

## بررسی تولید و خواص شیشه‌های اوپال غیر فلوئوریدی

مجتبی معین افشاری

قزوین، شرکت شیشه لیا

پیام‌نگار: moinafshar@liyaglass.com

### چکیده

شیشه‌های اوپال را از لحاظ ترکیب شیمیایی می‌توان به دو گروه عمده فلوئوریدی و غیر فلوئوریدی تقسیم بندی کرد. آنچه به عنوان اوپال معمولی در ایران تولید می‌شود، نوع فلوئوریدی آن است. در مقاله حاضر که حاصل انجام پروژه‌ای مشترک بین دانشگاه علم و صنعت و شرکت شیشه و گاز است، تولید چهار گروه از شیشه‌های اوپال غیر فلوئوریدی در مرحله آزمایشگاهی و خواص این نوع شیشه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این رابطه ۱۰ نمونه شیشه‌های اوپال (کلسیم-فسفاتی) با ترکیبات مختلف، ۵ نمونه شیشه‌های اوپال (کلسیم-روی-فسفاتی)، ۱۲ نمونه شیشه‌های خود اوپال (کلسیم-منیزیمی) و ۱۴ نمونه شیشه‌های خود اوپال کلسیمی در مرحله آزمایشگاهی تهیه گردید.

در تمامی آزمایش‌ها، بیج حاصل از اختلاط کامل مواد اولیه در درون بوتله نسوز آلومین بالا به مدت دو ساعت در دمای  $1450^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شدند. مذاب‌های تولید شده به درون قالب فولادی پیش گرم شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به ابعاد  $2 \times 2 \times 15$  سانتیمتر تخلیه شد و سپس شیشه‌های حاصل در دمای  $T_g + 5^{\circ}\text{C}$  به مدت نیم ساعت آنیل شدند. مسائل ذوب و تاثیر ترکیبات مختلف بویژه قلیایی‌ها و قلیایی‌های حاکی در میزان اوپاسیته شیشه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. خواص فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های بدست آمده از جمله الگوی دیلاتومتری، اوپاسیته، استحکام خمشی، مقاومت در برابر قلیایی‌ها و مقاومت در برابر اسیدها با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شده و بر اساس نتایج حاصل از آزمایشها ترکیب مناسب برای تولید هر یک از انواع شیشه‌های اوپال غیر فلوئوریدی توصیه شده است.

**کلمات کلیدی:** اوپال‌های غیر فلوئوریدی، اوپال‌های فسفاتی، اوپال‌های خودبخودی (کلسیم - منیزیمی)، اوپاسیته،

### الگوی دیلاتومتری

#### ۱- مقدمه

(مایع-مایع) یا (مایع-بلور) (کریستال) باشد، که نوع اخیر برای انواع اوپال تجارتي بیشتر عمومیت دارد. شیشه‌های اوپال را از لحاظ عامل مات‌کننده می‌توان به سه گروه تقسیم کرد:

- اوپال‌های فلوئوریدی
- اوپال‌های فسفاتی
- اوپال‌های جدایش فازی و فاقد عامل مات‌کننده

شیشه‌های اوپال دارای کاربردهای تجاری گسترده ای می‌باشند. از مهم ترین کاربردهای آنها می‌توان به ظروف آشپزخانه، ظروف سر میز، شیشه‌های آرایشی و بهداشتی و روشنایی شامل اجزاء و قطعات لوستر و حباب لامپ اشاره کرد.

شیشه‌های اوپال اساساً شیشه‌های جدایش فازی یافته‌اند و میزان مات بودن (وپاسیته) آنها ناشی از انکسار و تفریق داخلی نور، بین فازهای جدا شده است. این جدایش فازی ممکن است از نوع

- اوپال‌های (کلسیم - فسفات)، اوپال‌های (کلسیم - روی - فسفاتی)،
  - اوپال‌های خودبخودی (کلسیم - منیزیمی) (بدون اوپاسیفاير).
  - اوپال‌های خودبخودی کلسیمی (بدون اوپاسیفاير).
- بر اساس نمونه‌های آزمایشگاهی تولید شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۲- شیشه‌های اوپال کلسیم - فسفاتی (نتایج آزمایشگاهی)

در فرمولبندی اوپال‌های (کلسیم - فسفاتی) از مواد اولیه سیلیس، فلدسپات، دولومیت، کربنات کلسیم، کربنات سدیم، دی کلسیم فسفات، اسید بوریک، سیلیکات زیرکونیم، سولفات سدیم، اکسید روی و اکسید آرسنیک استفاده شد که آنالیز شیمیایی این مواد در جدول (۱) آمده است.

