

جمهوری اسلامی ایران  
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

**دستورالعمل آماده‌سازی، تهیه نمونه و  
مطالعات میکروسکوپی و سیالات درگیر در  
نمونه‌های اکتشافی**

**ضابطه شماره ۶۵۵**

وزارت صنعت، معدن و تجارت  
معاونت امور معادن و صنایع معدنی  
دفتر نظارت و بهره‌برداری

[www.mimt.gov.ir](http://www.mimt.gov.ir)


سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

امور نظام فنی و اجرایی

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)





شماره:	۹۵/۲۴۷۸	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ:	۱۳۹۵/۰۱/۱۱	
موضوع: دستورالعمل آماده‌سازی، تهیه نمونه و مطالعات میکروسکوپی و سیالات درگیر در نمونه‌های اکتشافی		
<p>به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و مواد (۶) و (۷) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی- مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷-هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست ضابطه شماره ۶۵۵ امور نظام فنی و اجرایی، با عنوان «دستورالعمل آماده‌سازی، تهیه نمونه و مطالعات میکروسکوپی و سیالات درگیر در نمونه‌های اکتشافی» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.</p> <p>رعایت مفاد این ضابطه در صورت نداشتن ضوابط بهتر، از تاریخ ۱۳۹۵/۰۷/۰۱ الزامی است.</p> <p>امور نظام فنی و اجرایی این سازمان دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را اعلام خواهد کرد.</p>		
		



## اصلاح مدارک فنی

### خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی

مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
  - ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
  - ۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
  - ۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.
- کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی‌علیشاه، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور،

امور نظام فنی و اجرایی، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

Email: info@nezamfanni.ir

nezamfanni.ir



## باسمه تعالی

### پیشگفتار

نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت ۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات وزیران) به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تأکید جدی قرار داده است و این امور به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و نظام فنی اجرایی کشور وظیفه تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای فنی طرح‌های توسعه‌ای کشور را به عهده دارد. یکی از روش‌های مطالعاتی پرکاربرد در مراحل مختلف اکتشاف و فرآوری مواد معدنی مطالعات میکروسکوپی نوری است. این مطالعات به منظور شناسایی کانی‌ها، مطالعات بافت‌شناسی، بررسی تخلخل، نام‌گذاری سنگ‌ها، تعیین توالی پاراژنتیک، تعیین درجه آزادی کانی‌ها، تعیین نوع دگرسانی‌ها و نظایر آن انجام می‌گیرد. کانی‌ها از نظر خواص نوری به سه گروه شفاف، نیمه‌شفاف و اپک (کدر) تقسیم‌بندی می‌شوند. برای مطالعه کانی‌های شفاف از میکروسکوپ پلاریزان نور عبوری و کانی‌های اپک از میکروسکوپ پلاریزان نور انعکاسی استفاده می‌شود. کانی‌های نیمه‌شفاف را می‌توان در هر دو نوع میکروسکوپ مطالعه کرد. با توجه به اهمیت مطالعات میکروسکوپی نوری در مراحل مختلف اکتشاف و فرآوری، مطالعات باید به نحوی انجام گیرد که پاسخگوی نیازهای بنیادی در هر یک از مراحل یاد شده باشد.

از مطالعات سیالات درگیر و آزمایش میکروترموتری برای اندازه‌گیری درجه حرارت و شوری سیال و محاسبه شرایط فشار-حرارت-ترکیب شیمیایی حاکم بر محیط تشکیل کانی‌ها به طور گسترده استفاده می‌شود.

این ضابطه با عنوان "**دستورالعمل آماده‌سازی، تهیه نمونه و مطالعات میکروسکوپی و سیالات درگیر در نمونه‌های اکتشافی**" به منظور یکسان‌سازی نحوه مطالعات میکروسکوپی نوری در چارچوب برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن تهیه شده است. در این ضابطه ابتدا نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها برای مطالعات میکروسکوپی، دستورالعمل مطالعات میکروسکوپی نور عبوری و انعکاسی و میکروترموتری سیالات درگیر به همراه تصویربرداری و تعبیر و تفسیر آن‌ها ارائه شده است.

با همه‌ی تلاش انجام شده قطعاً هنوز کاستی‌هایی در متن موجود است که این‌شاء... کاربرد عملی و در سطح وسیع این ضابطه توسط مهندسان موجبات شناسایی و برطرف نمودن آن‌ها را فراهم خواهد نمود. در پایان، از تلاش‌ها و جدیت جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان امور نظام فنی و اجرایی همچنین جناب آقای دکتر جعفر سرقینی مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی بخش معدن کشور در وزارت صنایع و معادن، کارشناسان دفتر نظارت و بهره‌برداری معادن و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این ضابطه، تشکر و قدردانی می‌نماید. امید است شاهد توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران در خدمت به مردم شریف ایران اسلامی باشیم.

غلامرضا شافعی

معاون فنی و توسعه امور زیربنایی

فروردین ۱۳۹۵

## مجری طرح

آقای جعفر سرقینی

معاون امور معادن و صنایع معدنی - وزارت صنایع و معادن

## تهیه پیش نویس اصلی

آقای حسین عسگرزاده

## اعضای شورای عالی به ترتیب حروف الفبا

فرزانه آقا رمضانعلی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور	کارشناس ارشد مهندسی صنایع
سیف ... امیری	وزارت صنعت، معدن و تجارت	کارشناس ارشد مهندسی صنایع
بهرروز برنا	سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس مهندسی معدن
محمد پری زادی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
عبدالعلی حقیقی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور	کارشناس ارشد زمین شناسی
جعفر سرقینی	وزارت صنعت، معدن و تجارت	دکتری مهندسی فرآوری مواد معدنی
علیرضا غیاثوند	وزارت صنعت، معدن و تجارت	کارشناس ارشد زمین شناسی اقتصادی
حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن

## اعضای کارگروه اکتشاف به ترتیب حروف الفبا

علی اصغرزاده	سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران	کارشناس ارشد مهندسی معدن
بهرروز برنا	سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس مهندسی معدن
محمد پری زادی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
نعمت ... رشیدنژادعمران	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای پتروژئی
بهزاد مهرابی	دانشگاه خوارزمی	دکترای زمین شناسی اقتصادی

## اعضای کارگروه تنظیم و تدوین به ترتیب حروف الفبا

آقای مهدی ایران نژاد	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی
بهرام رضایی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی
علیرضا غیاثوند	وزارت صنعت، معدن و تجارت	کارشناس ارشد زمین شناسی اقتصادی
حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
بهزاد مهرابی	دانشگاه خوارزمی	دکترای زمین شناسی اقتصادی

## اعضای گروه هدایت و راهبری پروژه

خانم فرزانه آقارضانعلی	رئیس گروه امور نظام فنی و اجرایی
آقای علیرضا غیاثوند	رئیس گروه ضوابط و معیارهای معاونت امور معادن و صنایع معدنی
آقای اسحق صفرزاده	کارشناس معدن امور نظام فنی و اجرایی

پیش نویس این گزارش توسط کارشناسان بخش شیمی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران به سرپرستی آقای مهندس حسین عسگرزاده تهیه شده و پس از بررسی و تایید توسط کمیته اکتشاف، به تصویب شورای عالی برنامه رسیده است.



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول- تعاریف و مفاهیم</b>
	<b>فصل دوم- انتخاب نمونه و آماده‌سازی مقاطع میکروسکوپی</b>
۷	۱-۲- آشنایی.....
۷	۱-۲- انتخاب نمونه.....
۸	۳-۲- آماده‌سازی مقاطع میکروسکوپی و نمودار جریانی آن.....
۸	۱-۳-۲- آماده‌سازی مقاطع نازک.....
۱۳	۲-۳-۲- آماده‌سازی مقاطع صیقلی.....
۱۶	۳-۳-۲- آماده‌سازی مقاطع نازک-صیقلی.....
۱۷	۴-۳-۲- آماده‌سازی مقاطع دوبر صیقل.....
۱۸	۴-۲- ویژگی‌های نمونه‌های مورد نیاز برای تهیه مقاطع و مطالعات میکروسکوپی.....
	<b>فصل سوم- دستورالعمل مطالعات میکروسکوپی نوری عبوری و فرم گزارش نویسی</b>
۲۳	۱-۳- آشنایی.....
۲۳	۲-۳- میکروسکوپ پلاریزان.....
۲۳	۱-۲-۳- میکروسکوپ پلاریزان عبوری.....
۲۴	۲-۲-۳- میکروسکوپ پلاریزان انعکاسی.....
۲۴	۳-۲-۳- استریومیکروسکوپ یا بینوکولار.....
۲۵	۳-۳- طرز کار میکروسکوپ پلاریزان.....
۲۵	۱-۳-۳- حالت ارتوسکوپی.....
۲۵	۲-۳-۳- حالت کنوسکوپی.....
۲۵	۴-۳- واسنجی میکروسکوپ.....
۲۶	۵-۳- مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک.....
۲۷	۶-۳- فرم گزارش نویسی مقاطع نازک و نازک-صیقلی.....
	<b>فصل چهارم- مطالعات میکروسکوپی نور انعکاسی (مقاطع صیقلی و نازک-صیقلی)</b>
۳۱	۱-۴- آشنایی.....
۳۲	۲-۴- معیار شناسایی کانی‌های اپک به کمک میکروسکوپ انعکاسی.....
۳۲	۱-۲-۴- خواص نوری.....
۳۳	۲-۲-۴- خواص سختی.....
۳۳	۳-۲-۴- خواص ساختاری و مورفولوژیکی.....

۳۳	۳-۴- فرم گزارش نویسی استاندارد مقاطع صیقلی
<b>فصل پنجم- دستورالعمل مطالعات میکروسکوپی و میکروترومتری سیالات درگیر</b>	
۳۷	۱-۵- آشنایی
۳۷	۲-۵- سیالات درگیر
۳۷	۱-۲-۵- انواع سیالات درگیر بر اساس فازها
۳۸	۲-۲-۵- انواع سیال‌های درگیر بر اساس زمان به دام افتادن
۳۹	۳-۵- کاربرد مطالعات سیالات درگیر
۳۹	۱-۳-۵- بررسی دیاژنز و ویژگی‌های سیالات در حوضه‌های رسوبی
۳۹	۲-۳-۵- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی مواد معدنی
۳۹	۳-۳-۵- تکنونیک
۳۹	۴-۳-۵- جواهرشناسی
۳۹	۴-۵- تجهیزات مورد نیاز
۴۱	۵-۵- نکات ایمنی
۴۱	۶-۵- واسنجی (کالیبراسیون) صفحه گرم‌کننده و سردکننده
۴۲	۱-۶-۵- مراحل انجام واسنجی (کالیبراسیون)
۴۴	۷-۵- پتروگرافی سیالات درگیر
۴۴	۸-۵- روش میکروترومتری
۴۵	۱-۸-۵- آزمایش گرم کردن
۴۶	۲-۸-۵- آزمایش سرد کردن
۴۷	۹-۵- سیستم‌های شیمیایی سیالات درگیر
۴۷	۱-۹-۵- سیال‌های دو فاز مایع-گاز (L+V)
۴۸	۲-۹-۵- سیال‌های درگیر سه فاز مایع-جامد-گاز (L+V+S)
۴۸	۳-۹-۵- سیالات درگیر نامیخته (L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> +V)
۴۸	۴-۹-۵- سیالات غنی از CO <sub>۲</sub>
۴۹	۱۰-۵- نقاط اندازه‌گیری
۵۱	۱۱-۵- ارزیابی نتایج مطالعات میکروترومتری
۵۱	۱۲-۵- ارتباط درجه شوری و دمای همگن شدن در تیپ‌های مختلف کانساری
<b>فصل ششم- دستورالعمل تصویربرداری از مقاطع و تعبیر و تفسیر</b>	
۵۵	۱-۶- آشنایی
۵۵	۲-۶- تصاویر میکروسکوپی
<b>پیوست - علایم استاندارد برای نام‌گذاری برخی از کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی</b>	

# فصل ۱

---

---

## تعاریف و مفاهیم



## ۱-۱- تعاریف و مفاهیم

**سیالات درگیر:** هم‌زمان با رشد بلورها، به علت ناهمسانی‌هایی که در رشد آن‌ها تحت تاثیر عوامل متعدد روی می‌دهد، فضاهایی در سطوح رشد بلور ایجاد شده و یا در ضمن یا پس از رشد، درزه‌هایی در بلور ایجاد می‌شود که محلول‌های کانه‌دار در آن‌ها محبوس می‌شوند. به این گونه فضاها و محتویات داخل آن‌ها سیالات درگیر گفته می‌شود.

**بافت کانسنگ:** بافت کانسنگ در کانسارهای گوناگون، متفاوت است و به ماهیت سیال‌های کانی‌ساز، مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ‌های میزبان و شیوه جایگزینی کانی‌ها بستگی دارد. تفسیر بافت در تعیین رابطه زمانی مجموعه‌های متوالی کانی در یک کانسار، محیط کلی تشکیل و شیوه نهشت اهمیت زیادی دارد. بافت کانسنگ‌ها با شکل، اندازه، حالت لایه لایه و نحوه رشد کانی‌ها مشخص می‌شود. مهم‌ترین بافت‌های موجود در کانسنگ‌ها شامل بافت ته‌نشینی، پرکننده فضای خالی، جان‌شینی، کلوییدی و بافت برون‌رست (اکسلوشن) هستند.

**دگرسانی:** تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی که تحت تاثیر سیالات ماگمایی و یا گرمایی در سنگ‌ها ایجاد می‌شود. عوامل کنترل‌کننده این تغییرات شامل ترکیب شیمیایی سیال، دما، عمق، شرایط Eh و pH محلول، ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ دگرسان شده است. از دگرسانی‌های مهم می‌توان دگرسانی‌های پتاسیک، سریسیتیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک، آلونیتی، سیلیسی، کلریتی، زئولیتی و آلبیتی را نام برد.

**پتروگرافی:** مطالعه بافت و کانی‌شناسی سنگ‌ها و کانسنگ‌ها با استفاده از مقاطع میکروسکوپی و میکروسکوپ نوری عبوری و انعکاسی پلاریزه، برای توصیف و نام‌گذاری آن‌ها.

**مینرالوگرافی (کانه‌شناسی میکروسکوپی):** روش مطالعه و شناسایی کانی‌های فلزی و بررسی بافت آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان نور انعکاسی.

**مطالعات میکروترموتری:** مطالعه غیرمخرب سیالات درگیر برای تعیین دما، میزان شوری، جرم مخصوص و ترکیب آن‌ها.

**مقطع صیقلی:** نمونه‌ای که به کمک مواد ساینده و صیقل دهنده به گونه‌ای صیقل داده می‌شود که خصوصیات نوری کانی‌های فلزی (کانه‌ها) با میکروسکوپ نور انعکاسی در آن قابل مطالعه باشد.

**مقطع نازک:** قطعه‌ای از سنگ که آن را بر روی لام می‌چسبانند و با پودرهای ساینده سایش می‌دهند تا به ضخامت ۳۰ میکرون برسد. در این مقاطع خصوصیات نوری کانی‌های شفاف با میکروسکوپ نور عبوری قابل مطالعه است (کنترل ضخامت مناسب با بررسی رنگ بیرفرنژانس کانی کوارتز که رنگ خاکستری سری اول جدول سری رنگ نیوتن است انجام می‌گیرد).

**مقطع نازک صیقلی:** مقطع نازکی که سطح خارجی آن به نحوی صیقل داده شده است که هم با میکروسکوپ نور عبوری و هم انعکاسی قابل مطالعه است. از این مقاطع برای شناسایی هم‌زمان کانی‌های شفاف و اپک در مطالعات کانسنگ‌ها و تعیین توالی پاراژنتیک استفاده می‌شود.

**مقطع دوبر صیقل (ویفر):** برش نازک کانی‌های شفاف به ضخامت ۶۰ تا ۲۰۰ میکرون که هر دو سطح آن‌ها به گونه‌ای صیقل داده شده که سیالات درگیر در آن قابل مشاهده و مطالعه است. ضخامت نهایی ویفر به شفافیت کانی میزبان، ضریب شکست آن، اندازه و فراوانی سیالات درگیر بستگی دارد.

**دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> (SEM):** نوعی میکروسکوپ الکترونی که قابلیت عکس‌برداری از سطوح با بزرگنمایی ۱۰ تا ۱۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیکی در حد ۳ تا ۱۰۰ نانومتر (بسته به نوع نمونه) را دارد. این دستگاه مجهز به یک میکرو آنالیزور است که قابلیت تجزیه شیمیایی کیفی و نیمه کمی نقاط مشخص شده بر روی نمونه به قطر ۳ تا ۵ میکرون را دارد.

**دستگاه الکترون مایکروپروب<sup>۲</sup> (EPMA):** اساس کار مایکروپروب بمباران الکترونی حجم بسیار کوچکی از نمونه با یک تفنگ الکترونی با انرژی بین ۵ تا ۳۰ کیلو الکترون‌ولت و اندازه‌گیری میزان سیگنال‌های برگشتی از نمونه است. یکی از این سیگنال‌ها اشعه ایکس و مشخصه هر عنصر است که به وسیله ۳ تا ۵ اسپکترومتر (WDS)<sup>۳</sup> اندازه‌گیری می‌شود. با واسنجی مناسب امکان تجزیه نقطه‌ای کمی با حد تشخیص ppm به وسیله این دستگاه امکان‌پذیر است.

