktur und Eigenschaften*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg NewYork, 1977, pp. 238-250.