با استفاده از مواد اولیه فوق ده ترکیب مختلف شیشه فرمولبندی شد که ترکیب شیشه‌های حاصل در جدول (۲) درج شده است.

شیشه‌های اوپال همچنین ممکن است به اوپال‌های خود بخودی یا اوپال‌های گرمایش مجدد تقسیم بندی شوند. اوپال‌های خودبخودی در حین سرمایش از حالت مذاب در زمانی کوتاه بدست می‌آیند و تجربه‌ای دال بر اینکه اوپاسیته با عملیات حرارت بعدی افزایش یابد، وجود ندارد. اوپال‌های گرمایش مجدد ممکن است در حین سرمایش از حالت مذاب شفاف یا نیمه شفاف باشند که نهایتاً بعد از عملیات حرارتی اوپاسیته بیشتری حاصل خواهد شد.

اکثر اوپال‌های تجاری از نوع خودبخودی و کریستالی هستند. در این نوع شیشه‌های اوپال فلوئوریدی از فلوئورید کلسیم یا فلوئورید سدیم و بندرت از فلوئورید آلومینیم (به صورت ترکیب) برای دستیابی به اوپاسیته استفاده می‌شود.

اوپال‌های غیر فلوئوریدی، طیف وسیعی از اوپال‌های فسفاتی و اوپال‌های (کلسیم - منیزیمی) خودبخودی را شامل می‌شوند. در مقاله حاضر مسائل تولید و خواص چهار دسته از اوپال‌های غیر فلوئوریدی شامل:

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد اولیه (درصد وزنی)

L.O.I	ZnO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	درصد وزنی اکسیدها نام مواد اولیه
۰/۱	-	-	-	-	-	۰/۰۲	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۵۱	۹۹/۱۹	سیلیس همدان
۲/۶۴	-	-	-	-	-	۳/۳۳	۵/۱۷	۰/۳۳	۰/۹	۰/۰۵	۰/۲۳	۱۳/۶۶	۷۳/۶۹	فلدسپات چغایی
۴۵/۷۳	-	-	-	-	-			۲۱/۳۶	۳۱/۹۲	-	۰/۰۷۵	۰/۳	-	دولومیت
۴۳/۴۴	-	-	-	-	-	۰/۰۱	۰/۰۱	۱/۲	۵۴/۷۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۱۸	۰/۷۲	کربنات کلسیم
۴۱	-	-	-	-	-	۵۸		-	-	-	-	-	-	کربنات سدیم
۸/۵	-	-	-	۵۰	-	-		-	۴۰	-	-	-	-	دی کلسیم فسفات
-	-	-	۶۵/۵	-	-	-		-	-	۰/۲۵	۰/۰۴	-	۳۳	سیلیکات زیرکونیم
														سولفات سدیم
۴۳					۵۶						-	-	-	اسید بوریک
	۹۹/۵													اکسید روی
۱۴		۸۵												اکسید آرسنیک

جدول ۲- ترکیب شیمیایی شیشه‌های اپیال کلسیم - فسفاتی (درصد وزنی)

ZnO	ZrO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	درصد وزنی اکسید شماره ترکیب
		۱/۵	۷/۵	۴/۵	۶	۱۹/۵	۴/۵	۵۶/۵	۱
		۱/۵	۷/۵	۵/۵	۶	۱۸/۵	۴/۵	۵۶/۵	۲
		۱/۵	۷/۵	۶/۵	۶	۱۷/۵	۴/۵	۵۶/۵	۳
		۱/۵	۷/۵	۷/۵	۶	۱۶/۵	۴/۵	۵۶/۵	۴
		۱/۵	۷/۵	۸/۵	۶	۱۵/۵	۴/۵	۵۶/۵	۵
	۱/۵		۷/۵	۵	۶	۱۹	۴/۵	۵۶/۵	۶
	۱/۵		۷/۵	۶	۶	۱۸	۴/۵	۵۶/۵	۷
	۱/۵		۷/۵	۷	۶	۱۷	۴/۵	۵۶/۵	۸
۱	۱/۵		۷/۵	۵	۶	۱۸	۴/۵	۵۶/۵	۹
۲	۱/۵		۷/۵	۵	۶	۱۷	۴/۵	۵۶/۵	۱۰