**ادخال:** بلورهای ریز یک کانی در کانی میزبان.

---

۱- Scanning electron microscope

۲- Electron probe micro analyzer

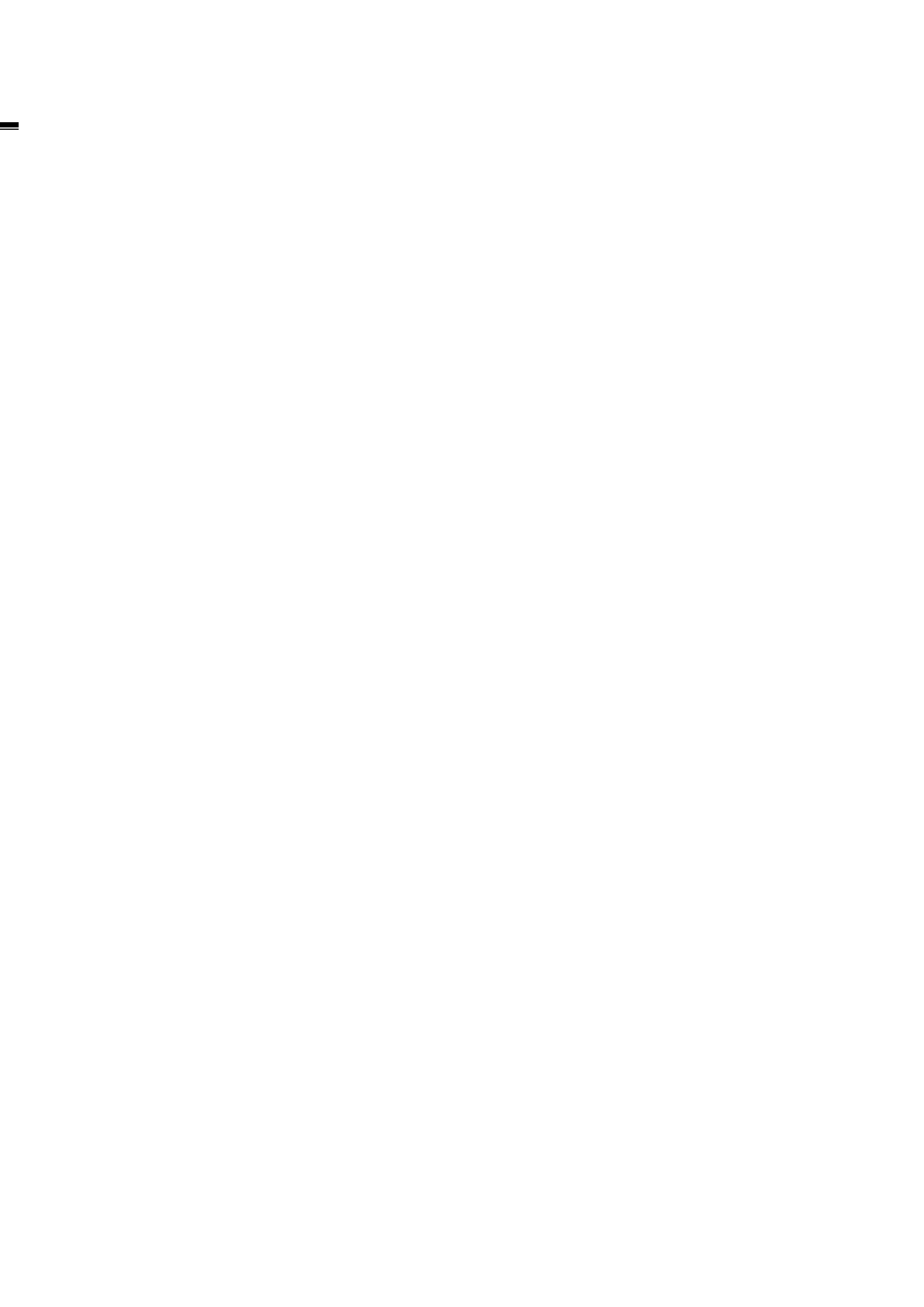
۳- Wavelength dispersive spectrometer

# فصل ۲

---

انتخاب نمونه و آماده‌سازی

مقاطع میکروسکوپی





## ۲-۱- آشنایی

طی تشکیل کانسارها، هاله‌های اولیه شکل می‌گیرند که ارتباط فضایی نزدیکی با ذخیره اصلی دارند. هاله‌های اولیه به وسیله روش‌های پتروگرافی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی قابل مطالعه هستند. برای مطالعات پتروگرافی هاله‌های اولیه، از سنگ بستر نمونه‌برداری می‌شود. هاله‌های ثانویه محصول توزیع دوباره هاله‌های اولیه و یا حتی خود توده‌های کانساری تحت تاثیر عوامل شیمیایی، فیزیکی و یا بیولوژیکی است. هاله‌های ثانویه معمولاً بسیار بزرگتر از هاله‌های اولیه هستند و در نتیجه احتمال کشف را افزایش می‌دهند اما در عین حال به دلیل ضعف ارتباط فضایی با منبع اصلی، تفسیر آن‌ها به مراتب دشوارتر و ریسک تخمین‌های وابسته به آن‌ها بیشتر است. معمولاً برای مطالعات هاله‌های ثانویه از روش‌های ژئوشیمیایی استفاده می‌شود و برای بررسی‌های دقیق‌تر، مطالعات کانی‌شناسی نیز بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد.

فرآیندهای پیوسته فعال در تشکیل کانسارها موجب شکل‌گیری یک فضای دگرسان شده در اطراف آن‌ها می‌شود. در این فضا که هاله دگرسانی نامیده می‌شود، مجموعه‌ای از کانی‌های دگرسانی به صورت محصول فرآیندهای متاسوماتیک و یا گرمایی تشکیل می‌شوند. این هاله‌ها هم گسترده‌تر از کانسارها و هم مشهودتر هستند بنابراین احتمال کشف را افزایش می‌دهند. از طرفی این هاله‌ها نتیجه فرآیندهای مرتبط با تشکیل کانسارها هستند و با آن ارتباط ژنتیکی دارند. ماهیت این ارتباط به نحوی است که پیدایش هاله دگرسانی یک کانی یا کانی‌سازی خاص در یک منطقه معرف احتمال پیدایش تیپ‌های معینی از کانی‌سازی در آن منطقه است.

## ۲-۲- انتخاب نمونه

در نمونه‌برداری‌های اکتشافی به منظور مطالعات کانی‌شناسی و پتروگرافی باید به موارد زیر توجه شود:

- برای مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های اکتشافی دارای آثار کانی‌سازی مشهود با بیشترین تنوع کانی‌شناسی انتخاب شوند.
- برای مطالعات میکروسکوپی از سنگ میزبان، بخش کانی‌سازی شده و زون‌های دگرسانی باید نمونه‌برداری شود.
- برای مطالعات سنگ‌شناسی توصیه می‌شود که از بخش‌هایی که کمترین دگرسانی را دارند نمونه‌برداری شود.
- در تمام مراحل اکتشاف باید از سنگ‌های میزبان، دگرسانی‌ها و بخش‌های کانی‌سازی شده نمونه‌برداری شود.
- از محل مرز تغییرات لیتولوژی، بافت، ساخت یا رنگ باید نمونه‌برداری شود.

کانسنگ‌هایی که در آن‌ها کانی‌های مفید به صورت منظم و یکنواخت هستند، اندک است و بیشتر آن‌ها مخلوطی از کانی‌های متفاوت هستند که مقدارشان در بخش‌های مختلف کانسار تغییر می‌کند. در این حالت‌ها بهتر است نمونه‌های شاخصی در فاصله‌های کوتاه برای ارزیابی دقیق از کل کانی‌های با ارزش و مزاحم در کانسار انتخاب شوند. به طور معمول بهترین نمونه‌ها از مغزه‌های حفاری به ویژه زمان برخورد با زون کانی‌سازی با بازیابی مناسب برداشت می‌شود. مغزه را در جهت طول به دو نیم تقسیم می‌کنند و بخش‌هایی از یک نیمه آن برای مطالعات میکروسکوپی نمونه‌برداری می‌شود. از بخش‌های بارز و نمایان کانه‌ها باید در فاصله‌های معین از کمر بالا به کمر پایین نمونه‌برداری شود. از رگه‌ها، رگچه‌ها، تغییر رنگ‌ها و لیتولوژی‌ها در کانسنگ نیز باید نمونه‌برداری شود. از بخش‌هایی با شدت دگرسانی زیاد علاوه بر نمونه‌برداری برای مطالعات میکروسکوپی، شناسایی دقیق‌تر، نمونه‌هایی برای مطالعات پراش پرتو ایکس نیز برداشت می‌شود.

## ۲-۳- آماده‌سازی مقاطع میکروسکوپی و نمودار جریانی آن

به منظور شناسایی کانی‌ها، مطالعه بافت‌شناسی و بررسی تخلخل و نظایر آن‌ها از سنگ‌ها و کانی‌ها مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه می‌شود.

### ۲-۳-۱- آماده‌سازی مقاطع نازک

بعد از انتخاب نمونه مناسب، برای آماده‌سازی مقطع نازک در ابتدا اگر نمونه دارای رطوبت باشد، باید آن را در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داد. باید توجه کرد که دما تأثیری بر روی ترکیب کانی‌شناسی نمونه نداشته باشد (شکل ۲-۱). در صورت نیاز با استفاده از سیستم خلا و دستگاه حباب‌گیر، نمونه را داخل رزین اپوکسی قرار می‌دهند تا رزین حفرات و شکستگی‌های نمونه‌های سست و دارای خلل و فرج را پر کند تا در مرحله برش و سایش، نمونه شکسته و یا خرد نشود. یکی از نکات بسیار مهم، انتخاب جهت برش نمونه است زیرا در نمونه‌های جهت یافته (مثلا دارای لایه‌بندی، ریزساختار و شیبستوزیته) بسته به انتخاب جهت برش نوع مشاهدات متفاوت خواهد بود. معمولاً در شرایط عادی در صورت وجود بافت‌های جهت یافته برش نمونه در جهت عمود یا کمی مایل نسبت به جهت‌یافتگی اصلی انجام می‌گیرد. در مواردی ممکن است چند مقطع با جهت‌های برش متفاوت تهیه شود تا مطالعات پتروگرافی به نحو مطلوب انجام گیرد. پس از انتخاب جهت برش، ابتدا سنگ و یا کانسنگ مورد مطالعه به شکل مکعب مستطیل برش داده می‌شود (شکل ۲-۲). ابعاد این برش به اندازه لام میکروسکوپ مورد استفاده بستگی دارد. ابعاد لام‌های استاندارد که استفاده می‌شوند ۲۷×۴۶ یا ۲۶×۷۵ میلی‌متر است. عرض بلوک در حدود ۲۶ میلی‌متر و طول آن برای لام‌های بلند ۵۰ و برای لام‌های کوتاه ۳۵ میلی‌متر است. پس از برش، به کمک پودرهای کاربید سیلیسیم یک سطح بلوک به طور کامل ساییده می‌شود (شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴). برای این کار ابتدا از پودر ۳۲۰ مش<sup>۱</sup> و در مرحله نهایی از پودر ۶۰۰ تا ۸۰۰ مش استفاده می‌شود. در صورتی که نمونه دارای تخلخل و یا دارای کانی‌های با سختی زیاد و کم در کنار هم باشد، این مرحله تنها باید با استفاده از پودر نرم انجام گیرد. سپس سطح ساییده شده را با استفاده از چسب دوقلو به لام می‌چسبانند. به منظور گیرش بهتر، یک سطح لام نیز باید به کمک پودرهای ساییده مات شود. لام‌های استاندارد زمین‌شناسی با یک سطح مات عرضه می‌شوند و نیازی به انجام این مرحله ندارند.

چسب دوقلوی شفاف را مطابق دستورالعمل شرکت سازنده به اندازه مشخص مخلوط و سپس چند قطره روی سطح ساییده شده بلوک می‌ریزند و لام را به آهستگی روی بلوک قرار می‌دهند و با دو انگشت به میزان مساوی بر لام فشار وارد می‌کنند تا تمامی حباب‌های هوا خارج شود. بعد از یک دقیقه انگشتان را از روی لام برمی‌دارند و مقطع را به مدت چند ساعت دور از نور و گرما قرار می‌دهند تا چسب کاملاً سخت شود. مخلوط اپاکسی باید در حد مورد نیاز تهیه شود، زیرا مخلوط آن سخت و غیر قابل استفاده می‌شود. در گذشته، از صمغ کانادا بالزام که به صورت جامد است استفاده می‌شد، در صورت استفاده از این جسم باید بلوک را روی هیتر با دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داد، به طوری که سطح ساییده شده آن به سمت بالا باشد. آن گاه صمغ را روی بلوک مالش می‌دهند تا چسب به طور کامل آن را فرا گیرد. پس از آن لام را روی آن قرار می‌دهند و به مدت حدود یک دقیقه به آن فشار

ASTM standard - ۱

وارد می‌کنند تا همه حباب‌های هوا خارج شود و بلوک و لام را از روی هیتر برمی‌دارند تا سرد و کاملاً سخت شود. مهم‌ترین مساله در این مرحله، اطمینان از خارج شدن حباب‌ها است. بنا به ملاحظات استفاده از کانادا بالزام توصیه نمی‌شود.

ضخامت اضافه بلوک نصب شده روی لام با دستگاه خودکار و یا به روش دستی برش داده شده و سپس برای کاهش ضخامت تا حد استاندارد (۳۰ تا ۴۵ میکرون) به کمک پودرهای ساینده، ساییده می‌شود. در دستگاه‌های خودکار ضخامت، طول و عرض لام استاندارد است و پس از نصب بلوک بر روی لام آن را در جایگاه مخصوص دستگاه قرار می‌دهند. نمونه‌ها به وسیله سیستم خلا در دستگاه نگهداری می‌شوند. بر حسب ظرفیت، در هر مرحله ۵ تا ۷ مقطع در دستگاه جای داده می‌شود. ابتدا با اره نمونه‌های نصب شده را در ضخامت خاصی برش می‌دهند، سپس به کمک صفحه ساب مقاطع را می‌سایند تا به ضخامت استاندارد (حدود ۳۰ تا ۴۵ میکرون) برسند. در دستگاه‌های غیرخودکار، ابتدا بخش قابل ملاحظه‌ای از بلوک با اره کوچک بریده می‌شود، سپس به کمک پودرهای کاربرد سیلیسیم (ابتدا پودر درشت ۴۰۰ مش و در مرحله نهایی پودر نرم ۹۰۰ مش) ساییده می‌شود تا به ضخامت استاندارد برسد. برای تعیین ضخامت استاندارد از کانی‌هایی استفاده می‌شود که بیرفرژانس آن‌ها پایین باشد که در اکثر سنگ‌ها یافت می‌شوند. به عنوان مثال کوارتز و فلدسپات‌ها برای این منظور مناسبند. در ضخامت حدود ۳۰ میکرون رنگ تداخلی این کانی‌ها خاکستری و مایل به سفید است. هنگام ساییدن به رنگ تداخلی این کانی‌ها توجه می‌شود. در صورت نبود این کانی‌ها از ریزسنگ برای اندازه‌گیری ضخامت استفاده می‌شود که شامل تفاضل اندازه ضخامت کل منهای ضخامت لام است. نمودار جریان مراحل آماده‌سازی مقطع نازک در شکل ۲-۵ ارایه شده است.

برش و سایش نمونه‌هایی که به آب حساس هستند باید در نفت و یا الکل انجام گیرد. بعد از انجام مراحل سایش، به سطح نمونه لامل چسبانده شده و نمونه تثبیت می‌شود. بعد از چسباندن نمونه روی لام و یا چسباندن لامل روی نمونه، باید با استفاده از گیره از به تله افتادن حباب هوا جلوگیری کرد. در نمونه‌های ماسه‌سنگی، رسی و شیلی باید قبل از برش نمونه، عمل تزریق رزین و استفاده از سیستم حباب‌گیر در نمونه انجام گیرد تا از خرد شدن و از بین رفتن نمونه در مراحل بعدی جلوگیری شود. دستگاه برش نمونه از مهم‌ترین ابزارهای آماده‌سازی نمونه است که قابلیت برش نمونه در ابعاد مناسب برای تهیه مقطع نازک را دارد و بسته به نوع تیغه اره سرعت برش متفاوت است. آب در هنگام برش به عنوان خنک‌کننده اره عمل می‌کند و برای نمونه‌هایی که به آب حساس هستند باید از ترکیبات دیگری استفاده کرد. در مرحله سایش برای کاهش ضخامت نمونه از ترکیبات ساینده نظیر کاربرد سیلیسیم<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در مرحله اول سایش از پودرهای درشت‌تر (۴۰۰ و ۶۰۰ مش) و در مراحل پایانی از پودرهای ریزتر (۸۰۰ و ۱۲۰۰ مش) استفاده می‌شود. در شکل ۲-۶ ترتیب مراحل آماده‌سازی مقاطع نازک از قطعه سنگ تا مقطع نازک نمایش داده شده است. کوارتز و پلاژیوکلازها کانی‌های معمول اکثر سنگ‌های آذرین هستند که برای بررسی ضخامت نمونه مناسب‌اند. جدول ارتباط ضخامت نمونه با بیرفرژانس تحت عنوان جدول میشل لوی<sup>۱</sup> در کتاب‌های مطالعات میکروسکوپی نوری موجود است. البته در صورت نیاز می‌توان به کمک ریزسنگ، ضخامت دقیق را اندازه‌گیری کرد. نمونه‌هایی از انواع مقاطع برای مطالعات میکروسکوپی در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱- دستگاه آون برای خشک کردن نمونه‌های مرطوب



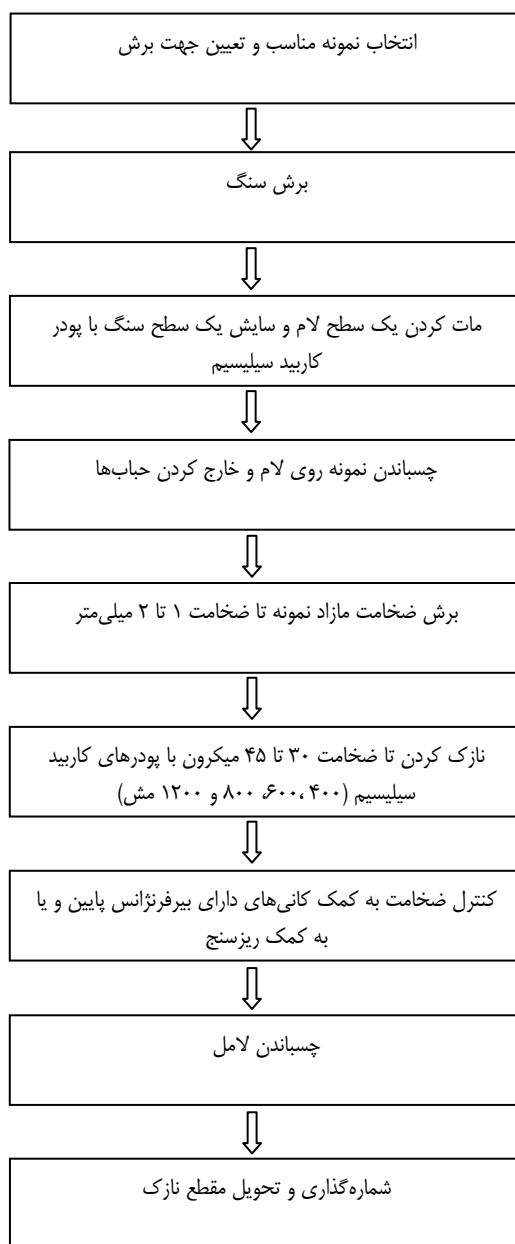
شکل ۲-۲- دستگاه برش سنگ که علاوه بر برش می‌توان با آن نمونه را تا ضخامت ۵۰ میکرون نازک کرد.