### ۱-۲ ذوب و شکل دادن

تمامی مواد اولیه معدنی از الک مش ۶۰ (۲۵۰ میکرون) عبور داده شدند. برای هر ترکیب مواد اولیه جداگانه توزین و در هاون دستی و کیسه پلاستیکی کاملاً مخلوط شدند. ترکیب‌های حاصل در درون بوته نسوز آلومین بالا (۷۰ درصد آلومینای ریزدانه و ۳۰ درصد کائولن) ریخته شده و به مدت دو ساعت در دمای ۱۴۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. مذاب‌های حاصل به درون قالب فولادی پیش گرم شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و به ابعاد (۲ × ۲ × ۱۵) سانتیمتر تخلیه شدند. شیشه‌های حاصل در دمای ۵ °C + Tg به مدت نیم ساعت تنش‌گیری شدند.

### ۲-۲ نتایج آزمایشات

#### ۱-۲-۲ ذوب و اوپاسیتی

تمامی ترکیبات در دمای ۱۴۵۰ درجه سلسیوس ذوب شدند و هیچگونه سنگی در آنها مشاهده نشد، اما گرانیروی ترکیبات شماره ۱ و ۲ بالا بود. گرانیروی بقیه ترکیبات مناسب بود. با مشاهدات چشمی و بررسی تیغه‌های نازک شیشه‌ها، اوپاسیته ترکیبات شماره ۱ و ۲ و ۳ کاملاً عمیق بود و اوپاسیته ترکیبات شماره ۴، ۵، ۷ و ۸ که درصد اکسید سدیم در آنها افزایش یافته بود، کاهش یافت. اوپاسیته ترکیبات شماره ۶ و ۹ و ۱۰ علیرغم افزایش

اکسید روی، کاملاً عمیق نبود.

با بررسی‌های فوق ترکیب شماره ۳ از لحاظ ذوب، گرانیروی و اوپاسیته کاملاً مطلوب تشخیص داده شد.

#### ۲-۲-۲ حباب زدایی

برای بررسی نحوه تاثیر ترکیبات حباب زدا، به ترکیب شماره ۳ یک درصد وزنی سولفات سدیم اضافه شد. مشاهدات نشان داد که سولفات سدیم تاثیر منفی بر اوپاسیته دارد. از یک دهم درصد اکسید آرسنیک برای حباب زدایی استفاده شد که تاثیر منفی بر اوپاسیته مشاهده نشد.

#### ۳-۲-۲ بررسی الگوی دیلاتومتری

الگوی دیلاتومتری شیشه ترکیب شماره ۳ در شکل (۱) آمده است. با بررسی شکل مزبور دماهای Tg و Ts (نقطه نرم شدن دیلاتومتری) و نقطه کرنش<sup>۱</sup> به ترتیب ۶۵۰، ۷۱۵، ۶۱۵ درجه سلسیوس است که در نتیجه دمای آنیل آن را می‌توان معادل ۵ °C + Tg در نظر گرفت.

#### ۴-۲-۲ مقاومت شیمیایی

برای تعیین مقاومت شیمیایی شیشه مزبور، نمونه‌های شیشه ای به ابعاد (۱ × ۲ × ۵) سانتیمتر به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۹۵ درجه

1. Strain point

زیرکونیم بجای اکسید بور اصولاً خاصیت اوپاسیته را کاهش می‌دهد و توصیه نمی‌شود.

۳. حباب زدایی - اصولاً در مقیاس آزمایشگاهی به دلیل کم بودن حجم نمونه‌ها مشکل حباب زدایی وجود ندارد. اما در مقیاس پایلوت و تولید صنعتی در صورت نیاز به استفاده از مواد حباب زدا اکسید آرسنیک ( $As_2O_3$ ) پیشنهاد می‌شود، زیرا مطابق آزمایش‌های انجام شده افزودن سولفات سدیم اثر منفی بر پدیده جدایش فازی و اوپاسیته دارد.

۴. استحکام مکانیکی این شیشه‌ها (نمونه شماره ۳) در حد شیشه‌های تجاری بوده و قابل قبول است.

۵. مقاومت شیمیایی ترکیب شماره ۳ در حد قابل قبول شیشه‌های تجاری است.

### ۳- اوپال‌های (کلسیم - روی - فسفاتی)

در فرمولاسیون اوپال‌های (کلسیم - روی - فسفاتی)، از مواد اولیه سیلیس، فلدسپات، دولومیت، کربنات کلسیم، دی کلسیم فسفات، اسید بوریک، اکسید روی و سولفات سدیم که آنالیز شیمیایی آنها در جدول (۱) آمده است استفاده گردید.

با استفاده از مواد اولیه فوق پنج ترکیب فرمولبندی شده که در جدول (۳) آمده است.

سلیسیوس در محلول‌های اسید کلریدریک ۵ درصد و سود سوزآور ۵ درصد قرار داده شد که کاهش وزن به ترتیب  $10^{-5} \times 1/75$  و  $10^{-3} \times 5/4$  میلی گرم بر میلی متر مربع ( $mg/mm^2$ ) را نشان می‌دهد.

### ۲-۲-۵ استحکام خمشی

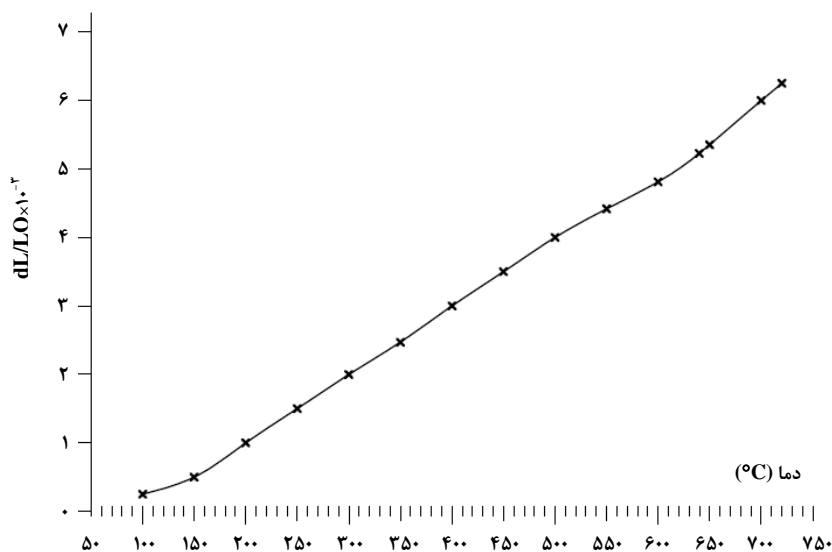
استحکام خمشی شیشه ترکیب شماره ۳ برابر با  $11 \pm 57$  مگانیوتن بر متر مربع اندازه گیری شد.

### ۲-۲-۶ نتیجه‌گیری

از آزمایشات انجام شده بر روی ترکیبات ده گانه شیشه‌های اوپال (کلسیم - فسفاتی) نتایج زیر حاصل می‌گردد:

۱. اثر افزایش اکسید سدیم در برابر کاهش اکسید کلسیم (به منظور کم کردن نقطه ذوب و کاهش خاصیت زود قوام بودن<sup>۱</sup> شیشه) می‌تواند تا حدود ۶/۵ درصد اکسید سدیم انجام شود. افزایش بیشتر اکسید سدیم باعث کاهش محسوس خاصیت اوپاسیته می‌شود.

۲. افزایش ۱/۵ درصد اکسید بور در این نوع شیشه‌ها اثر مطلوبی بر پدیده جدایش فازی خواهد داشت. اثر اکسید آلومینیم هم به همین دلیل مثبت است، (تا ۴/۵ درصد). جایگزینی اکسید



شکل ۱- الگوی دیلاتومتری ترکیب شماره ۳

جدول ۳- ترکیب شیمیایی شیشه‌های اوپال (کلسیم- روی- فسفاتی) (درصد وزنی)