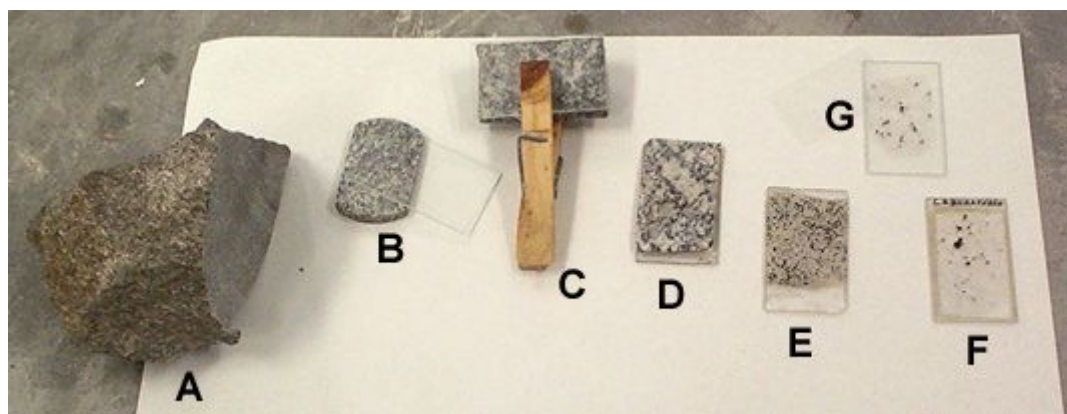
شکل ۲-۳- دستگاه سایش خودکار



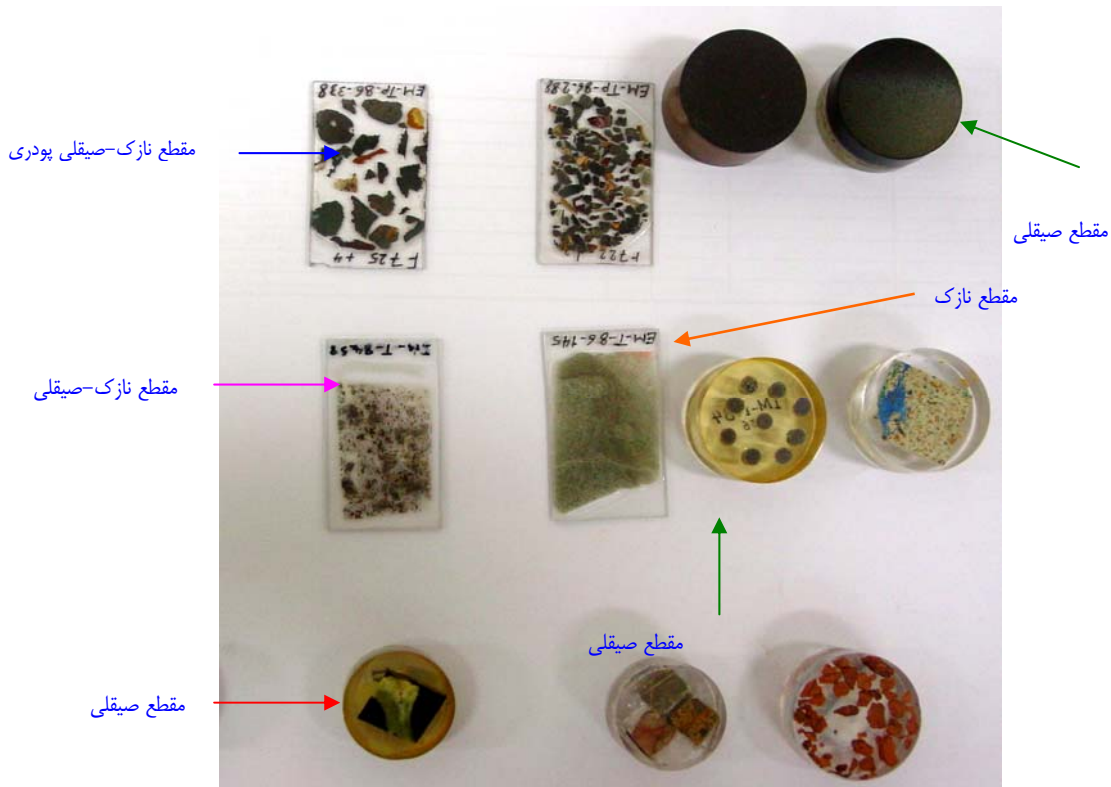
شکل ۲-۴- مرحله سایش نمونه به روش دستی



شکل ۲-۵- نمودار جریان‌ی مراحل آماده‌سازی مقطع نازک



شکل ۲-۶- ترتیب مراحل آماده‌سازی مقاطع نازک از قطعه سنگ تا مقطع نازک



شکل ۲-۷- نمونه‌هایی از انواع مقاطع برای مطالعات میکروسکوپی

### ۲-۳-۲- آماده‌سازی مقاطع صیقلی

بسیاری از مواد معدنی (کانه‌ها) در نمونه‌های دستی و به صورت ماکروسکوپی قابل تشخیص نیستند. به همین دلیل برای تشخیص خصوصیات دقیق‌تر و کامل باید به صورت میکروسکوپی مورد بررسی قرار گیرند. یک نمونه خوب و مناسب برای این منظور، نمونه‌ای است که دارای سطحی صیقل یافته، حداقل شکستگی، برجستگی و فرورفتگی است که تحت تاثیر تغییرات گرمایی و مکانیکی نیز قرار نگرفته باشد. برای تهیه نمونه از کانسنگ‌ها روش‌های متعددی وجود دارد که تمامی آن‌ها مستلزم انتخاب دقیق نمونه، منظم کردن، قالب‌گیری و صیقل دادن بهتر آن است (شکل ۲-۸). برای این کار لازم است که از کانه‌ها نمونه‌های صیقلی تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان نور انعکاسی مورد مطالعه قرار گیرد. مثلاً به کمک چند آزمایش می‌توان مواد معدنی موجود در یک نمونه را تشخیص داد، حتی به نظم و آرایش و شکل آن‌ها، بافت‌های گوناگون و بالاخره پاراژنز آن‌ها پی برد. برای به دست آوردن این اطلاعات باید نمونه‌های انتخابی بدون ترک بوده و اکسیده و سست نباشند. مطالعات میکروسکوپی نوری انعکاسی (مینرالوگرافی) برای تشخیص نمونه‌های کانسنگ بسیار ضروری و متداول است و جزو کم خرج‌ترین روش‌های مطالعات علمی است. برای مطالعه کانی‌های فلزی، نمونه باید به طرز مناسب صیقل داده شود. آماده‌سازی مقاطع صیقلی در چهار مرحله برش، قالب‌گیری، سایش و صیقل به شرح زیر انجام می‌شود:

#### الف- برش

با توجه به تنوع کانی‌شناسی، بافت و تغییرات آن‌ها محدوده‌ای به قطر متناسب با قالب مورد استفاده (۲۵، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر) و ضخامت حدود یک سانتی‌متر برش داده می‌شود.

### ب- قالب‌گیری

نمونه برش داده شده و سطح مورد مطالعه باید با استفاده از پودرهای ساینده بسیار نرم، مسطح و صاف شود. اندازه نمونه باید کمی کوچکتر از قالب نمونه باشد. قطر قالب‌ها معمولاً ۲/۵، ۳ و ۵ سانتی‌متر و ضخامت قالب معمولاً ۲ سانتی‌متر است. قالب‌گیری به دو روش سرد و گرم انجام می‌گیرد که قالب‌گیری سرد متداول‌تر است (شکل ۲-۹). به منظور جداسازی، سطح داخل قالب باید با گریس یا وازلین آغشته شود. نمونه را به حالتی که سطح آماده شده به طرف پایین باشد داخل قالب قرار می‌دهند. سپس موادی نظیر اپاکسی و یا پولیستر را داخل قالب می‌ریزند و آن را داخل محفظه خلا قرار می‌دهند تا حباب هوا خارج شود و چنانچه نمونه دارای حفره و درزه باشد این فضاها کاملاً پر شود. عمل قالب‌گیری باید ارتباط کانی‌ها و بافت نمونه را حفظ کند. در قالب‌گیری به روش گرم نمونه را داخل سیلندر دستگاه قرار می‌دهند و بر روی آن مواد پلاستیکی از جنس باکالیت می‌ریزند در اثر حرارت دادن، مواد پلاستیکی ذوب می‌شود و نمونه را در برمی‌گیرد.

### پ- سایش

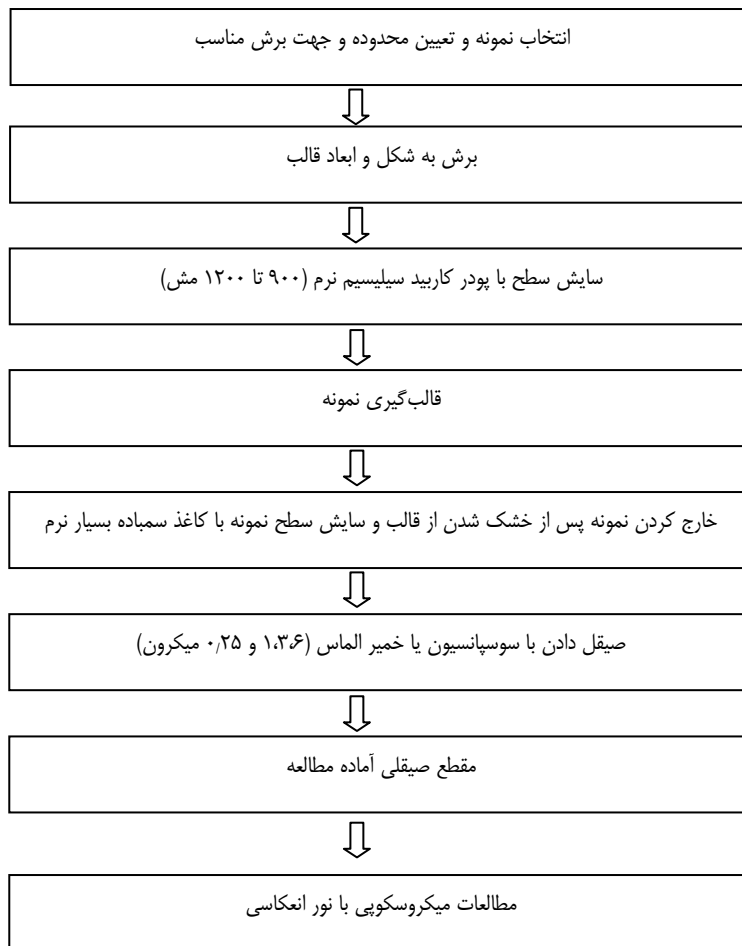
ابتدا ناهمواری‌های سطح نمونه و مواد مورد استفاده در قالب‌گیری، صاف شده و نمونه‌ها آماده مراحل صیقل می‌شوند. در این مرحله نباید هیچ گونه تغییر شکل در سطح کانی‌ها رخ دهد و خراش ایجاد شود. مهم‌ترین ماده ساینده کاربرد سیلیسیم است که به حالت پودر و کاغذ سمباده مورد استفاده قرار می‌گیرد. پودر و یا کاغذ سمباده‌ای که استفاده می‌شود باید بسیار ریزدانه و در حد ۹۰۰ مش باشد. لبه‌های نمونه قالب‌گیری شده، ابتدا باید پخ شود تا به کاغذ سمباده آسیب نرسد. سایش تا زمانی ادامه دارد تا تمامی خراش‌ها حذف شوند. عمل سایش به ترتیب روی کاغذ سمباده و یا پودر ساب برای اندازه‌های مختلف روی صفحه دوار انجام می‌شود. سایش در هر مرحله باید عمود بر جهت قبلی باشد و حتماً نمونه و دست‌ها در پایان هر مرحله باید کاملاً شسته شود. در مرحله پایانی نمونه با الکل شسته شده و سپس خشک می‌شود. برخی از کانی‌ها نظیر استینیت در اثر فشار بیش از حد دچار ماکل مکانیکی می‌شوند و تغییر شکل در آن‌ها به وجود می‌آید. بنابراین در مورد برخی از کانی‌های فلزی تنها باید از پودر نرم زیر ۱۲۰۰ مش استفاده کرد.

### ت- صیقل

نمونه ساییده شده با استفاده از مواد صیقل دهنده مناسب روی صفحه‌های دوار و یا لرزان به نحوی صیقل داده می‌شود تا جلای فلزی آن‌ها کاملاً نمایان شود و سطح نمونه نور را بازتاب کند. مواد صیقل دهنده متداول شامل اکسید آلومینیم، اکسید منیزیم، اکسید کرم، اکسید آهن و خمیر الماس هستند. این مواد به همراه محلول روان‌ساز مناسب به کار می‌روند. در مورد خمیرهای الماس از روغن و محلول مناسب باید استفاده کرد. اندازه مواد صیقل دهنده متداول به ترتیب ۹، ۶، ۳، ۱ و ۰/۲۵ میکرون است. برای صیقل از پارچه‌های محکم، با پرز کم و دارای قابلیت نگهداری مواد صیقل دهنده استفاده می‌شود. پارچه باید فاقد مواد شیمیایی آلوده‌کننده و موادی که موجب خراش در نمونه می‌شوند، باشند. پارچه مناسب مخصوص روی صفحه دوار نصب و سپس مواد صیقل دهنده به همراه محلول مناسب به آن اضافه می‌شود (شکل ۲-۱۰). نمونه روی این صفحات دوار به تدریج صیقل داده می‌شود. پس از هر مرحله نمونه و دست‌ها باید تمیز شسته شوند تا مواد صیقل دهنده به مرحله بعد منتقل نشود. نمونه باید با فشار کم و مناسب صیقل داده شود. در هر مرحله لازم است خراش‌های قبلی کاملاً حذف شود. کیفیت نمونه صیقل داده شده به نوع مواد صیقل دهنده، نوع



پارچه، زمان، وسایل کارگاه، میزان فشار و نحوه نگهداری نمونه بستگی دارد. با توجه به وقت و هزینه زیادی که برای تهیه نمونه‌ای مناسب صرف می‌شود، باید از نگهداری نادرست اجتناب کرد زیرا در صورت بروز تغییرات ثانوی مانند کدر یا اکسید شدن سطح نمونه باید قبل از مطالعه میکروسکوپی آن را دوباره صیقل داد. برای نگهداری نمونه‌ها از ظروف مقوایی یا پلاستیکی و کمد های مخصوص استفاده می‌شود. سطح صیقل یافته نمونه را هیچگاه نباید به وسیله پارچه تمیز کرد. در مواردی و به هنگام مطالعه میکروسکوپی برای از بین بردن لکه روغن یا گرد و غبار از دستمال مخصوص عدسی میکروسکوپ که آغشته به الکل باشد باید استفاده کرد. اثر انگشت که ناشی از بی‌توجهی در دست زدن به سطح نمونه‌ها است عامل اصلی چرب شدن سطح نمونه است. سطح صیقل یافته نمونه هیچگاه نباید رو به پایین قرار بگیرد، حتی اگر زیر آن پارچه باشد، زیرا باعث جمع شدن گرد و غبار می‌شود و باید دوباره آن را صیقل داد. برخی از کانی‌های سولفیدی در مجاورت رطوبت هوا اکسیده و کدر می‌شوند. بنابراین در مورد نمونه‌های تهیه شده از کانسنگ‌های سولفیدی مراقبت بیشتری مورد نیاز است. با توجه به سختی، بافت و نوع کانی‌ها حداقل سه تا چهار مرحله صیقل دادن مورد نیاز است.



شکل ۲-۸- روندنمای مراحل آماده‌سازی مقطع صیقلی



شکل ۲-۹- دستگاه پرس نمونه برای تهیه نمونه‌های صیقلی به روش گرم



شکل ۲-۱۰- دستگاه صیقل خودکار

### ۲-۳-۳- آماده‌سازی مقاطع نازک-صیقلی

با استفاده از مقاطع نازک-صیقلی، امکان مطالعه هم‌زمان نمونه در نور انعکاسی و عبوری فراهم می‌شود. این نمونه‌ها را برای مطالعه کانسنگ‌های حاوی کانی‌های شفاف، نیمه‌شفاف و اپک به کار می‌برند. استفاده از مقاطع نازک-صیقلی امکان بررسی درجه آزادی کانی‌های اپک و نحوه درگیری آن‌ها با کانی‌های شفاف را فراهم می‌کند. سایش و نازک کردن نمونه‌های نازک-صیقلی مشابه تهیه مقاطع نازک و ضخامت استاندارد نمونه ۳۰ تا ۶۰ میکرون است. موادی که برای صیقل دادن نمونه‌ها استفاده می‌شود متنوع و شامل ترکیبات سوسپانسیون، ساینده‌ها و خمیر الماس است. مراحل اولیه صیقل با استفاده از مواد صیقل دهنده در ابعاد ۶ و ۳ میکرون و صیقل نهایی با مواد صیقل دهنده در ابعاد ۱ و ۰/۲۵ میکرون انجام می‌شود (شکل ۲-۱۱). هر چه زمان صیقل در هر مرحله بیشتر باشد قابلیت انعکاس نور در نمونه بیشتر و کیفیت نمونه بهتر می‌شود. علاوه بر مطالعات میکروسکوپی نوری، برای مطالعات میکروسکوپ الکترونی و تجزیه‌های نقطه‌ای به روش الکترون مایکروپروب نمونه‌های معدنی و بخش‌های سیلیکاته و مطالعات کاتدولومینسانس<sup>۱</sup> سنگ‌های کربناتی نیز از مقاطع نازک-صیقلی استفاده می‌شود. کیفیت تصاویر کاتدولومینسانس ارتباط زیادی با کیفیت سطح نمونه دارد. در هر مرحله از سایش و صیقل باید مواد ساینده و صیقل دهنده به طور کامل از نمونه جدا شود و

۱- Cathodoluminescence (CL)

نمونه به طور کامل تمیز شود. نمونه‌های آماده شده را باید با آب ولرم و مواد شوینده مایع داخل اولتراسونیک گذاشت تا چربی‌های موجود در سطح نمونه از آن جدا شوند. سایش نمونه‌ها با پودرهای کاربید سیلیسیم معمولاً با دست انجام می‌شود و مرحله صیقل نمونه‌ها به وسیله دستگاه‌های صیقل دهنده انجام می‌گیرد. معمولاً بسته به سختی کانی‌های تشکیل دهنده نمونه، مقاطع مانند مقاطع نازک آماده‌سازی می‌شوند و در ضخامت بیشتر از ضخامت نهایی مراحل صیقل دادن و نازک شدن به صورت هم‌زمان و تا حدود ۳۰ تا ۶۰ میکرون انجام می‌گیرد.

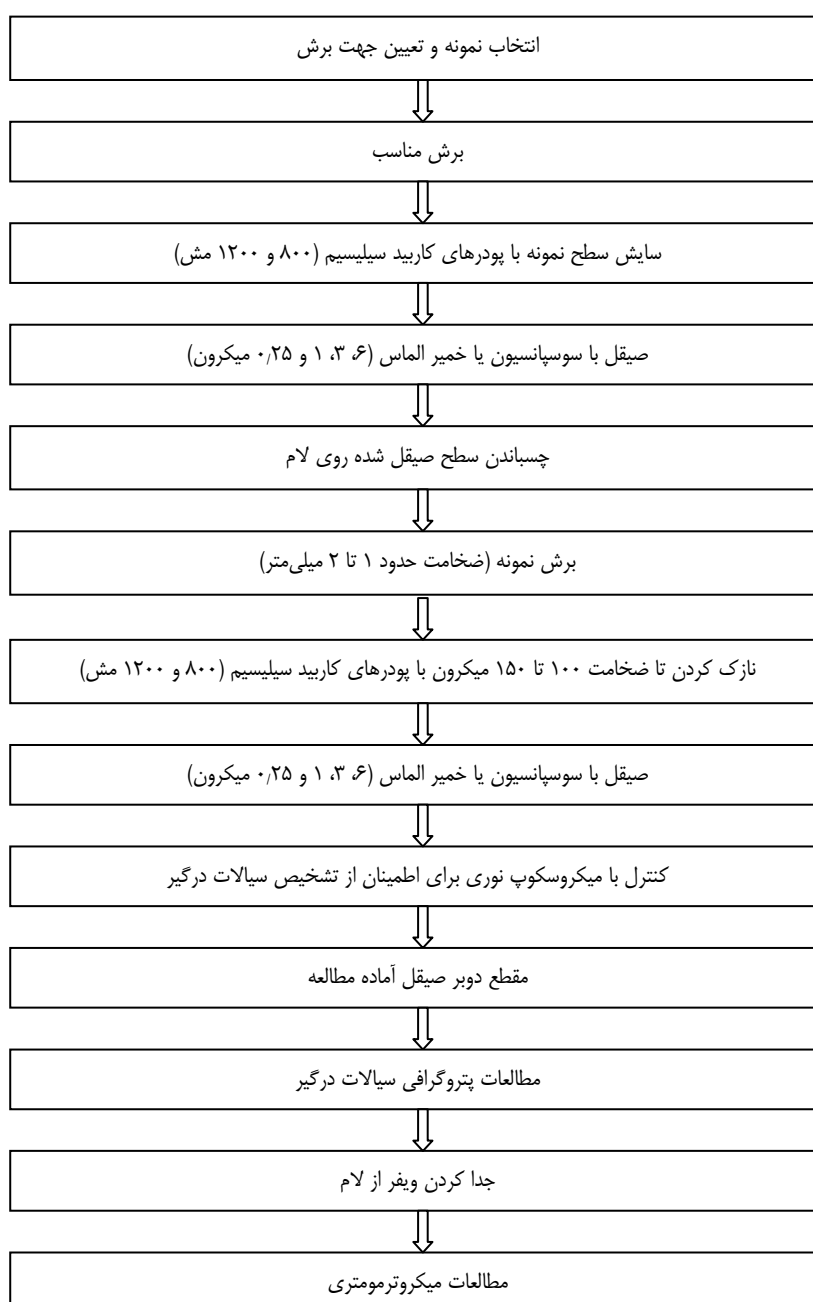


شکل ۲-۱۱- نمودار جریانی مراحل آماده‌سازی مقطع نازک-صیقلی

### ۲-۳-۴- آماده‌سازی مقاطع دوبر صیقل (ویفر)

برای مطالعات میکروتومتری از ویفرهای نازک کانی‌های شفاف استفاده می‌شود. این ویفرها باید در هر دو طرف صیقل شوند تا شفافیت حداکثر در کانی به دست آید. انتخاب نمونه بر اساس محیط زمین‌شناسی که نمونه در آن ظاهر شده و محدوده کانی‌های موجود انجام می‌گیرد. کوارتز به علت رخداد زمین‌شناسی گسترده، شفافیت و به دام انداختن سیال‌های درگیر نسبتاً بزرگ، بهترین گزینه است. در حالت ایده‌آل، کوارتز باید ظاهری شفاف داشته باشد. نمونه‌های نهان بلور مات یا شیری به دلیل وجود سیالات درگیر بسیار کوچک معمولاً مناسب نیستند. البته سیال‌های درگیر قابل مطالعه را می‌توان در تعداد زیادی از سایر کانی‌ها پیدا کرد. ده کانی اصلی که سیالات درگیر در آن‌ها بیشتر مورد مطالعه قرار می‌گیرند عبارت از کوارتز، فلوریت، هالیت، کلسیت، آپاتیت، دولومیت،

اسفالریت، باریت، توپاز و کاسیتريت است. برای مطالعات میکروتومتری باید از ویفرهای دوبر صیقل یافته مخصوص استفاده شود. برای آماده کردن ویفرهای سیالات درگیر، از روش‌های استاندارد صیقل دادن، مشابه آماده‌سازی کانی‌ها استفاده می‌کنند. ضخامت نهایی ویفر به اندازه و فراوانی سیالات درگیر و شفافیت کانی بستگی دارد. ضخامت ویفرهای دوبر صیقل شده حدود ۱۰۰ میکرون است. البته ضخامت اتفاقی ویفر در حد نهایی که با توجه به شفافیت نسبی آن که بتوان سیال درگیر را مورد مطالعه قرار داد ممکن است بیش از ۵۰ میکرون باشد. نمودار جریان‌ی مراحل آماده‌سازی مقاطع دوبر صیقل در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. برای چسباندن نمونه باید از چسب شفاف که حلال آن در دسترس است استفاده کرد. پس از جدا کردن نمونه از لام باید در حلال مناسب و در صورت نیاز در حمام التراسونیک کاملاً تمیز شود.