ZnO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	Mgo	Cao	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	درصد وزنی
								اکسید شماره ترکیب
۱	۱/۵	۷/۵	۶/۵	۶	۱۶/۵	۴/۵	۵۶/۵	۱
۲	۱/۵	۷/۵	۶/۵	۶	۱۵/۵	۴/۵	۵۶/۵	۲
۳/۱	۱/۵	۷/۵	۶/۵	۵/۵۵	۱۴/۸۳	۴/۵	۵۶/۵	۳
۴/۲۴	۱/۵	۷/۵	۶/۵	۵/۱	۱۴/۱۶	۴/۵	۵۶/۵	۴
۵/۳۶	۱/۵	۷/۵	۶/۵	۴/۶۵	۱۳/۴۹	۴/۵	۵۶/۵	۵

### ۱-۳ نتایج آزمایشها

شرایط ذوب نمونه‌ها مشابه مورد قبلی بود. با مشاهدات چشمی اوپاسیته ۵ ترکیب عمیق و خوب بود، اما درخشندگی ترکیب شماره ۲ از بقیه نمونه‌ها بهتر بود. همچنین مشاهده شد که رنگ ترکیب‌های ۴ و ۵ متمایل به بژ است، در حالیکه بقیه نمونه‌ها سفید رنگ بودند.

ترتیب ۶۵۰، ۷۲۰ و ۶۱۵ درجه سلسیوس است که در نتیجه دمای آنیل این شیشه ۶۵۵ درجه سلسیوس خواهد بود.

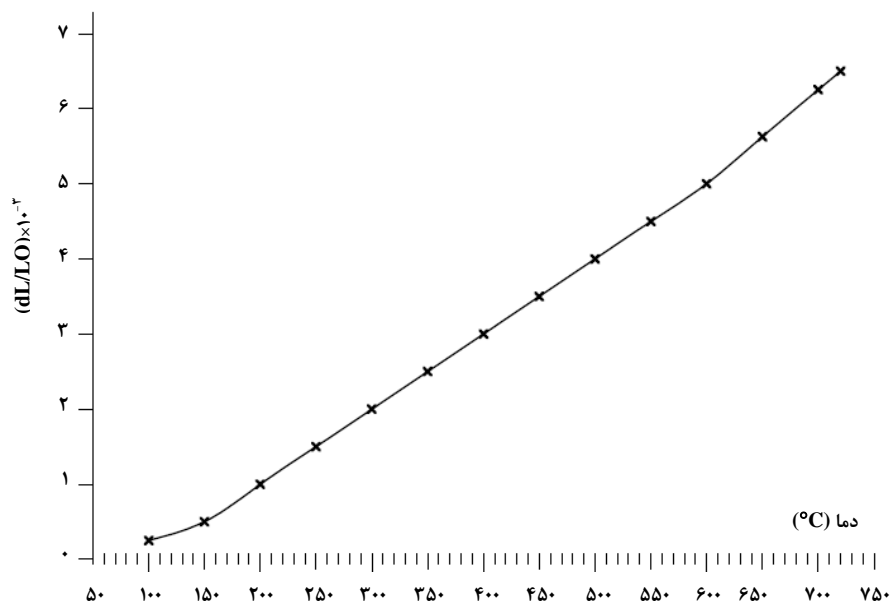
### ۳-۳ مقاومت شیمیایی

مقدار کاهش وزن بر واحد سطح شیشه ترکیب شماره ۲ در مقابل اسید کلرهدریک و سود به ترتیب برابر  $11 \times 10^{-3}$  و  $6/9 \times 10^{-3}$  میلی گرم بر میلیمتر مربع است.

### ۲-۳ الگوی دیلاتومتری

الگوی دیلاتومتری ترکیب شماره ۲ در شکل (۲) آمده است. با بررسی شکل مزبور دمای Ts، Tg و نقطه کرنش این ترکیب به

۴-۳ استحکام خمشی  
استحکام خمشی شیشه شماره ۲ برابر با  $13 \pm 48$  مگانیوتن بر متر مربع است.



شکل ۲- الگوی دیلاتومتری ترکیب شماره ۲

## ۳-۵ نتیجه‌گیری

از آزمایشات انجام شده بر روی ترکیبات پنجگانه اوپال‌های (کلسیم- روی - فسفات)، نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱. افزایش اکسید روی به جای کلسیم تا ۲ الی ۳ درصد وزنی می‌تواند تأثیر مطلوبی بر سفیدی رنگ و درخشندگی نمونه‌ها داشته باشد، اما افزایش بیشتر آن باعث گرم شدن شیشه می‌شود.
۲. در این نمونه‌ها هم مانند شیشه‌های (کلسیم- فسفات)، افزودن سولفات سدیم اثر منفی بر اوپاسیته داشته و اضافه کردن اکسید آرسنیک توصیه می‌شود.
۳. هرچند استحکام مکانیکی این شیشه‌ها (نمونه شماره ۲) کاهش اندکی را نسبت به شیشه‌های (کلسیم - فسفات) نشان می‌دهد، با این وجود مقادیر  $48 \pm 13$  مگا نیوتن بر متر مربع برای شیشه‌های تجاری رقمی قابل قبول است.
۴. مقاومت شیمیایی شیشه‌های اوپال (کلسیم- روی- فسفات) در

مقایسه با اوپال‌های (کلسیم - فسفات) در برابر اسیدها بسیار کمتر بوده و در برابر سود کمی کمتر از اوپال‌های (کلسیم- فسفات) است.

۵. ضریب انبساط حرارتی ( $1/^\circ\text{C}$ )  $10^{-7} \times 84$  به عنوان یک شیشه تجاری قابل قبول و نسبت به شیشه‌های (سودا - لایم) کمتر است که نشانه شوک‌پذیری بهتر این نوع شیشه‌ها در برابر تغییرات ناگهانی دماست.

۶. از جمیع نتایج فوق می‌توان شیشه شماره ۲ را به عنوان یک شیشه قابل قبول در دسته اوپال‌های (کلسیم- روی- فسفات) توصیه نمود.

## ۴- شیشه‌های خود اوپال (کلسیم- منیزیمی)

در فرمولاسیون ۱۲ نمونه شیشه‌های خود اوپال (کلسیم- منیزیمی) که در جدول (۴) آورده شده، علاوه بر مواد اولیه قبلی از اکسید منیزیم و کربنات باریم نیز استفاده شد.

جدول ۴- ترکیبات شیمیایی شیشه‌های اوپال (کلسیم- منیزیمی) (درصد وزنی)

ZnO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	درصد وزنی اکسید شماره ترکیب
-	-	-	۱/۱	۱۴/۵	۲۰/۱	۱/۸	۶۲/۵	۱
۱	-	-	۱/۱	۱۳/۵	۲۰/۱	۱/۸	۶۲/۵	۲
۱/۶	-	-	۱/۱	۱۲/۹	۲۰/۱	۱/۸	۶۲/۵	۳
۲/۶	-	-	۱/۱	۱۲/۵	۱۹/۵	۱/۸	۶۲/۵	۴
۳/۶	-	-	۱/۱	۱۲/۱	۱۸/۹	۱/۸	۶۲/۵	۵
-	-	۱	۱/۱	۱۴/۵	۱۹/۱	۱/۸	۶۲/۵	۶
-	-	۲	۱/۱	۱۴/۵	۱۸/۱	۱/۸	۶۲/۵	۷
-	-	۳	۱/۱	۱۴/۵	۱۷/۱	۱/۸	۶۲/۵	۸
-	۱	-	۱/۱	۱۴/۵	۲۰/۱	۱/۸	۶۱/۵	۹
-	۲	-	۱/۱	۱۴	۲۰/۱	۱/۸	۶۰/۵	۱۰
-	۳	-	۱/۱	۱۴	۲۰/۱	۱/۸	۵۹/۵	۱۱
-	-	-	۰/۶	۱۵/۱۵	۲۲/۱۴	۱/۲۳	۶۰/۸۷	۱۲

#### ۴-۱ نتیجه‌گیری

ترکیبات انتخابی برای تهیه اوپال‌های (کلسیم- منیزیمی) از نظر رسیدن به شیشه اوپال مطلوب مناسب نبوده و هیچکدام توصیه نمی‌شوند.