شکل ۲-۱۲- نمودار جریان‌ی مراحل آماده‌سازی مقاطع دوبر صیقل (ویفر)

## ۲-۴- ویژگی‌های نمونه‌های مورد نیاز برای تهیه مقاطع و مطالعات میکروسکوپی

دگرسانی‌ها از نشانه‌های کانی‌سازی و از جمله معیارهای اکتشافات مواد معدنی هستند. در موقع نمونه‌برداری باید به این بخش توجه ویژه‌ای شود و از قسمت‌های مختلف زون‌های دگرسانی، نمونه‌برداری انجام گیرد. در نمونه‌برداری‌های سطحی باید با فاصله مناسب از توده‌های آذرین، دایک‌ها، رگه و زون‌های کانی‌سازی نمونه‌برداری شود و تغییرات زون‌های دگرسانی مورد بررسی قرار گیرد. در محل رگه‌ها باید از دو طرف رگه به صورت منظم نمونه‌برداری کرد و آزمایش‌های پتروگرافی را بر روی آن‌ها انجام داد. در حفاری‌ها (گمانه‌ها) باید از سطح به عمق نمونه‌برداری انجام گیرد. از محل تغییرات نظیر تغییرات رنگ، بافت، کانی‌شناسی و نظایر آن باید نمونه‌برداری انجام شود. از محل رگه و رگچه‌های موجود در نمونه‌ها باید مقاطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی تهیه و مطالعه شود. سنگ میزبان ماده معدنی ممکن است سنگ‌های آذرین، رسوبی یا دگرگونی باشند که از طریق تهیه مقاطع نازک و نازک-صیقلی باید مورد مطالعه قرار گیرند و نوع سنگ میزبان به دقت تشخیص داده شود. از بخش‌های کانی‌سازی شده نیز باید مقاطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی تهیه شود و مورد مطالعات میکروسکوپی نوری قرار گیرد و کانی‌های فلزی و غیرفلزی موجود در آن‌ها به دقت شناسایی و ارتباط بین کانی‌های فلزی و غیر فلزی مشخص شود.

برای مطالعات سیالات درگیر نمونه باید دارای کانی‌های شفاف مناسب و کانی مورد مطالعه حتماً باید مرتبط با یکی از فازهای کانی‌سازی باشد. مناسب‌ترین کانی‌ها برای مطالعات سیالات درگیر شامل کانی‌های کوارتز، فلوریت، هالیت، کلسیت، آپاتیت، دولومیت، اسفالریت، باریت، توپاز و کاسیتريت هستند. مطالعات سیالات درگیر در کانی‌های شفاف که هم‌زمان با کانی‌سازی نیستند برای مطالعه شرایط تشکیل کانسار و استفاده به عنوان معیار اکتشافی مناسب نیست و در واقع کانی مورد مطالعه باید در سیستم پاراژنزی حضور و جایگاه آن در توالی پاراژنتیکی قبلاً تعیین شده باشد. در رگه‌هایی که در چندین مرحله تشکیل شده‌اند، باید موقعیت هر نمونه را در کل توالی پاراژنزی مشخص کرد. در حالت ایده‌آل باید چندین نمونه از کانی‌هایی معرف کل توالی پاراژنتیک انتخاب شوند و مورد مطالعه قرار گیرند.

یکی دیگر از کاربردهای مطالعات میکروسکوپی شناسایی، خواص سنجی و تعیین ویژگی‌های کانی‌شناسی بار اولیه به منظور طراحی فلوشیت‌های مقدماتی، پایه، نیمه‌صنعتی و صنعتی و رفتار کانی‌ها در مدارهای فرآوری است. علاوه بر آن در مدارهای فرآوری به منظور کنترل کیفیت کنسانتره، وضعیت باطله و هدر روی کانی‌ها و عناصر با ارزش به بخش باطله، مطالعات میکروسکوپی نوری انجام می‌گیرد. شناسایی سرباره‌های متالورژی و بررسی پتانسیل تولید زهاب‌های اسیدی در معادن و سد باطله با مطالعات میکروسکوپی انجام می‌گیرد.



# فصل ۳

---

---

دستورالعمل مطالعات میکروسکوپی

نوری عبوری و فرم گزارش نویسی





### ۱-۳- آشنایی

به منظور مطالعه کانی‌شناسی از میکروسکوپ نوری مناسب و مقاطع استاندارد استفاده می‌شود. ویژگی‌های میکروسکوپ مناسب برای مطالعات کانی‌شناسی در ادامه آمده است.

### ۲-۳- میکروسکوپ پلاریزان

با این که میکروسکوپ پلاریزان از نظر جزئیات ساختمانی با یک میکروسکوپ معمولی تفاوت دارد، ولی اصول کلی آن‌ها مشابه است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های میکروسکوپ‌ها، بزرگنمایی و قدرت تفکیک آن‌ها است. بزرگنمایی با ترکیب دو عدسی شیئی و چشمی مشخص می‌شود. با عملکرد عدسی‌های شیئی در بخش انتهایی میکروسکوپ یک تصویر روشن و واضح ایجاد می‌شود. عدسی چشمی فقط تصویر را به صورتی که در نتیجه کیفیت عدسی شیئی حاصل می‌شود بزرگ می‌کند.

### ۱-۲-۳- میکروسکوپ پلاریزان عبوری<sup>۱</sup>

این میکروسکوپ برای مطالعه خواص نوری بلورها، شناسایی کانی‌ها، مطالعات پتروگرافی انواع سنگ‌ها، بررسی بافت، تعیین تخلخل و مطالعات فسیل‌شناسی با استفاده از مقاطع نازک استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. اجزای مهم تشکیل دهنده میکروسکوپ پلاریزان شامل پایه و بدنه، منبع نوری، پلاریزور، دیافراگم، عدسی متقارب‌کننده (کندانسور)، پیچ تنظیم سریع و کند، عدسی‌های شیئی، آنالیزور و عدسی چشمی (شکل ۱-۳) است.



شکل ۱-۳- میکروسکوپ پلاریزان عبوری-انعکاسی

### ۲-۲-۳- میکروسکوپ پلاریزان انعکاسی<sup>۱</sup>

از این میکروسکوپ برای مطالعه کانی‌های فلزی، بررسی شکل و اندازه آن‌ها، مراحل و وضعیت تبلور نسبی کانی‌ها، نسبت به یکدیگر استفاده می‌شود. این میکروسکوپ در متالورژی نیز کاربرد دارد. میکروسکوپ‌هایی که اخیراً ساخته می‌شود مجهز به دو سیستم نور عبوری و انعکاسی هستند و قابلیت مطالعات کانی‌های فلزی و غیر فلزی را به صورت هم‌زمان دارند. اجزای این میکروسکوپ مشابه میکروسکوپ نور عبوری است با این تفاوت که منبع نوری در بالا قرار دارد. همچنین عدسی‌ها به نحوی طراحی

<sup>۱</sup> -Transmitted light polarizing microscope

شده‌اند که نور از محل عدسی شیئی به نمونه می‌تابد و انعکاس آن نیز از همان عدسی به عدسی چشمی می‌رسد. مکانیزم این کار بسیار ساده است که معمولاً از یک نیم‌آینه یا نیم‌منشور در داخل لوله میکروسکوپ استفاده می‌شود.

### ۳-۲-۳- استریومیکروسکوپ<sup>۲</sup> یا بینوکولار<sup>۱</sup>

کار این میکروسکوپ صرفاً بزرگنمایی اجسام است. این میکروسکوپ برای بررسی نمونه‌های دستی، قطعات منفصل رسوب یا پلاسما و محصولات خط فرآوری مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲- میکروسکوپ بینوکولار

### ۳-۳- طرز کار میکروسکوپ پلاریزان

مطالعه کانی‌ها با میکروسکوپ پلاریزان به دو روش ارتوسکوپی و کنوسکوپی انجام می‌گیرد.

#### ۳-۳-۱- حالت ارتوسکوپی

در حالت ارتوسکوپی نور به صورت دسته‌های موازی بر مقطع مورد مطالعه می‌تابد. نور معمولی ضمن عبور از عدسی یا صفحه پلاریزور، پلاریزه می‌شود و در مسیر خود از یک دیافراگم عبور می‌کند. نور پلاریزه شده سپس وارد مقطع نازک مورد مطالعه می‌شود. اگر جسم همسانگرد (ایزوتروپ) باشد، تغییری در نور پلاریزه رخ نمی‌دهد. در صورتی که جسم مورد مطالعه ناهمسانگرد (آنیزوتروپ) باشد، نور پلاریزه ضمن عبور از جسم تجزیه خواهد شد. اگر آنالیزور و یک پلاریزور دیگر (که با پلاریزور قبلی زاویه ۹۰ درجه می‌سازد) در مسیر نور باشد، نور بعد از عدسی شیئی وارد آنالیزور می‌شود. جهت نوسان نور در صفحه آنالیزور عمود بر صفحه پلاریزور است. اگر جسم مورد مطالعه همسانگرد باشد، در حالتی که آنالیزور داخل است هیچ گونه نوری بعد از ورقه آنالیزور عبور نخواهد کرد و جسم در تمام موقعیت تاریک خواهد بود. اگر جسم غیرهمسانگرد باشد، در حالتی که آنالیزور داخل است، ضمن چرخاندن صفحه میکروسکوپ، کانی‌ها تاریک و روشن خواهند شد. عدسی شیئی ضمن بزرگ کردن جسم تصویر آن را در محل تارهای رتیکول قرار می‌دهد. خواص نوری که در حالت ارتوسکوپی مطالعه می‌شود،

۱ -Reflected light polarizing microscope

۲ -Stereomicroscope

شامل رنگ، رنگ اینترفرانس، بیرفرنزانس، طولیل شدگی، خاموشی، ضریب شکست و چند رنگی همراه با بررسی رخ و شکستگی‌ها است.

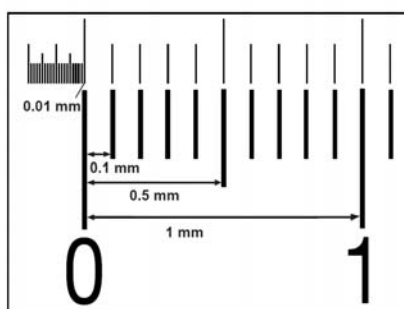
### ۳-۳-۲- حالت کنوسکوپی

حالت کنوسکوپی حالتی است که علاوه بر پلاریزور، عدسی متقارب کننده و آنالیزور نیز در مسیر نور قرار می‌گیرند. از این حالت برای تشخیص وضعیت محوری بلورها، بلورهای یک محوری و دو محوری، تعیین علامت بلوری، اندازه‌گیری زاویه بین محورهای نوری و تعیین جهت برش استفاده می‌شود. در حالت کنوسکوپی باید ترجیحا از عدسی شیئی با بزرگنمایی ۴۰ یا بیشتر و داخل کردن عدسی برتراند استفاده کرد. در مطالعه محورها نیز تنها یک بلور باید در میدان میکروسکوپ قرار گیرد و محور نوری میکروسکوپ کاملا تنظیم باشد.

### ۳-۴- واسنجی میکروسکوپ

در تحقیقات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی، سنجش ابعاد کانی یکی از موارد ضروری است. اندازه این کانی‌ها به قدری کوچک است که معمولا با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نیستند و ابعاد آن‌ها باید به کمک میکروسکوپ پلاریزان سنجیده شود. وسایلی که برای این کار لازم است عبارتند از:

- میکرومتر چشمی: این ریزسنج، صفحه‌ای شیشه‌ای گرد با محوری مدرج است (شکل ۳-۳).
- تیغه ریزسنج: تیغه‌ای است که به صورت استاندارد مدرج شده است.



شکل ۳-۳- استفاده از میکرومتر برای واسنجی میکروسکوپ

سنجش ابعاد کانی‌ها با کمک ریزسنجی که در عدسی چشمی قرار دارد انجام می‌شود. فاصله بین واحدهای مدرج در ریزسنج عدسی چشمی برای عدسی‌های شیئی با بزرگنمایی‌های متفاوت، مختلف است. بنابراین باید نخست اندازه واحدهای تقسیم شده در ریزسنج چشمی با هر یک از عدسی‌های شیئی تعیین شود. مراحل انجام واسنجی به قرار زیر است:

- وارد کردن عدسی چشمی ریزسنجدار به داخل لوله میکروسکوپ
- تنظیم خطوط مدرج آن با چرخاندن پیچ تنظیم

- قرار دادن تیغه ریزسنگ روی صفحه چرخان میکروسکوپ
- تنظیم خطوط مدرج تیغه ریزسنگ با چرخاندن پیچ تنظیم
- منطبق کردن مبدا محورهای دو ریزسنگ بر روی هم
- تعیین مقیاس (عمل تعیین مقیاس باید برای تمام عدسی‌های شیئی به طور مجزا انجام شود).

### ۳-۵- مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک

تشخیص بسیاری از کانی‌ها و سنگ‌ها در نمونه دستی به دلیل ریز بودن آن‌ها امکان‌پذیر نیست. برای بررسی دقیق این گونه نمونه‌ها باید از مقاطع نازک و میکروسکوپ پلاریزان استفاده کرد. مثلا در نمونه‌ای از یک سنگ مانند گرانیت که کانی‌های آن به صورت دانه‌های تیره و روشن، قابل مشاهده‌اند، به کمک چند آزمایش می‌توان کانی‌های تشکیل دهنده آن را تا حدودی تشخیص داد و سرانجام سنگ را شناسایی و نام‌گذاری کرد. ولی این کار را درباره تمام نمونه‌های سنگ‌ها نمی‌توان انجام داد، زیرا کانی‌های سازنده سنگ‌ها غالبا ریزبلورند و با چشم تشخیص داده نمی‌شوند. در یک قطعه بازالت از آنجا که کانی‌های سازنده آن بسیار ریزند و به طور متراکم پهلوی هم قرار گرفته‌اند، به سادگی قابل تشخیص نیستند در یک قطعه سنگ آهک ریز بلور، تشخیص وجود کانی‌های دیگر بسیار مشکل است. برای بررسی دقیق و کامل این گونه سنگ‌ها و به طور کلی تمام سنگ‌ها با میکروسکوپ باید مقطع نازکی از آن‌ها تهیه شود تا نور به راحتی از کانی‌های شفاف مقاطع نازک عبور کند. در مقاطع نازک نه تنها می‌توان انواع کانی‌های هر سنگ را تشخیص داد، بلکه به نظم و آرایش دانه‌ها، شکل آن‌ها، بافت سنگ و سیمانی که دانه‌ها را به هم متصل کرده است و حتی به زمان نسبی تبلور هر کانی پی برد. میکروسکوپ پلاریزان، نه تنها اجزای سنگ‌ها را بزرگتر نشان می‌دهد، بلکه در نتیجه تغییر دادن نور معمولی به نورهای مختلف (نور طبیعی، نور پلاریزه و نور متقارب) بسیاری از خصوصیات کانی‌ها را آشکار می‌سازد. میکروسکوپ‌های نوری معمولا دارای تجهیزات جانبی مثل عدسی‌های شیئی با بزرگنمایی‌های مختلف و دوربین‌های رقومی هستند. در آزمایشگاه‌های پتروگرافی علاوه بر مطالعات پتروگرافی مطالعاتی هم روی نمونه دستی انجام می‌شود که شامل اندازه‌گیری سختی (استفاده از جدول موس) و تست اسید کلریدریک برای شناسایی کربنات‌ها است. رنگ نمونه دستی هم مورد بررسی قرار می‌گیرد و با استفاده از استریومیکروسکوپ در بزرگنمایی‌های مختلف مناسب‌ترین محل برای برش و تهیه مقاطع میکروسکوپی انتخاب می‌شود. معمولا میکروسکوپ‌های پتروگرافی کیفیت بالا قابلیت بزرگنمایی مناسب ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر را دارند. در مطالعات مقاطع نازک باید موارد زیر مورد بررسی قرار گیرد:

- نسبت کانی‌های موجود در سنگ (نوع، درصد نسبی و اندازه هر کانی)

- تعیین بافت سنگ

- تعیین شکل، اندازه و توزیع ابعاد بلورها و اجزای تشکیل دهنده

رده‌بندی‌های متنوعی برای نام‌گذاری سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی بر مبنای مطالعات میکروسکوپی ارائه شده است. در گزارش مطالعه مقاطع میکروسکوپی باید در مرحله نام‌گذاری سنگ‌ها از رده‌بندی مشخصی استفاده شود و نام رده‌بندی مورد استفاده نیز به صورت دقیق ذکر شود. متداول‌ترین رده‌بندی برای نام‌گذاری سنگ‌ها عبارتند از:

- سنگ‌های آذرین: اشتريکایزن<sup>۱</sup>
- سنگ‌های رسوبی:
- سنگ‌های رسوبی تخریبی: فولک<sup>۲</sup> یا پتی‌جان<sup>۳</sup>
- سنگ‌های رسوبی کربناته: فولک یا دانهام<sup>۴</sup>
- سنگ‌های دگرگونی: وینکلر<sup>۵</sup> و BGS<sup>۶</sup>

### ۳-۶- فرم گزارش نویسی مقاطع نازک و نازک-صیقلی

فرم گزارش نویسی مقاطع نازک و نازک صیقلی در جدول ۳-۱ ارائه شده است. مطالعه‌کننده ضمن تکمیل دقیق فرم حداقل دو تصویر میکروسکوپی را نیز باید انتخاب و به همراه گزارش ارسال کند. شکل‌ها باید گویا شوند و نام هر کانی در آن ذکر شده باشد.