#### ۵- شیشه‌های خود اوپال کلسیمی

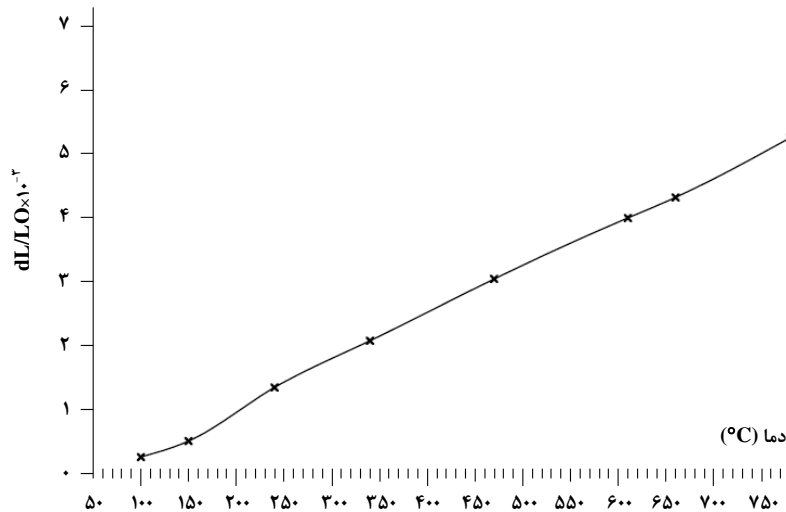
با استفاده از مواد اولیه شرح داده شده ۱۴ ترکیب مختلف فرمولبندی شد که در جدول (۵) آمده است. پس از ذوب هر نمونه، از ترکیب مطلوب (شماره ۱۴) الگوی دیلاتومتری تهیه شد که در شکل (۳) ارائه گردیده است.

مواد اولیه پس از اختلاط کامل در بوت‌های آلومین بالا در شرایط مشابه نمونه‌های قبلی ذوب شدند. ترکیب‌های ۱ تا ۵ و ۱۲ در دمای  $1450^{\circ}\text{C}$  کاملاً ذوب شدند و گرانیروی نمونه‌ها در حین تخلیه از بوت مناسب بود. ترکیب‌های ۶ تا ۱۱ در دمای مزبور ذوب کاملی نداشتند و گرانیروی آنها در حین تخلیه از بوت بالا و توام با مواد ذوب نشده بود.

با مشاهدات چشمی و بررسی شیشه‌های کاملاً ذوب شده همگی شفاف و غیر مات بودند. با حذف سولفات سدیم به عنوان حباب زدا، مقداری اوپاسیته در ترکیبات شماره ۱ و ۱۲ ایجاد شد. به علت عدم دستیابی به اوپاسیته مناسب خواص فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها اندازه‌گیری نشد.

جدول ۵- ترکیبات شیمیایی شیشه‌های اوپال کلسیم (درصد وزنی)

ZnO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	درصد وزنی اکسید شماره ترکیب
-	-	-	۲/۵	۳	۲۶/۴	۱/۱	۶۷	۱
-	۱	-	۲/۵	۳	۲۵/۴	۱/۱	۶۷	۲
-	۲	-	۲/۵	۳	۲۴/۴	۱/۱	۶۷	۳
-	۳	-	۲/۵	۳	۲۳/۴	۱/۱	۶۷	۴
-	۴	-	۲/۵	۳	۲۲/۴	۱/۱	۶۷	۵
-	۱	-	۲/۵	۳	۲۶/۴	۱/۱	۶۷	۶
-	۲	-	۲/۵	۳	۲۶/۴	۱/۱	۶۷	۷
-	۳	-	۲/۵	۳	۲۶/۴	۱/۱	۶۷	۸
۱	-	-	۲/۵	۲/۶	۲۵/۸	۱/۱	۶۷	۹
۲	-	-	۲/۵	۱/۲	۲۵/۲	۱/۱	۶۷	۱۰
۳	-	-	۲/۵	۱/۸	۲۴/۶	۱/۱	۶۷	۱۱
۴	-	-	۲/۵	۱/۴	۲۴	۱/۱	۶۷	۱۲
-	-	-	۱/۵	۳	۲۷/۴	۱/۱	۶۷	۱۳
-	-	-	۱/۸۵	۳/۶۳	۲۹/۶۳	۰/۴۴	۶۴/۴۴	۱۴



شکل ۳- الگوی دیلاتومتری ترکیب شماره ۱۴

۲. حباب زدایی - در اینجا نیز افزودن  $Na_2SO_4$  اثر منفی داشته و افزایش  $As_2O_5$  توصیه می‌شود.
۳. استحکام مکانیکی عدد  $8 \pm 59 \text{ MNm}^{-2}$  در حد شیشه‌های تجاری و قابل قبول است.
۴. مقاومت شیمیایی ترکیب شماره ۱۴ نیز در حد معقول می‌باشد
۵. از جمیع نتایج فوق، شیشه شماره ۱۴ را می‌توان بعنوان نمونه موفق در گروه خود اوپال‌های کلسیمی توصیه کرد.

#### ۶- نتیجه‌گیری کلی

- تولید شیشه‌های اوپال غیر فلوئوریدی دارای مزیت‌های زیادی نسبت به شیشه‌های اوپال فلوئوریدی است.
۱.  $P_2O_5$  یا سایر اکسیدها نظیر  $CaO$ ،  $MgO$ ،  $ZnO$ ،  $BaO$  که در تولید این نوع شیشه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد بر خلاف ترکیبات فلوئورین از سطح مذاب تبخیر نمی‌شود. این مسئله علاوه بر ملاحظات اقتصادی از بین رفتن ترکیبات گران قیمت فلوئورین، باعث کاهش خوردگی نسوزهای کوره و افزایش عمر مفید آن می‌شود.
  ۲. تبخیر فلوئورین از سطح مذاب شیشه‌های اوپال فلوئوریدی باعث عدم ثبات و نوسان در ترکیب شیشه‌های تولیدی می‌شود. که لازم است در فرایند ذوب شیشه مورد فوق همواره مد نظر مسئولین ذوب قرار گیرد.

خواص شیشه اوپال نمونه ۱۴ به شرح زیر اندازه‌گیری شد:

#### ۵-۱ استحکام مکانیکی

استحکام خمشی شیشه ترکیب شماره ۱۴ برابر با  $8 \pm 59 \text{ MNm}^{-2}$  می‌باشد.

#### ۵-۲ مقاومت شیمیایی

مقدار کاهش وزن بر واحد سطح شیشه ترکیب شماره ۱۴ در مقابل اسید کلریدریک و سود به ترتیب برابر با  $10 \times 10^{-5} (\text{mg/mm}^2)$  و  $3 \times 10^{-3} (\text{mg/mm}^2)$  می‌باشد.

#### ۵-۳ نتیجه‌گیری

از نتیجه آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های چهارده گانه خود اوپال‌های کلسیمی نتایج زیر را می‌توان گرفت.

۱. افزایش  $BaO$  بجای  $SiO_2$  و  $CaO$  تا (۴-۳)٪ وزنی اثری بر اوپاسیته ندارد (در صورت ثابت بودن  $Na_2O$ ). جایگزینی  $ZnO$  بجای  $CaO$  و  $MgO$  تا ۴٪ نیز بر اوپاسیته موثر نیست (در صورت ثابت بودن  $Na_2O$ ) در صورت کاهش  $Na_2O$  و افزایش  $CaO$  (۱٪) اوپاسیته بهبود می‌یابد. اما در بهترین حالت افزایش  $CaO$  تا حدود ۳٪ (نسبت به ترکیب مبنای ۱) در برابر کاهش  $SiO_2$  و کاهش  $Al_2O_3$  بیشترین تاثیر را بر اوپاسیته خواهد داشت.



### مراجع

- [1] James E. Flannery and Dale R. Wexell; "Commercial Glasses' American Ceramic Society; (1984).  
[2] Milos B. Volf; "Technical Approach to Glass;" Elsevier; (1990).

۳. ترکیباتی که در تولید شیشه‌های اپال غیر فلوئوریدی استفاده

می‌شود، برخلاف فلوئورین سمی نبوده و تأثیرات سوء بر محیط زیست بر جای نمی‌گذارند.

۴. از لحاظ اقتصادی نیز مواد اولیه مورد استفاده در تولید

شیشه‌های اپال غیر فلوئوریدی در مجموع ارزان تر از مواد اولیه مصرفی برای تولید اپال‌های فلوئوریدی است.

### ۷- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از تلاش‌ها و زحمات جناب آقای دکتر واهاک مارقوسیان و سایر همکارانشان در دانشکده مهندسی مواد دانشگاه علم و صنعت که در مراحل انجام آزمایشات و ارائه گزارش نتایج آزمایشها، نقش اساسی بر عهده داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.