جدول ۳-۱- فرم گزارش نویسی مقاطع نازک و نازک-صیقلی

نام آزمایشگاه	
درخواست‌کننده:	کد درخواست‌کننده:
شماره صحرایی نمونه:	شماره آزمایشگاهی نمونه:
موقعیت و محل برداشت نمونه:	تاریخ:
نام پروژه:	هدف از مطالعات:
<p>نامی، شکل، اندازه و تغییرات ثانویه توصیف از نظر مقادیر نیمه کمی، شکل، اندازه و تغییرات ثانویه توصیف از نظر مقادیر نیمه</p> <p>نام کانی‌های اصلی (بیش از ۱۰ درصد):</p> <p>نام کانی‌های فرعی (۲ تا ۱۰ درصد):</p> <p>نام کانی‌های جزئی (کمتر از ۲ درصد)</p> <p>یافت‌های موجود:</p> <p>دگرسانی‌ها:</p> <p>نام رده‌بندی مورد استفاده:</p> <p>نام سنگ:</p> <p>توضیحات:*</p>	

در قسمت توضیحات جدول ۳-۱ باید شکل کانی‌های غیرفلزی و فلزی و اندازه آن‌ها با دقت توصیف و محدوده نسبی ابعاد آن‌ها مشخص شود. ارتباط بین کانی‌های غیر فلزی و فلزی باید با دقت مشخص شود و تقدم و تاخر تشکیل کانی‌ها مورد بررسی قرار گیرد. هر گونه رگه و رگچه در نمونه با دقت بررسی و طول و ضخامت رگه-رگچه‌ها مشخص شود. کانی‌های فلزی موجود در

۱- Streikheisen

۲- Folk

۳- Pettijohn

۴- Dunham

۵- Winkler

۶- British geological survey

رگچه‌ها باید مشخص و نسل‌های مختلف زایشی آن‌ها بررسی شود. نوع ادخال‌های موجود در کانه‌ها و ابعاد آن‌ها باید تعیین شود. درصد نسبی تقریبی کانه‌ها با استفاده از نمودارهای استاندارد در نمونه باید مشخص و به صورت نیمه کمی گزارش شود. نوع دگرسانی‌ها و تغییرات رخ داده در نمونه‌ها باید به نحو مطلوب توصیف شود. توضیحات ارایه شده در متن باید به عکس‌های مناسب که معرف پدیده‌های کلیدی است ارجاع داده شود. فرمول شیمیایی کانی‌ها و علایم اختصاری آن‌ها باید در همه بررسی‌ها ارایه شود. نوع درگیری کانه با باطله و کانه‌ها با یکدیگر باید توصیف و به دقت تعیین شود. حداقل دو تصویر میکروسکوپی به صورت پیوست به همراه گزارش مطالعه باید ارایه شود. این تصاویر میکروسکوپی باید مقیاس خطی داشته باشند و نوع نور مورد مطالعه (عبوری یا انعکاسی) عادی، پلاریزه و متقارب بودن در آن‌ها ذکر شود. برای نمونه‌هایی که مربوط به سنگ میزبان هستند و نوع سنگ از طریق مطالعات میکروسکوپی قابل شناسایی است باید نام سنگ تعیین و دگرسانی‌هایی که در کانی‌های تشکیل دهنده سنگ رخ داده مشخص شود.

# فصل ۴

---

---

مطالعات میکروسکوپی نور انعکاسی (مقاطع

صیقلی و نازک-صیقلی)





## ۴-۱- آشنایی

میکروسکوپی که برای شناسایی و مطالعه کانه‌ها به کار گرفته می‌شود در اصل مشابه همان میکروسکوپی است که در سنگ‌شناسی به کار می‌رود. جز این که در این میکروسکوپ از نور انعکاسی استفاده می‌شود. میکروسکوپ‌های پیشرفته امکان مطالعه هم‌زمان با نور انعکاسی و نور عبوری را دارند. این نوع میکروسکوپ‌ها برای مطالعه نمونه‌های صیقل یافته و مقاطع نازک، به ویژه برای تشخیص کانی‌های اپک و بررسی‌های مربوط به بافت مواد معدنی کاربرد دارند. همچنین برای تعیین پاراژنز و نحوه تشخیص کانه‌ها و کانی‌ها از آن‌ها استفاده می‌کنند.

کانی‌ها از نظر خواص نوری به سه گروه شفاف، نیمه‌شفاف و اپک (کدر) تقسیم می‌شوند. اغلب کانی‌های فلزی نور را از خود عبور نمی‌دهند، بنابراین آن‌ها را نمی‌توان بر اساس روش قانون شکست نور مورد مطالعه و شناسایی قرار داد. کانی‌های فلزی بر اساس قانون انعکاس نور مطالعه می‌شوند. وسیله مطالعه و شناسایی کانی‌های فلزی، میکروسکوپ پلاریزان انعکاسی است. به مجموعه مطالعات در برگرفته شناخت کانی و بررسی بافت کانی‌های فلزی مینرالوگرافی می‌گویند. مطالعات مینرالوگرافی برای دو هدف مهم انجام می‌شود: یکی تحلیل علمی در مورد نحوه و چگونگی تشکیل و شکل‌گیری کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه و دیگری پاسخ‌گویی به خواسته‌ها و نیازهای کانه‌آرایی و تحلیل‌های اقتصادی. در هدف اول نکاتی که مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند عبارت از شناسایی کانی‌ها، مطالعه بافت، تعیین ابعاد و درصد نسبی آن‌ها و تعیین پاراژنز است. در مطالعه با هدف فرآوری مواردی که لازم است بررسی شود عبارت از تشخیص کانی‌های اقتصادی و غیراقتصادی، مطالعه بافت با توجه به اندازه کانی‌ها، شکل، ارتباط و موقعیت و درگیری آن‌ها است. در شکل ۴-۱ فرم گزارش‌نویسی مقاطع صیقلی نشان داده شده است.

در کار با میکروسکوپ انعکاسی به ویژه مطالعه کانه‌های اقتصادی، شناخت و تفسیر رابطه بین کانی‌ها (بافت) به اندازه شناخت خود کانه‌ها حایز اهمیت است. برای مطالعه و شناسایی موارد زیر از بافت کانه‌ها کمک گرفته می‌شود:

- برای نشان دادن ماهیت فرآیندهای موثر در تشکیل اولیه کانسار

- برای نشان دادن تغییر ثانویه نظیر تعادل مجدد، دگرگونی، سخت‌شدگی، فرسایش، اکسیداسیون و سیمانی شدن

نتایج مطالعات میکروسکوپی بافت یک کانسنگ در مراحل خریدایش، نرمایش و پرعیار کردن آن کانسنگ اطلاعاتی را ارائه می‌دهد تا این کار به نحو موثرتری انجام گیرد. برخی از کانه‌ها مثل اکسیدها، سولفیدها و آرسنیدها نسبت به کانه‌های دیگر مانند پیروتیت و سولفیدهای آهن-مس بافت‌های آغازین خود را بهتر حفظ می‌کنند. مابقی کانه‌ها نظیر آژانتیت و فلزات خالص به قدری مستعد هوازدگی هستند که به ندرت بافت آغازین آن‌ها حفظ و مشاهده می‌شود. کانسنگ‌های تک کانی نسبت به کانسنگ‌های چند کانی که دستخوش تغییرات زیادی در بافت می‌شوند، کمتر مستعد هوازدگی هستند. هیچ یک از طرح‌های رده‌بندی بافت‌ها کامل و بی‌عیب نیست و تا به امروز هیچ روش بررسی جامعی ارائه نشده است. بافت‌ها را می‌توان به صورت زون‌بندی، متحدالمرکز، هم‌آهنگ، هم‌رشدی، توده‌ای و پوسته‌ای توصیف کرد که در واقع اشاره به منشا اولیه آن‌ها است و تا حدودی شکل ظاهری یک کانی و کانه یا ترکیبی از آن‌ها را مورد توجه قرار می‌دهد.

توالی پاراژنتیک یا به عبارتی دیگر ترتیب زمانی تبلور کانی‌ها و کانه‌های یک کانسار در واقع مرحله شکل‌گیری آن‌ها است که با مطالعه میکروسکوپی مقاطع صیقلی و نازک-صیقلی قابل بررسی است. معمولاً این توالی، زمان تشکیل تدریجی کانه‌ها و تحت تاثیر قرار گرفتن نهشته‌ها و همچنین شرایط و وضعیتی را که در اثر هر یک از فازها به وجود می‌آید معرفی و عدم تعادل ایجاد شده در

محیط را نیز توصیف می‌کند. در یک توالی پارازنتیک علاوه بر تشخیص نوع و تغییرات کانه‌ها، زمان آغاز ته‌نشست و مدت زمان ته‌نشینی کانی‌های باطله باید مشخص شود. معمولاً توالی پارازنتیک به صورت یک نمودار میله‌ای یا جریانی نمایش داده می‌شود. از آنجا که هر نهشته معدنی منحصر به فرد است بنابراین هیچ روش یکنواخت و استاندارد برای تعیین توالی پارازنتیکی که ترتیب زمانی تبلور کانی‌ها و کانه‌ها را نشان دهد وجود ندارد و این امر به کلی متکی بر نمونه‌های جمع‌آوری شده و تجربه کارشناس است.

#### ۴-۲- معیار شناسایی کانی‌های اپک به کمک میکروسکوپ انعکاسی

به طور کلی معیار شناسایی کانی‌های اپک عبارتند از:

- ۱- خواص نوری
- ۲- خواص سختی
- ۳- خواص ساختاری و مورفولوژیکی

#### ۴-۲-۱- خواص نوری

خواص نوری در نور عادی (PPL)<sup>۴</sup> و نور پلاریزه (+P)<sup>۵</sup> مورد مطالعه قرار می‌گیرد. محیط مطالعه خواص نوری ممکن است در هوا یا روغن باشد که برای هر یک از آن‌ها از عدسی شیئی متفاوتی استفاده می‌شود. در صورتی که حد فاصل بین نمونه و عدسی شیئی تنها محیط هوا باشد از عدسی معمولی<sup>۶</sup> و در صورتی که در حد فاصل بین نمونه و عدسی شیئی از روغن شفاف<sup>۷</sup> (دارای ضریب شکست یکسان با عدسی شیئی) قرار داده شود از عدسی روغن<sup>۸</sup> استفاده می‌کنند. معمولاً از عدسی‌های روغن در بزرگنمایی زیاد ۵۰x و ۱۰۰x استفاده می‌شود. خواص نوری مورد مطالعه در این دو نور کمی متفاوت است و قدرت تفکیک به کمک عدسی روغن افزایش می‌یابد. پس از هر بار استفاده از عدسی روغن باید سطح نمونه و عدسی شیئی کاملاً تمیز شود.

الف- خواص نوری مورد مطالعه در نور عادی عبارتند از:

- رنگ در نور عادی
- قدرت انعکاس
- انعکاس چند رنگی

ب- خواص نوری مورد مطالعه در نور پلاریزه عبارتند از:

- رنگ در نور پلاریزه

---

۱- Optical properties  
 ۲- Hardnes properties  
 ۳- Structural and morphological properties  
 ۴- Plain polarized light  
 ۵- Cross polar  
 ۶- Air- objective  
 ۷- Immersion oil  
 ۸- Oil- objective

- ناهمسانگردی

- انعکاس داخلی

در کتاب‌های مینرالوگرافی جداولی وجود دارد که این خواص را به صورت مقایسه‌ای ارایه کرده‌اند و همچنین طبق فرمت استاندارد، ویژگی‌های کامل هر کانی در یک صفحه به صورت استاندارد در این کتاب‌ها وجود دارد.

#### ۴-۲-۲- خواص سختی

در مطالعات مینرالوگرافی سه نوع سختی مورد مطالعه قرار می‌گیرد که عبارتند از:

- سختی صیقلی

- سختی خراشیدگی

- سختی دستگاهی (ویکرز)

که در بین این سه نوع، سختی صیقلی به صورت نسبی در مطالعات مینرالوگرافی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری این نوع سختی از حاشیه کلب<sup>۱</sup> استفاده می‌شود.

#### ۴-۲-۳- خواص ساختاری و مورفولوژیکی

این خواص عبارتند از:

- شکل

- هبیت<sup>۲</sup> (فرم بلوری غالب)

- کلیواژ

- جداشدگی (پارتینگ)<sup>۳</sup>

- ماکل

#### ۴-۳- فرم گزارش نویسی مقاطع صیقلی

فرم گزارش نویسی مقاطع نازک و نازک-صیقلی در جدول ۴-۱ ارایه شده است. مطالعه‌کننده ضمن تکمیل دقیق فرم، حداقل دو تصویر میکروسکوپی را نیز باید انتخاب و به همراه گزارش ارسال کند. تصویرها باید گویا و نام هر کانی در آن ذکر شده باشد.

موارد زیر باید به نحو مطلوب در قسمت توضیحات جدول ۴-۱ ارایه شوند:

- شکل و ابعاد کانه‌ها

- فراوانی و مقادیر کمی کانه‌ها

- نوع ادخال‌های موجود در کانه‌ها و اندازه آن‌ها

۱- Kelb line

۲- Habit

۳- Parting

- دگرسانی‌های موجود در کانه‌ها

- درگیری و ارتباط کانه با گانگ

جدول ۴-۱- فرم گزارش نویسی مقاطع صیقلی

نام آزمایشگاه	
درخواست‌کننده:	کد درخواست‌کننده:
شماره صحرایی نمونه:	شماره آزمایشگاهی نمونه:
موقعیت و محل برداشت نمونه:	تاریخ:
نام پروژه:	هدف از مطالعات:
توصیف و آرایه مشخصات	
<p>کانه‌های اصلی (بیش از ۱۰ درصد):</p> <p>کانه‌های فرعی (۲ تا ۱۰ درصد):</p> <p>کانه‌های جزئی (کمتر از ۲ درصد):</p> <p>بافت‌های موجود:</p> <p>نوع درگیری‌های بین کانی‌های باطله و کانه‌ها:</p> <p>نوع درگیری‌های بین کانه‌ها:</p> <p>نوع کانسنگ:</p> <p>توضیحات:</p>	
**	

\*\* در این قسمت باید شکل کانه‌ها و اندازه آن‌ها خوب توصیف و محدوده نسبی ابعاد آن‌ها مشخص شود. نوع ادخال‌های موجود در کانه‌ها و اندازه ابعاد آن‌ها مشخص شود. مقدار تقریبی کانه‌ها در نمونه باید به صورت نیمه کمی گزارش شود. نوع دگرسانی‌ها و تغییرات رخ داده در نمونه‌ها باید توصیف شود. توضیحات آرایه شده در متن باید به شکل‌های مناسب ارجاع داده شود. فرمول شیمیایی کانه‌ها و علائم اختصاری آن‌ها باید آرایه شود. نوع درگیری کانه با باطله و کانه‌ها با یکدیگر نیز باید به دقت توصیف شوند.

# فصل ۵

---

---

**دستورالعمل مطالعات میکروسکوپی و**

**میکروترنومتری سیالات درگیر**



## ۵-۱- آشنایی

سیالات درگیر به صورت نقص در ساختار بلورها و حاصل یک سری فرآیندهای پیچیده هستند. در بعضی از بلورها در هنگام تبلور، سیالاتی در فضاهای بین سطوح بلوری آن‌ها به تله می‌افتد که به آن‌ها سیالات درگیر گفته می‌شود. سیال‌های درگیر، بخش جدایی‌ناپذیر از هر کانی هستند و مطالعه آن‌ها به اندازه مطالعه اجزای کانیایی و شیمیایی اصلی سنگ، اهمیت و ارزش دارد. نسبت‌های حجمی این سیالات در مقایسه با حجم کل کانی‌ها بسیار ناچیز است، اما این مساله از اهمیت اطلاعاتی که از طریق مطالعه آن‌ها به دست می‌آیند، نمی‌کاهد. هر بلور طبیعی که از فاز مایع متبلور و رشد کرده باشد دارای سیالات درگیر است. رشد بلورهای کامل حتی در شرایط دقیقاً کنترل شده آزمایشگاهی بسیار مشکل است. طیف نقایص بلور در محدوده‌ای از نقایص کوچک در مقیاس اتمی تا نقایص فاحش در مقیاس بزرگ قرار دارد. اگر به این پدیده‌ها از دیدگاه متخصصان جزو نقایص به شمار می‌روند، ولی برای زمین‌شناسان چنین نقایصی به صورت سیال یا ادخال‌های جامد دیدگاه مناسبی برای درک فرآیند رشد بلورها در طبیعت و شرایط فیزیکوشیمیایی زمان رشد بلور را فراهم کند. فراوانی و گسترش وسیع سیالات درگیر نشان می‌دهد که سیالات در کلیه فرآیندهای تشکیل کانی‌های سنگ اهمیت دارند. سیالات درگیر، قطرات کوچکی هستند که در جریان رشد بلور در آن محبوس شده‌اند. برخی از آن‌ها را در بلورهای شفاف با چشم غیرمسلح و یا عدسی‌های دستی می‌توان به آسانی مشاهده کرد. سیالات درگیر ممکن است نماینده سیالی باشند که با کانی در جریان رشد در حال تعادل بوده است و بنابراین اطلاعاتی از منشأ را ارائه می‌کنند. ابعاد سیالات درگیر، از قطری کمتر از قطر لازم برای دیدن در میکروسکوپ سنگ‌شناسی معمولی تا چند سانتی‌متر تغییر می‌کند. سیالات درگیر بزرگتر از ۵ میکرون در مطالعات میکروترمومتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. اکتشاف بسیاری از کانسارهای مس پورفیری، قلع-تنگستن پورفیری، تیپ دره می‌سی‌سی‌پی، ذخایر اپی‌ترمال در دنیا به کمک اطلاعات سیالات درگیر انجام شده است. با توجه به اینکه در بسیاری از کانی‌های موجود در سنگ‌های آذرین، رسوبی، دگرگونی و حتی شهاب سنگ‌ها نیز سیالات درگیر مشاهده می‌شود استفاده از آن‌ها برای شناخت شرایط حاکم بر محیط‌ها (از نظر دما و شوری)، دگرگونی (از نظر فشار و دما) و آذرین (از نظر ترکیب شیمیایی ماگما، فشار و دمای حاکم بر محیط تشکیل کانی‌ها) توصیه می‌شود.

## ۵-۲- سیالات درگیر

سیالات درگیر در کانی‌ها برای اولین بار در قرن ۱۵ توسط ابوریحان بیرونی توصیف شده است. مطالعات سیالات درگیر در سه مرحله پتروگرافی سیالات درگیر، میکروترمومتری و تعبیر و تفسیر نتایج انجام می‌گیرد. قبل از مطالعات میکروترمومتری باید اطمینان حاصل کرد که سیال درگیر از زمان به دام افتادن تا مطالعه دچار تغییر نشده باشد.

### ۵-۲-۱- انواع سیالات درگیر بر اساس فازها

علیرغم این که سیال به دام افتاده در درون بلورها، در ابتدا به صورت فاز یکنواخت و همگن است ولی به تدریج و با سرد شدن سیال، فازهای مختلفی از آن تشکیل می‌شود. مهم‌ترین فازهای سیال‌های درگیر شامل فاز مایع به صورت آب و دی‌اکسید کربن، فاز جامد شامل کانی‌های مختلف فلزی و غیرفلزی (به ویژه نمک‌ها) و فاز گازی است. بر اساس تعداد فازهای مشاهده شده در دمای اتاق، سیالات درگیر را به انواع زیر تقسیم می‌کنند:

- الف- سیالات درگیر تک فاز مایع (L): این سیالات ساده‌ترین نوع انکلوژیون‌ها هستند و تماما از مایع (معمولا آبگین) پر شده‌اند.
- ب- سیالات درگیر دو فاز غنی از مایع (L+V): فاز مایع در نوع غالب است اما یک حباب بخار کوچک نیز همیشه وجود دارد و کمتر از ۵۰ درصد کل حجم سیال را اشغال می‌کند.
- پ- سیالات درگیر دو فاز غنی از بخار (V+L): در این حالت یک فاز بخار غالب است و بیش از نیمی از حجم سیال را اشغال می‌کند.
- ت- سیالات درگیر تک فاز بخار (V): این گروه، تماما به وسیله یک فاز بخار با چگالی کم (معمولا مخلوطی از  $CH_4$ ،  $H_2O$ ،  $N_2$  و  $CO_2$ ) بدون هیچ فاز مایع مریی پر شده‌اند.
- ث- سیالات درگیر چند فاز جامد و چند جامدی (S+L±V): این دو گروه از نظر داشتن یک یا چند فاز بلورین جامد (کانی‌های نوزاد) به عنوان جزو اصلی در کنار مایع و بخار، به هم شباهت دارند.
- ج- سیالات درگیر مایع نامیخته ( $L_1+L_2±V$ ): این سیالات با حضور دو مایع نامیخته مشخص می‌شوند که یکی آبگین و دیگری غنی از  $CO_2$  است. فاز غنی از  $CO_2$  ممکن است حاوی مقادیر قابل توجهی متان یا نیتروژن باشد. یک حباب بخار غنی از  $CO_2$  نیز ممکن است وجود داشته باشد که به چگالی کل فاز غنی از  $CO_2$  بستگی دارد.
- چ- ادخال‌های شیشه: ادخال‌های به دام افتاده از مذاب سیلیکاتی را ادخال‌های شیشه می‌گویند که در درشت بلورهای (فنوکرست‌های) سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌آتشفشانی فراوان هستند.

## ۵-۲-۲- انواع سیال‌های درگیر بر اساس زمان به دام افتادن

این تقسیم‌بندی جنبه کاربردی دارد و برای انتخاب سیال‌های درگیر مناسب مطالعات میکروترموتری (ریزدماسنجی) بسیار مهم است. در این تقسیم‌بندی، سیال‌های درگیر به سه گروه سیال‌های درگیر اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب تقسیم می‌شوند.

### الف- سیالات درگیر اولیه

این سیال‌ها هم‌زمان با رشد بلور در برگیرنده آن‌ها تشکیل می‌شوند و در اثر رشد شاخه درختی صفحات بلوری، رشد ماریچی، رشد نیمه‌موازی و یا انحلال بخشی از سطوح بلوری در درون این صفحات، به تله می‌افتند. اغلب به صورت پراکنده در متن بلور قرار گرفته‌اند و به صورت سیال‌های درگیر منفرد تشکیل شده‌اند. در مواردی که سطوح رشد بلوری مشخص باشد، سیالات درگیری که در امتداد این سطوح قرار گرفته‌اند نیز از نوع اولیه هستند.

### ب- سیال‌های درگیر ثانویه

این سیال‌ها پس از تبلور کامل بلور در برگیرنده آن‌ها به وجود می‌آیند. یکی از روش‌های تشکیل سیال‌های درگیر ثانویه، محبوس شدن سیال در محل شکستگی‌هایی است که پس از تشکیل کانی در آن به وجود می‌آیند. از سیال‌های درگیر ثانویه معمولا نمی‌توان برای شناخت شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌ساز استفاده کرد ولی برای شناخت پدیده‌های تکتونیکی و مهاجرت سیالات، کاربرد زیادی دارند. این سیالات درگیر در ردیف‌های (صفحاتی) قرار دارند که از مرز بین بلورها عبور می‌کند.



### پ- سیال‌های درگیر ثانویه کاذب

این گروه از سیال‌ها به هنگام تبلور بلور در برگیرنده آن‌ها تشکیل می‌شوند ولی خصوصیتی مشابه با گروه سیال‌های ثانویه دارند. اگر در هنگام رشد بلور، در اثر پدیده‌های مختلف مثل تنش‌های تکتونیکی، بلور ترک بخورد، سیال‌های کانی‌ساز در محل درزه‌ها و ترک‌ها متمرکز می‌شوند و سیال‌های درگیر ثانویه کاذب را به وجود می‌آورند. این شکستگی‌ها معمولاً بر خلاف شکستگی‌های ثانویه در تمام طول بلور گسترده نیستند و یا ممکن است تغییراتی را در طول بلور از خود نشان دهند. ادامه رشد بلور شکستگی مربوط را می‌پوشاند بنابراین شکستگی از نوع ثانویه محسوب نمی‌شود و سیال درگیر هم مشابه نوع اولیه نیست. ردیف این سیالات از مرز بلورها عبور نمی‌کند.

### ۵-۳- کاربرد مطالعات سیالات درگیر

سیالات درگیر در درون اکثر کانی‌هایی وجود دارند که در یک محیط سیال (بخار، مایع و گاز) تشکیل شده‌اند و از آن‌ها می‌توان در شاخه‌های مهمی از علوم از جمله در زمین‌شناسی به صورت گسترده‌ای استفاده کرد. با استفاده از مطالعات سیالات درگیر می‌توان اطلاعات زیادی در مورد دمای تشکیل کانی‌ها، فشار حاکم بر محیط تشکیل آن‌ها، چگالی سیال تشکیل دهنده کانی‌ها و نیز ترکیب شیمیایی سیال‌های کانی‌ساز به دست آورد. موارد اصلی مطالعه سیال‌های درگیر را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

#### ۵-۳-۱- بررسی دیاژنز و ویژگی‌های سیالات در حوضه‌های رسوبی

سیالات در فرآیندهای رسوبی نقش بنیادی دارند. تشکیل و مهاجرت هیدروکربن‌ها و سیالات کانه‌دار طی فشردگی و دیاژنز، عامل تشکیل منابع نفتی جهان و بخش بزرگی از کانسارهای فلزات پایه است.

#### ۵-۳-۲- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی

سیالات درگیر، نوع سیال، وضعیت جریان و ماهیت آن‌ها را که در یک کانی ثبت شده است نشان می‌دهد. بنابراین با مطالعه سیستماتیک آن‌ها می‌توان نواحی‌ای را که در آن‌ها سیالات ویژه (یعنی سیالات کانه‌دار و هیدروکربن) فعال بوده‌اند را مشخص ساخت. یکی از مهم‌ترین کاربردهای سیالات درگیر، بررسی نحوه تشکیل و اکتشاف کانسارهای گرمایی است. با مطالعه سیالات درگیر، امکان شناسایی زون‌های کانی‌سازی شده و زون‌های فاقد کانی‌سازی وجود دارد و از آن‌ها می‌توان به عنوان معیار اکتشافی مواد معدنی مثل ذخایر طلا استفاده کرد.

#### ۵-۳-۳- تکتونیک

با توجه به اهمیت سیالات درگیر در تغییر شکل سنگ‌ها، شکستگی (گسلش) و احتمالاً ایجاد زمین‌لرزه از سیالات درگیر استفاده می‌شود. بنابراین دورنمای وسیعی برای تحقیقات در این زمینه وجود دارد.

#### ۵-۳-۴- جواهرشناسی

از مشاهدات میکروسکوپی ساده می‌توان جواهرات مصنوعی را از انواع طبیعی تشخیص داد. حتی در برخی موارد می‌توان

کانساری را که یک سنگ جواهر خاص از آن مشتق شده است، مشخص کرد.

## ۴-۵- تجهیزات مورد نیاز

تجهیزات مورد نیاز برای مطالعه سیالات درگیر عبارتند از:

- میکروسکوپ نوری با وضوح مناسب و قابلیت بزرگنمایی تا ۱۰۰۰ برابر (شکل ۱-۵)
- صفحه گرم‌کننده و سردکننده<sup>۱</sup> با حداقل بازه دمایی ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد (شکل ۲-۵)
- کنترل‌کننده گرمایش
- کنترل‌کننده سرمایش
- مخزن نیتروژن مایع
- مخزن آب (برای خنک کردن صفحه گرم‌کننده در حرارت‌های بالا)
- عدسی‌های شیئی با فاصله کاری زیاد<sup>۲</sup>



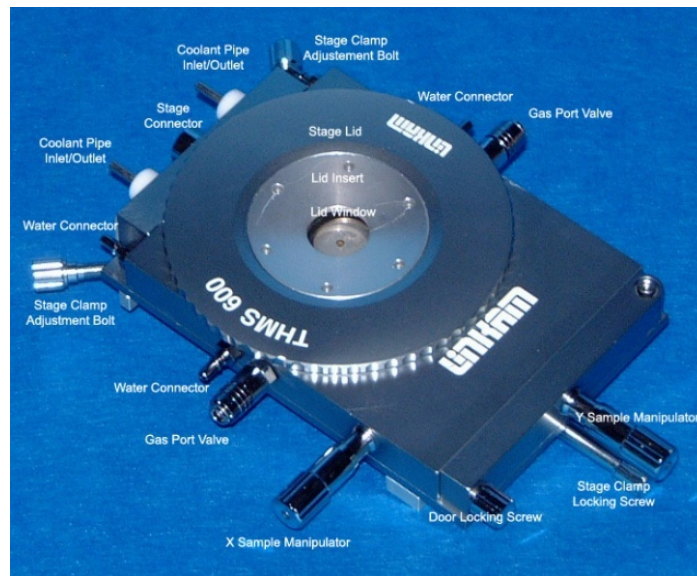
شکل ۱-۵- میکروسکوپ مجهز به صفحه گرم‌کننده و سردکننده

## ۵-۵- نکات ایمنی

نیتروژن مایع، منجمدکننده بسیار ایمن است که تا دمای ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد اجسام را سرد می‌کند، به شرطی که با احتیاط با آن کار شود و در محفظه‌های کاملاً عایق ذخیره شود. در این حالت هدر رفتن آن در اثر تبخیر نیز به حداقل خواهد رسید. نیتروژن، گاز غیرسمی و از نظر شیمیایی بی‌اثر و غیر قابل اشتعال است اما به منظور رعایت ایمنی کامل بهتر است در یک اتاق با تهویه مناسب نگهداری شود. در هنگام پر کردن مخزن نیتروژن دستگاه، باید از وسایل ایمنی مناسب (دستکش، روپوش، ماسک و عینک مناسب) استفاده کرد.

<sup>۱</sup> Heating- freezing stage

<sup>۲</sup> Long working distance (LWD)



شکل ۵-۲- صفحه گرم کننده و سردکننده مدل لینکهام

## ۶-۵- واسنجی (کالیبراسیون) صفحه گرم کننده و سردکننده

واسنجی دقیق، یکی از پیش‌نیازهای مطالعات میکروترمومتری است و باید به عنوان شاخص اندازه‌گیری آزمایشگاهی در نظر گرفته شود. ضرورت واسنجی به این دلیل است که سنسور حرارتی با کمی فاصله از سیالات درگیر قرار دارد و دمای آن ممکن است بالاتر یا پایین‌تر از دمای واقعی باشد (شکل ۵-۳). به علاوه، این اختلاف زمانی، اختلاف دمای کاری استیج و دمای محیط را افزایش می‌دهد و ممکن است باعث عدم اطمینان در نتایج حاصل شود. برای واسنجی از استاندارد استفاده می‌شود. یک ماده زمانی به عنوان استاندارد در واسنجی به کار می‌رود که دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- عاری از ناخالصی باشد.

- قبل از ذوب متحمل هیچ نوع تجزیه حرارتی نشود.

- نقطه ذوب مشخص، واضح و دقیقاً قابل تشخیص داشته باشد.

مراحل انجام واسنجی در شکل ۵-۳ و مواد مورد استفاده در جدول ۵-۱ ارائه شده است.

در انجام واسنجی باید نکات زیر رعایت شود:

- برای به دست آوردن نتایج تکرارپذیر، استانداردهای جامد باید در یک خشک‌کن نگهداری شوند تا جذب رطوبت از اتمسفر به حداقل برسد. به همین ترتیب مایعات نیز باید در بطری‌های با درب محکم، در یک مکان خنک و خشک و به دور از نور مستقیم آفتاب نگهداری شوند.

- مقدار ماده مورد استفاده باید همیشه کمتر از یک میکرولیتر باشد، ماده اضافی را باید دور ریخت و نباید مجدداً به داخل بطری بازگرداند.

- لوله‌های مویینه بهترین روش برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مایعات و لامل‌های شیشه‌ای بهترین روش برای جامدات هستند.

- در حین نزدیک شدن به نقطه ذوب گرمایش باید با آهنگ ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش یابد.
- کنترل منظم ماهانه واسنجی از نظر صفر بودن انحراف و کهنه شدن تدریجی سنسور حرارتی توصیه می‌شود.

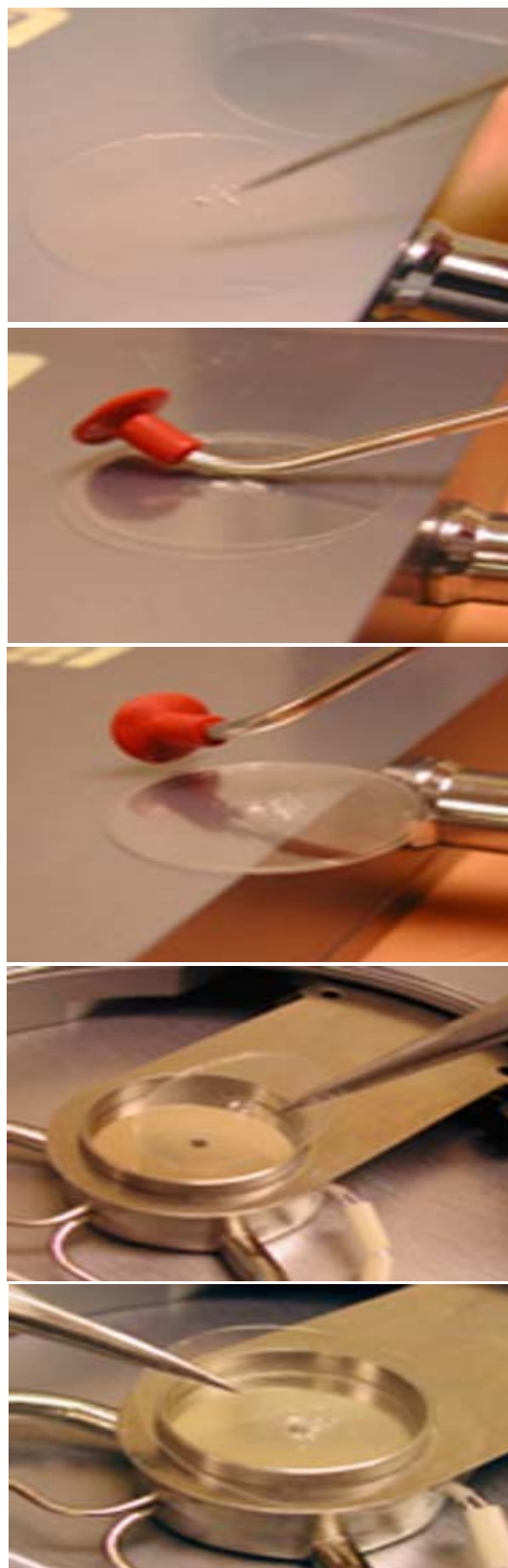
### ۵-۶-۱- مراحل انجام واسنجی (کالیبراسیون)

مراحل واسنجی به شرح زیر است:

- تمیز کردن سطح استیج با الکل
- قرار دادن لامل بر روی استیج
- ریختن مقدار کمی از نمونه استاندارد بر روی لامل کوارتزی با سوزن
- صاف و یکنواخت کردن ماده استاندارد
- قرار دادن لامل در محل قرارگیری نمونه و بستن درب استیل آن
- تمرکز بر روی مقدار کمی از نمونه با به کارگیری اهرم‌های جابه‌جایی در جهت X و Y
- انتخاب آهنگ تغییرات حرارتی معمولاً حدود  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- ثابت نگه داشتن دما به مدت ۱۰ دقیقه
- ادامه فرآیند تغییرات دمایی تا ۰/۲ درجه سانتی‌گراد نقطه ذوب ویژه نمونه و سپس تا ۳ درجه بعد از نقطه ذوب

جدول ۵-۱- مواد استاندارد متداول برای واسنجی دما و نقطه ذوب آن‌ها

نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	مواد
-۹۵/۰۰	هگزان
-۹۰/۶۱	هپتان
-۶۳/۰۰	کلروفرم
-۵۶/۷۹	اوکتان
-۵۶/۶۰	ادخال دی‌اکسید کربن خالص
-۲۹/۷۰	دکان
-۲۲/۹۹	تتراکلرید کربن
۰۰	آب (یخ)
۱۰/۰۰	پنتادکان
۱۸/۱۷	هگزادکان
۹۵/۰۰	بنزیل
۱۲۲/۱۳	اسید بنزوئیک
۱۳۵/۰۰	اوره
۱۹۰/۰۰	سالوفن
۴۴۹/۵۰	تلوریم
۵۰۱/۰۰	کلرید سرب
۶۳۰/۵۰	آنتیمونی



شکل ۵-۳- مراحل انجام واسنجی صفحه گرم کننده و سردکننده

## ۵-۷- پتروگرافی سیالات درگیر

مطالعات پتروگرافی سیالات درگیر به وسیله میکروسکوپ نوری معمولی با بزرگنمایی بالا انجام می‌شود که شامل بررسی شکل سیال، فراوانی سیال، محتویات سیال و نوع کانی‌های دختر<sup>۱</sup> و پدیده‌های ثانویه مثل گردن‌دار شدن<sup>۲</sup> و نشت است. در پتروگرافی سیالات درگیر، مطالعه به صورت سه بعدی انجام می‌گیرد. قبل از حرارت دادن یا سرد کردن ویفرها به وسیله صفحات گرمایش و سرمایش، باید به طور کامل خصوصیات مختلف سیالات درگیر را مطالعه کرد. تشخیص پدیده‌های گردن‌دار شدن و نشت در مطالعه سیالات درگیر اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد، و بدون توجه به آن گزارش‌های مربوط به مطالعات سیالات درگیر اعتبار لازم را نخواهد داشت. تشخیص نشت نسبت به گردن‌دار شدن مشکل‌تر است. کانی‌هایی مثل کلسیت، باریت، ژیبس که دارای کلیواژ کامل‌اند، بیشتر در معرض این پدیده قرار دارند. کانی‌هایی که تحت تنش واقع شده‌اند، تغییر شکل می‌یابند و یا اگر در معرض دمایی بالاتر از دمای تشکیل واقع شوند، پدیده نشت در آن‌ها رخ می‌دهد و برای مطالعات میکروترمومتری قابل استفاده نیستند. از ارتباط بین سیالات درگیر و بلور میزبان برای تشخیص منشا اولیه یا ثانویه بودن آن‌ها استفاده می‌شود.

اندازه اکثر سیالات درگیر معمولاً از ۱۰۰ میکرون کوچکتر است ولی گاه، سیالات درگیر در حد چند میلی‌متر که با چشم غیر مسلح دیده می‌شوند نیز وجود دارد. معمولی‌ترین اندازه سیالات درگیر ۲ تا ۲۰ میکرون است و اطلاعات سیالات درگیر که اندازه آن‌ها کمتر از ۵ میکرون است فاقد اعتبار است.

## ۵-۸- روش میکروترمومتری

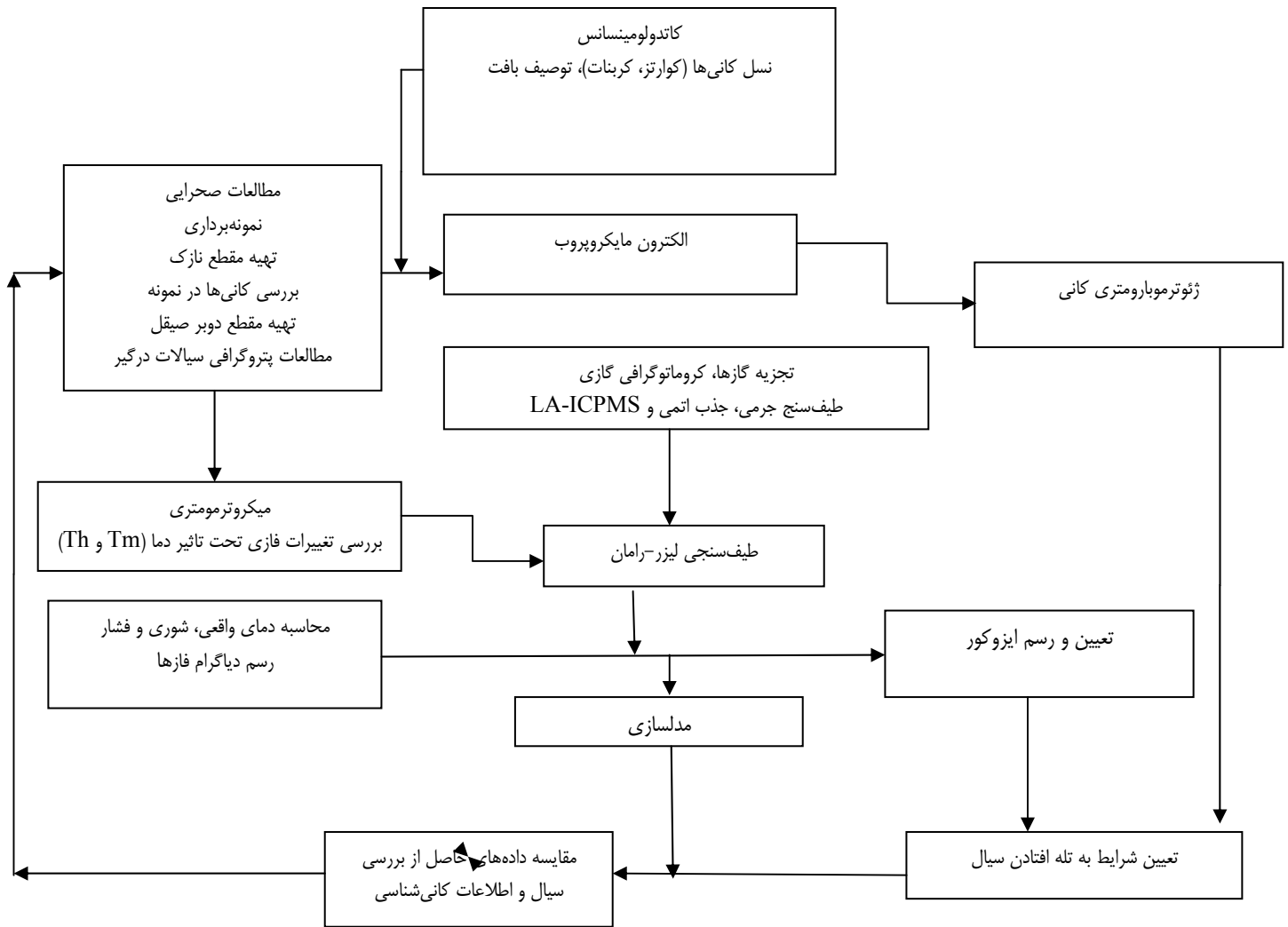
میکروترمومتری بررسی تغییرات فازی در داخل سیالات درگیر در گرم کردن یا سرد کردن آن است. بسته به ترکیب سیال، ممکن است تغییر فاز (جامد، مایع یا بخار) رخ دهد. با اندازه‌گیری دقیق دمایی که این تغییرات در آن رخ می‌دهند، می‌توان با استناد به سیستم‌های ارایه شده بر مبنای مطالعات تجربی (یک، دو یا سه جزئی)، وضعیت فشار، دما، شوری و ترکیبات سیالات را در زمان به دام افتادن تخمین زد. مطالعات میکروترمومتری برای به دست آوردن داده‌هایی در مورد ترکیب، چگالی سیال کانی‌ساز و تعیین دما انجام می‌گیرد. به کمک داده‌های حاصل از تعیین دمای تغییر فازها، میزان شوری و جرم مخصوص ترکیب سیالات که کانی میزبان از آن‌ها نهشته شده است، به دست می‌آید. در شکل ۵-۴ روند کلی مطالعات سیالات درگیر نشان داده شده است.

### ۵-۸-۱- آزمایش گرم کردن

آزمایشات گرم کردن بر مبنای گرم کردن سیال درگیر تا دمایی که کلیه فازها به یک فاز اصلی همگن شوند، انجام گیرد. دمایی را که این پدیده رخ می‌دهد، دمای همگن شدن (Th) می‌نامند و بیانگر حداقل دمای به تله افتادن سیال است. اگر مایع در زمان به تله افتادن در حالت بحرانی باشد، این دما عبارت از دمای حقیقی به تله افتادن سیال خواهد بود. وقتی سیال به تله می‌افتد، هر چه فشار بیشتر شود، اختلاف بین دمای همگن شدن و دمای واقعی به تله افتادن بیشتر خواهد بود. در موارد لزوم، با به کار بردن تصحیح فشار مناسب، می‌توان دمای واقعی به تله افتادن را به کمک محاسبه ایزوکرها تخمین زد.

۱- Daughter mineral

۲- Necking down



شکل ۵-۴- روند کلی مطالعات سیالات درگیر

اگر کانی دختر نظیر هالیت و سیلویت در سیال وجود داشته باشد، میزان شوری مایع را نمی‌توان با پایین آوردن نقطه انجماد اندازه‌گیری کرد و برای تعیین شوری باید دمای انحلال کانی دختر اندازه‌گیری شود. از روی منحنی‌های موجود و استفاده از دمای انحلال کانی دختر، میزان شوری سیال به دست می‌آید (شکل ۵-۵). بنابراین با آزمایشات گرم کردن می‌توان موارد زیر را مشخص کرد:

- حداقل دمای به تله افتادن

- اگر فاز نمک نظیر هالیت و سیلویت وجود داشته باشد میزان شوری سیال

- چگالی کل سیال

در این آزمایش نمونه‌ها را با آهنگ مناسب (حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه) تا حداکثر ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دهند و اندازه‌گیری‌ها با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. میزان شوری سیالاتی که حاوی کانی‌های دختر نظیر هالیت و سیلویت هستند دمای انحلال این کانی‌ها اندازه‌گیری می‌شود. هنگامی که سیال‌های درگیر چند فازی حرارت داده می‌شوند کانی‌های دختر حل می‌شوند و آهنگ حل شدن این کانی‌ها وابسته به حالیت آن‌ها در فاز مایع است.

با افزایش دما حباب شروع به تحرک نوسانی می‌کند و کوچک و کوچکتر می‌شود تا اینکه ناپدید شود. بلور هالیت نیز در آغاز افزایش

حرارت از طرف گوشه‌های مکعبی گرد می‌شود و کم‌کم اندازه بلورها کاهش می‌یابد تا اینکه به طور کامل حل شود. در صورت افزایش بیش از اندازه دما ممکن است سیالات درگیر در اثر فشار بخار شدید و افزایش حجم منفجر شوند، در این صورت سیال درگیر کاملاً سیاه می‌شود و دیگر برای اندازه‌گیری‌های بعدی غیرقابل استفاده خواهد بود. به همین دلیل، باید اول سیالات درگیری را مورد آزمایش قرار داد که دمای همگن شدن آن‌ها پایین است، زیرا در غیر این صورت سیالات درگیر با دمای تشکیل پایین از دست خواهند رفت. در حین عمل گرمایش، دمای انحلال‌هالیت ( $T_{SNaCl}$ ) با توجه به اندازه بلورها متفاوت است و در مواردی که حباب بخار بعد از انحلال بلور نمک ناپدید می‌شود ( $T_{SNaCl} < T_h$ ) دمای همگن شدن حباب، دمای همگن شدن محسوب می‌شود.

### ۵-۸-۲- آزمایش سرد کردن

این آزمایش قبل از آزمایش گرم کردن و برای اندازه‌گیری میزان شوری سیالات درگیر تک فازی و دو فازی انجام می‌شود. با اندازه‌گیری دمای ذوب آخرین قطعه یخ، میزان شوری بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه می‌شود. آزمایش سرمایش تنها برای پی بردن به دمای اوتکتیک ( $T_{FM}$  یا  $T_e$ ) و نمک‌های حل شده در محلول انجام می‌شود. دمای اوتکتیک یا دمای ذوب اولین قطعه یخ با یون‌های حل شده در محلول در ارتباط است. در مورد سیستم  $NaCl-H_2O$ ، دمای اولین ذوب  $20.8^\circ C$  درجه سانتی‌گراد است، بنابراین وقتی یک عضو متشکله سوم در مایع وجود داشته باشد، دمای ذوب بسیار پایین‌تر خواهد بود. در این آزمایش ابتدا سیالات درگیر مورد مطالعه را با نیتروژن مایع تا دمای  $-60^\circ C$  درجه سانتی‌گراد برودت می‌دهند و سپس دستگاه به مدت حدود ۲ دقیقه در این وضعیت تثبیت می‌شود. بعد از آن، با آهنگ مناسب  $10^\circ C$  درجه در دقیقه آزمایش ادامه می‌یابد. در این آزمایش، دمای اوتکتیک اندازه‌گیری می‌شود. به کمک آزمایشات انجماد، نه تنها میزان شوری سیال‌های درگیر رقیق شده را می‌توان تعیین کرد، بلکه ماهیت انواع نمک‌های حل شده در مایع را نیز می‌توان تشخیص داد (جدول ۵-۲). از آن جا که نمک‌های حل شده در یک سیال درگیر موجب افت دمای انجماد می‌شوند، بنابراین کاهش نقطه انجماد مایع پایین‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری میزان شوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طریق آزمایش سرمایش می‌توان حضور گازهایی نظیر  $CO_2$  و  $CH_4$  را شناسایی کرد. بررسی‌های انجماد با اولین تبدیل به انجماد آغاز می‌شود، سپس به تدریج در حالی که در زیر میکروسکوپ یا در مانیتور کنترل می‌شود، سیالات درگیر گرم می‌شوند. به محض این که سیال منجمد شد، ناگهان حباب بخار جمع می‌شود و به صورت یک توده از دانه‌های بلور یخ توسعه پیدا می‌کند. انقباض حجمی بخار در نتیجه بالا رفتن حجم یخ در مقایسه با آب است. سپس سیال به تدریج گرم شده و از حالت انجماد خارج می‌شود. دما آنقدر افزایش می‌یابد تا یخ شروع به ذوب شدن کند. مقدار کمی از مایع ناگهان در اولین دمای ذوب ظاهر می‌شود. دمایی که در آن اولین اجزای یخ ذوب می‌شوند، دمای اوتکتیک است و مقدار آن به وضعیت نمک‌های حل شده در مایع بستگی دارد. اگر در جریان گرم کردن، دما اندکی از دمای اولین ذوب بالاتر رود، مقدار بیشتری از یخ ذوب می‌شود. به تدریج تعداد قطعات یخ کمتر می‌شود تا جایی که فقط چند دانه باقی می‌ماند. دمایی را که طی آن آخرین بلور یخ ذوب می‌شود به دقت اندازه‌گیری می‌کنند. از آنجا که نمک‌های حل شده در سیال درگیر، دما را تا حدی پایین می‌آورند که باعث انجماد آبی که آن‌ها را احاطه کرده است می‌شود، بنابراین پایین آمدن نقطه انجماد مایع تا زیر صفر درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری میزان شوری به کار می‌رود. این مقدار بر حسب درصد وزنی معادل  $NaCl$  اندازه‌گیری می‌شود. برای اطمینان از یخ زدن کامل، معمولاً سیالات درگیر آبدار تا دمای  $-60^\circ C$  و سیالات  $CO_2$  دار تا  $-100^\circ C$  درجه سانتی‌گراد سرد می‌شوند تا از یخ زدن کامل فازها اطمینان حاصل شود. سرد شدن تحت دمای پایین‌تر از دمای اتاق باعث می‌شود سیال درگیر حاوی دی‌اکسید کربن به صورت دو حباب در داخل هم درآید. حباب درونی، بخار دی‌اکسید کربن و حباب بیرونی، مایع دی‌اکسید کربن است.



دی‌اکسیدکربن خالص منجمد شده در دمای ۵۶/۶- درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود و دماهای ذوب پایین‌تر از این نقطه، حضور هیدروکربن‌های دیگر نظیر متان را نشان می‌دهد. مقدار متان را می‌توان از روی نمودارهایی به صورت نیمه‌کمی تخمین زد.

### ۹-۵- سیستم‌های شیمیایی سیالات درگیر

به منظور مطالعه و تجزیه و تحلیل نتایج مطالعات میکروتومتری، کارشناس باید سیستم شیمیایی سیال درگیر را تشخیص دهد و بر مبنای آن نقاط اندازه‌گیری را مشخص کند. علاوه بر آن باید از ویژگی‌های سیستم‌های شیمیایی و نمودارهای فاز آن اطلاع کامل داشته باشد. چهار سیستم بسیار متداول در ادامه ارائه می‌شود.

#### ۹-۵-۱- سیال‌های دو فاز مایع-گاز (L+V)

این سیال‌ها از فاز مایع و حباب گاز تشکیل شده است. در هنگام گرم کردن این سیال‌ها ممکن است سه حالت اتفاق بیفتد که حالت اولی رایج‌تر است.

الف- همگن شدن به فاز مایع (L+V→L)

ب- همگن شدن به فاز گاز (L+V→V)

پ- همگن شدن بحرانی که با محو شدن مرز مایع و گاز اتفاق می‌افتد.

در این نوع سیال‌های درگیر در آزمایش گرمایش دمای همگن شدن (Th) و در آزمایش سرمایش دمای اوتکتیک (Te) و دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T<sub>Mice</sub>) اندازه‌گیری می‌شود. غیر از محلول‌های نمکی ممکن است هیدرات‌های نمکی نیز در هنگام انجماد به بلورهای یخ تبدیل شوند. هیدروهالیت (NaCl.۲H<sub>2</sub>O) شناخته شده‌ترین مثال از این گونه هیدرات‌ها است. نقطه ذوب آخرین بلور یخ هیدرات‌های نمکی با T<sub>MH</sub> نشان داده می‌شود. با مقایسه T<sub>MH</sub>, T<sub>Mice</sub> و T<sub>FM</sub> می‌توان اطلاعات دقیق‌تری در مورد مقدار شوری سیال‌های درگیر به دست آورد.

#### ۹-۵-۲- سیال‌های درگیر سه فاز مایع-جامد-گاز (L+V+S)

این سیال‌ها غیر از فاز مایع و گاز دارای فاز جامد (فاز دختر) نیز هستند. کانی‌هالیت و سیلویت رایج‌ترین فازهای دختر درون سیالات درگیر هستند. در این سیال‌ها در آزمایش گرمایش، دمای همگن شدن، دمای انحلال کامل بلور هالیت (T<sub>SNaCl</sub>) و سیلویت (T<sub>SKCl</sub>) اندازه‌گیری می‌شود و نیازی به آزمایش سرمایش نیست.

#### ۹-۵-۳- سیالات درگیر ناآمیخته (L<sub>1</sub>+L<sub>2</sub>+V)

این سیال‌های درگیر آب و دی‌اکسید کربن دارند و همگن شدن CO<sub>2</sub> مایع به گاز در دمای ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. به دلیل مایع شدن سریع‌تر CO<sub>2</sub> نسبت به بخار آب، همیشه فاز CO<sub>2</sub> مایع در اطراف حباب بخار تشکیل می‌شود و آب مایع، آن را در برمی‌گیرد. در آزمایش گرمایش ابتدا همگن شدن و سپس همگن شدن کامل انجام می‌شود. نقطه ذوب فاز کلتریت<sup>۱</sup>، و ذوب CO<sub>2</sub> جامد

۱- Clathrate

در آزمایش سرمایش تعیین می‌شود. در آزمایش سرمایش کلتريت تشكيل می‌شود و فاز آبگین و غیرآبگین منجمد می‌شوند. کلتريت یک فاز ناپایدار است که به صورت موقتی تشکیل می‌شود و شامل  $\text{CO}_2$  و مقداری آب است. به دلیل ورود آب به فاز کلتريت، برای اندازه‌گیری شوری از نقطه ذوب نهایی یخ نمی‌توان استفاده کرد و شوری بر مبنای نقطه ذوب کلتريت که معمولاً در محدوده ۶- تا ۱۲+ درجه است، محاسبه می‌شود. در آزمایش سرمایش کلتريت (هیدرات گاز،  $\text{CO}_2, 23/4\text{H}_2\text{O}$ ) نیز در دمای ۲۸- درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود. برای آزمایش سرمایش، نمونه تا دمای زیر ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد سرد می‌شود تا فاز  $\text{CO}_2$  و فازهای آبگین موجود در نمونه همه منجمد شوند. در گرم کردن،  $\text{CO}_2$  جامد در دمای ۵۶/۶- درجه سانتی‌گراد ( $\text{T}_{\text{MCO}_2}$ ) کاملاً ذوب شود. در دمایی که آخرین بلور یخ ذوب می‌شود ( $\text{T}_{\text{Mice}}$ ) هنوز بلورهای کلتريت حضور دارند و با افزایش دما تجزیه می‌شوند ( $\text{T}_{\text{Mclath}}$ ) که این مساله همراه با ظهور ناگهانی  $\text{CO}_2$  مایع در اطراف حباب بخار غنی از  $\text{CO}_2$  است. با گرم شدن بیشتر فاز  $\text{CO}_2$  در دمای ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد  $\text{CO}_2$  به حالت مایع همگن می‌شود  $\text{ThCO}_2$  در این سیال‌ها، دمای همگن شدن ( $\text{Th}$ ) دمایی است که  $\text{CO}_2$  مایع و فاز مایع آبگین به صورت کامل همگن می‌شوند.

#### ۵-۹-۴- سیالات غنی از $\text{CO}_2$

سیال‌های درگیر حاوی  $\text{CO}_2$  خالص در دمای ۵۶/۶- ( $\text{T}_{\text{MCO}_2}$ ) درجه سانتی‌گراد ذوب یا منجمد می‌شوند. در صورتی که ترکیبی از  $\text{CO}_2$  و مایعات دیگر مثل آب در درون سیال وجود داشته باشد، نقطه ذوب مایع درون سیال درگیر به طرف صفر میل می‌کند. در صورتی که  $\text{CH}_4$  به صورت مایع در داخل  $\text{CO}_2$  حل شده باشد، درجه ذوب بلورهای یخ تشکیل شده یا درجه انجماد سیال درگیر ۵۶/۶- درجه سانتی‌گراد به طرف ۱۸۵/۵- میل می‌کنند. در دمای ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد  $\text{CO}_2$  مایع به فاز گاز  $\text{CO}_2$  تبدیل می‌شود. برای سیستم  $\text{CO}_2$  دو فازی دو نقطه ذوب  $\text{CO}_2$  جامد و همگن شدن کامل  $\text{CO}_2$  اندازه‌گیری می‌شود.

#### ۵-۱۰- نقاط اندازه‌گیری

در مطالعات میکروترمومتری دمای تغییرات فازهای موجود در سیالات درگیر در طی شرایط سرد و گرم کردن اندازه‌گیری می‌شود. بسته به سیستم شیمیایی، نقاط اندازه‌گیری (تغییر فاز) متفاوت است. نقاط مورد اندازه‌گیری در سیستم‌های مختلف در جدول ۵-۳ ارائه شده است.

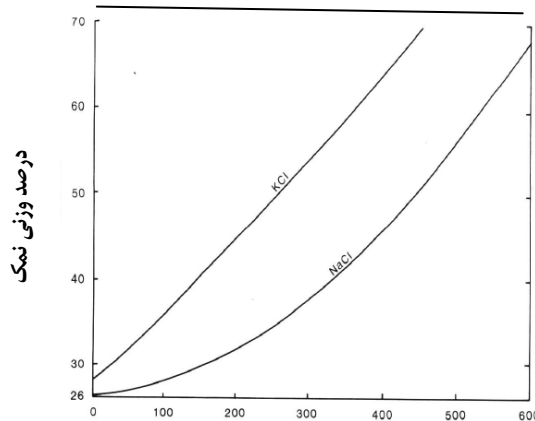
#### ۵-۱۱- ارایه نتایج مطالعات میکروترمومتری

بسته به نوع ذخیره و اهداف مطالعه ارایه نتایج و تعبیر و تفسیر متفاوت است و کارشناسان خبره بسته به نیاز از روش‌های متفاوت استفاده می‌کنند. به منظور ارایه نتایج، استفاده از جدول‌ها و نمودارهایی که در ادامه آمده متداول است. به منظور حصول اطمینان، بین ۱۵ تا ۲۵ سیال درگیر از هر سیستم باید به طور کامل مطالعه شود.

مطالعه کامل شامل نوع سیستم شیمیایی، اندازه‌گیری تغییرات شیمیایی، اندازه‌گیری تغییرات فازی و نوع سیال درگیر از نظر اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب بودن است.

- هیستوگرام دمای ذوب آخرین قطعه یخ

- هیستوگرام درجه همگن شدن
- هیستوگرام شوری محاسبه شده
- نمودار Th در مقابل شوری
- محاسبه و رسم ایزوکرها<sup>۱</sup>



دمای انحلال بر حسب درجه سانتی گراد

شکل ۵-۵- منحنی‌های حالیت NaCl و KCl در محلول‌های همگن برای اندازه‌گیری میزان شوری سیالات درگیر دارای کانی‌های دختر هالیت و سیلیت

جدول ۵-۲- تعیین میزان شوری بر حسب درصد نمک طعام با استفاده از ذوب آخرین قطعه یخ

نقطه ذوب آخرین قطعه یخ (Tmice)	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۰	۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۷۱	۰/۸۸	۱/۰۵	۱/۲۳	۱/۴۰	۱/۵۷
۱	۱/۷۴	۱/۹۱	۲/۰۷	۲/۲۴	۲/۴۱	۲/۵۷	۲/۷۴	۲/۹۰	۳/۰۶	۳/۲۳
۲	۳/۳۹	۳/۵۵	۳/۷۱	۳/۸۷	۴/۰۳	۴/۱۸	۴/۳۴	۴/۴۹	۴/۶۵	۴/۸۰
۳	۴/۹۶	۵/۱۱	۵/۲۶	۵/۴۱	۵/۵۶	۵/۷۱	۵/۸۶	۶/۰۱	۶/۱۶	۶/۳۰
۴	۶/۴۵	۶/۵۹	۶/۷۴	۶/۸۸	۷/۰۲	۷/۱۷	۷/۳۱	۷/۴۵	۷/۵۹	۷/۷۳
۵	۷/۸۶	۸/۰۰	۸/۱۴	۸/۲۸	۸/۴۱	۸/۵۵	۸/۶۸	۸/۸۱	۸/۹۵	۹/۰۸
۶	۹/۲۱	۹/۳۴	۹/۴۷	۹/۶۰	۹/۷۳	۹/۸۶	۹/۹۸	۱۰/۱۱	۱۰/۲۴	۱۰/۳۶
۷	۱۰/۴۹	۱۰/۶۱	۱۰/۷۳	۱۰/۸۶	۱۰/۹۸	۱۱/۱۰	۱۱/۲۲	۱۱/۳۴	۱۱/۴۶	۱۱/۵۸
۸	۱۱/۷۰	۱۱/۸۱	۱۱/۹۳	۱۲/۰۵	۱۲/۱۶	۱۲/۲۸	۱۲/۳۹	۱۲/۵۱	۱۲/۶۲	۱۲/۷۳
۹	۱۲/۸۵	۱۲/۹۶	۱۳/۰۷	۱۳/۱۸	۱۳/۲۹	۱۳/۴۰	۱۳/۵۱	۱۳/۶۲	۱۳/۷۲	۱۳/۸۳
۱۰	۱۳/۹۴	۱۴/۰۴	۱۴/۱۵	۱۴/۲۵	۱۴/۳۶	۱۴/۴۶	۱۴/۵۷	۱۴/۶۷	۱۴/۷۷	۱۴/۸۷
۱۱	۱۴/۹۷	۱۵/۰۷	۱۵/۱۷	۱۵/۲۷	۱۵/۳۷	۱۵/۴۷	۱۵/۵۷	۱۵/۶۷	۱۵/۷۶	۱۵/۸۶
۱۲	۱۵/۹۶	۱۶/۰۵	۱۶/۱۵	۱۶/۲۴	۱۶/۳۴	۱۶/۴۳	۱۶/۵۳	۱۶/۶۲	۱۶/۷۱	۱۶/۸۰
۱۳	۱۶/۸۹	۱۶/۹۹	۱۷/۰۸	۱۷/۱۷	۱۷/۲۶	۱۷/۳۴	۱۷/۴۳	۱۷/۵۲	۱۷/۶۱	۱۷/۷۰
۱۴	۱۷/۷۹	۱۷/۸۷	۱۷/۹۶	۱۸/۰۴	۱۸/۱۳	۱۸/۲۲	۱۸/۳۰	۱۸/۳۸	۱۸/۴۷	۱۸/۵۵

ادامه جدول ۵-۲- تعیین میزان شوری بر حسب درصد نمک طعام با استفاده از ذوب آخرین قطعه یخ

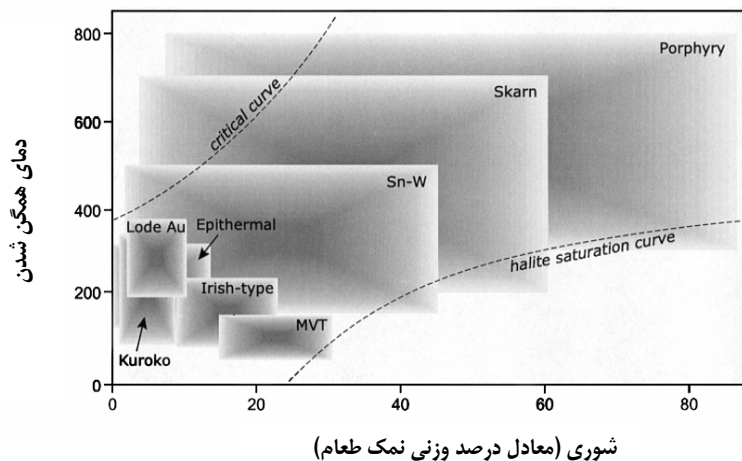
نقطه ذوب آخرین قطعه یخ (T <sub>ice</sub> )	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۱۵	۱۸,۶۳	۱۸,۷۲	۱۸,۸۰	۱۸,۸۸	۱۸,۹۶	۱۹,۰۵	۱۹,۱۳	۱۹,۲۱	۱۹,۲۹	۱۹,۳۷
۱۶	۱۹,۴۵	۱۹,۵۳	۱۹,۶۰	۱۹,۶۸	۱۹,۷۶	۱۹,۸۴	۱۹,۹۲	۱۹,۹۹	۲۰,۰۷	۲۰,۱۵
۱۷	۲۰,۲۲	۲۰,۳۰	۲۰,۳۷	۲۰,۴۵	۲۰,۵۲	۲۰,۶۰	۲۰,۶۷	۲۰,۷۵	۲۰,۸۲	۲۰,۸۹
۱۸	۲۰,۹۷	۲۱,۰۴	۲۱,۱۱	۲۱,۱۹	۲۱,۲۶	۲۱,۳۳	۲۱,۴۰	۲۱,۴۷	۲۱,۵۴	۲۱,۶۱
۱۹	۲۱,۶۸	۲۱,۷۵	۲۱,۸۲	۲۱,۸۹	۲۱,۹۶	۲۲,۰۳	۲۲,۱۰	۲۲,۱۷	۲۲,۲۴	۲۲,۳۱
۲۰	۲۲,۲۸	۲۲,۴۴	۲۲,۵۱	۲۲,۵۸	۲۲,۶۵	۲۲,۷۱	۲۲,۷۸	۲۲,۸۵	۲۲,۹۱	۲۲,۹۸
۲۱	۲۳,۰۵	۲۳,۱۱	۲۳,۱۸							

جدول ۵-۳- پارامترهای قابل اندازه‌گیری در انواع مختلف سیالات درگیر

نقاط اندازه‌گیری فاز	Th	TSS <sub>۲</sub>	TSS <sub>۱</sub>	Th CO <sub>۲</sub>	TMclath	TM ice	TMHH	Te	TMCO <sub>۲</sub>
L+V	√	-	-	-	-	√	±	√	-
L+V+S	√	-	√	-	-	-	-	-	-
L+V+mS	√	√	√	-	-	-	-	-	-
L <sub>۱</sub> +L <sub>۲</sub> +V	√	-	-	√	√	-	-	√	√
L+VCO <sub>۲</sub>	-	-	-	√	-	-	-	-	√

### ۵-۱۲- ارتباط درجه شوری و دمای همگن شدن در تیپ‌های مختلف کانساری

ارتباط درجه شوری و دمای همگن شدن به صورت تقریبی و با برخی همپوشانی‌ها برای تیپ کانسارهای مختلف در شکل ۵-۶ ارائه شده است. در این شکل، هر تیپ کانسار در محدوده‌ای از دما و شوری قرار می‌گیرد و با تعیین شوری و دمای همگن شدن می‌توان نوع کانسار مورد مطالعه را تا حدودی تعیین کرد. نتایج مطالعات سیالات درگیر معمولاً به صورت جدول‌ها و نمودارهای هیستوگرام گزارش می‌شود و تغییرات دمای همگن شدن و شوری سیالات درگیر مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۵-۷). استفاده از مطالعه سیالات درگیر به تنهایی کافی نیست و باید این داده‌ها در کنار سایر داده‌های زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵-۶- ارتباط تقریبی کانسارهای مختلف با دمای همگن شدن و شوری سیالات درگیر

# فصل ۵

---

---

دستورالعمل مطالعات میکروسکوپی و

میکروترنومتری سیالات درگیر



## ۵-۱- آشنایی

سیالات درگیر به صورت نقص در ساختار بلورها و حاصل یک سری فرآیندهای پیچیده هستند. در بعضی از بلورها در هنگام تبلور، سیالاتی در فضاهای بین سطوح بلوری آن‌ها به تله می‌افتد که به آن‌ها سیالات درگیر گفته می‌شود. سیال‌های درگیر، بخش جدایی‌ناپذیر از هر کانی هستند و مطالعه آن‌ها به اندازه مطالعه اجزای کانیایی و شیمیایی اصلی سنگ، اهمیت و ارزش دارد. نسبت‌های حجمی این سیالات در مقایسه با حجم کل کانی‌ها بسیار ناچیز است، اما این مساله از اهمیت اطلاعاتی که از طریق مطالعه آن‌ها به دست می‌آیند، نمی‌کاهد. هر بلور طبیعی که از فاز مایع متبلور و رشد کرده باشد دارای سیالات درگیر است. رشد بلورهای کامل حتی در شرایط دقیقاً کنترل شده آزمایشگاهی بسیار مشکل است. طیف نقایص بلور در محدوده‌ای از نقایص کوچک در مقیاس اتمی تا نقایص فاحش در مقیاس بزرگ قرار دارد. اگر به این پدیده‌ها از دیدگاه متخصصان جزو نقایص به شمار می‌روند، ولی برای زمین‌شناسان چنین نقایصی به صورت سیال یا ادخال‌های جامد دیدگاه مناسبی برای درک فرآیند رشد بلورها در طبیعت و شرایط فیزیکوشیمیایی زمان رشد بلور را فراهم کند. فراوانی و گسترش وسیع سیالات درگیر نشان می‌دهد که سیالات در کلیه فرآیندهای تشکیل کانی‌های سنگ اهمیت دارند. سیالات درگیر، قطرات کوچکی هستند که در جریان رشد بلور در آن محبوس شده‌اند. برخی از آن‌ها را در بلورهای شفاف با چشم غیرمسلح و یا عدسی‌های دستی می‌توان به آسانی مشاهده کرد. سیالات درگیر ممکن است نماینده سیالی باشند که با کانی در جریان رشد در حال تعادل بوده است و بنابراین اطلاعاتی از منشأ را ارائه می‌کنند. ابعاد سیالات درگیر، از قطری کمتر از قطر لازم برای دیدن در میکروسکوپ سنگ‌شناسی معمولی تا چند سانتی‌متر تغییر می‌کند. سیالات درگیر بزرگتر از ۵ میکرون در مطالعات میکروترمومتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. اکتشاف بسیاری از کانسارهای مس پورفیری، قلع-تنگستن پورفیری، تپ دره می‌سی‌سی‌پی، ذخایر اپی‌ترمال در دنیا به کمک اطلاعات سیالات درگیر انجام شده است. با توجه به اینکه در بسیاری از کانی‌های موجود در سنگ‌های آذرین، رسوبی، دگرگونی و حتی شهاب سنگ‌ها نیز سیالات درگیر مشاهده می‌شود استفاده از آن‌ها برای شناخت شرایط حاکم بر محیط‌ها (از نظر دما و شوری)، دگرگونی (از نظر فشار و دما) و آذرین (از نظر ترکیب شیمیایی ماگما، فشار و دمای حاکم بر محیط تشکیل کانی‌ها) توصیه می‌شود.

## ۵-۲- سیالات درگیر

سیالات درگیر در کانی‌ها برای اولین بار در قرن ۱۵ توسط ابوریحان بیرونی توصیف شده است. مطالعات سیالات درگیر در سه مرحله پتروگرافی سیالات درگیر، میکروترمومتری و تعبیر و تفسیر نتایج انجام می‌گیرد. قبل از مطالعات میکروترمومتری باید اطمینان حاصل کرد که سیال درگیر از زمان به دام افتادن تا مطالعه دچار تغییر نشده باشد.

### ۵-۲-۱- انواع سیالات درگیر بر اساس فازها

علیرغم این که سیال به دام افتاده در درون بلورها، در ابتدا به صورت فاز یکنواخت و همگن است ولی به تدریج و با سرد شدن سیال، فازهای مختلفی از آن تشکیل می‌شود. مهم‌ترین فازهای سیال‌های درگیر شامل فاز مایع به صورت آب و دی‌اکسید کربن، فاز جامد شامل کانی‌های مختلف فلزی و غیرفلزی (به ویژه نمک‌ها) و فاز گازی است. بر اساس تعداد فازهای مشاهده شده در دمای اتاق، سیالات درگیر را به انواع زیر تقسیم می‌کنند:

- الف- سیالات درگیر تک فاز مایع (L): این سیالات ساده‌ترین نوع انکلوژیون‌ها هستند و تماما از مایع (معمولا آبگین) پر شده‌اند.
- ب- سیالات درگیر دو فاز غنی از مایع (L+V): فاز مایع در نوع غالب است اما یک حباب بخار کوچک نیز همیشه وجود دارد و کمتر از ۵۰ درصد کل حجم سیال را اشغال می‌کند.
- پ- سیالات درگیر دو فاز غنی از بخار (V+L): در این حالت یک فاز بخار غالب است و بیش از نیمی از حجم سیال را اشغال می‌کند.
- ت- سیالات درگیر تک فاز بخار (V): این گروه، تماما به وسیله یک فاز بخار با چگالی کم (معمولا مخلوطی از  $CH_4$ ،  $H_2O$ ،  $N_2$  و  $CO_2$ ) بدون هیچ فاز مایع مریی پر شده‌اند.
- ث- سیالات درگیر چند فاز جامد و چند جامدی (S+L±V): این دو گروه از نظر داشتن یک یا چند فاز بلورین جامد (کانی‌های نوزاد) به عنوان جزو اصلی در کنار مایع و بخار، به هم شباهت دارند.
- ج- سیالات درگیر مایع نامیخته ( $L_1+L_2±V$ ): این سیالات با حضور دو مایع نامیخته مشخص می‌شوند که یکی آبگین و دیگری غنی از  $CO_2$  است. فاز غنی از  $CO_2$  ممکن است حاوی مقادیر قابل توجهی متان یا نیتروژن باشد. یک حباب بخار غنی از  $CO_2$  نیز ممکن است وجود داشته باشد که به چگالی کل فاز غنی از  $CO_2$  بستگی دارد.
- چ- ادخال‌های شیشه: ادخال‌های به دام افتاده از مذاب سیلیکاتی را ادخال‌های شیشه می‌گویند که در درشت بلورهای (فنوکرست‌های) سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌آتشفشانی فراوان هستند.

## ۵-۲-۲- انواع سیال‌های درگیر بر اساس زمان به دام افتادن

این تقسیم‌بندی جنبه کاربردی دارد و برای انتخاب سیال‌های درگیر مناسب مطالعات میکروترموتری (ریزدماسنجی) بسیار مهم است. در این تقسیم‌بندی، سیال‌های درگیر به سه گروه سیال‌های درگیر اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب تقسیم می‌شوند.

### الف- سیالات درگیر اولیه

این سیال‌ها هم‌زمان با رشد بلور در برگیرنده آن‌ها تشکیل می‌شوند و در اثر رشد شاخه درختی صفحات بلوری، رشد ماریچی، رشد نیمه‌موازی و یا انحلال بخشی از سطوح بلوری در درون این صفحات، به تله می‌افتند. اغلب به صورت پراکنده در متن بلور قرار گرفته‌اند و به صورت سیال‌های درگیر منفرد تشکیل شده‌اند. در مواردی که سطوح رشد بلوری مشخص باشد، سیالات درگیری که در امتداد این سطوح قرار گرفته‌اند نیز از نوع اولیه هستند.

### ب- سیال‌های درگیر ثانویه

این سیال‌ها پس از تبلور کامل بلور در برگیرنده آن‌ها به وجود می‌آیند. یکی از روش‌های تشکیل سیال‌های درگیر ثانویه، محبوس شدن سیال در محل شکستگی‌هایی است که پس از تشکیل کانی در آن به وجود می‌آیند. از سیال‌های درگیر ثانویه معمولا نمی‌توان برای شناخت شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌ساز استفاده کرد ولی برای شناخت پدیده‌های تکتونیکی و مهاجرت سیالات، کاربرد زیادی دارند. این سیالات درگیر در ردیف‌های (صفحاتی) قرار دارند که از مرز بین بلورها عبور می‌کند.



**پ- سیال‌های درگیر ثانویه کاذب**

این گروه از سیال‌ها به هنگام تبلور بلور در برگیرنده آن‌ها تشکیل می‌شوند ولی خصوصیتی مشابه با گروه سیال‌های ثانویه دارند. اگر در هنگام رشد بلور، در اثر پدیده‌های مختلف مثل تنش‌های تکتونیکی، بلور ترک بخورد، سیال‌های کانی‌ساز در محل درزه‌ها و ترک‌ها متمرکز می‌شوند و سیال‌های درگیر ثانویه کاذب را به وجود می‌آورند. این شکستگی‌ها معمولاً بر خلاف شکستگی‌های ثانویه در تمام طول بلور گسترده نیستند و یا ممکن است تغییراتی را در طول بلور از خود نشان دهند. ادامه رشد بلور شکستگی مربوط را می‌پوشاند بنابراین شکستگی از نوع ثانویه محسوب نمی‌شود و سیال درگیر هم مشابه نوع اولیه نیست. ردیف این سیالات از مرز بلورها عبور نمی‌کند.

**۵-۳- کاربرد مطالعات سیالات درگیر**

سیالات درگیر در درون اکثر کانی‌هایی وجود دارند که در یک محیط سیال (بخار، مایع و گاز) تشکیل شده‌اند و از آن‌ها می‌توان در شاخه‌های مهمی از علوم از جمله در زمین‌شناسی به صورت گسترده‌ای استفاده کرد. با استفاده از مطالعات سیالات درگیر می‌توان اطلاعات زیادی در مورد دمای تشکیل کانی‌ها، فشار حاکم بر محیط تشکیل آن‌ها، چگالی سیال تشکیل دهنده کانی‌ها و نیز ترکیب شیمیایی سیال‌های کانی‌ساز به دست آورد. موارد اصلی مطالعه سیال‌های درگیر را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

**۵-۳-۱- بررسی دیاژنز و ویژگی‌های سیالات در حوضه‌های رسوبی**

سیالات در فرآیندهای رسوبی نقش بنیادی دارند. تشکیل و مهاجرت هیدروکربن‌ها و سیالات کانه‌دار طی فشردگی و دیاژنز، عامل تشکیل منابع نفتی جهان و بخش بزرگی از کانسارهای فلزات پایه است.

**۵-۳-۲- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی**

سیالات درگیر، نوع سیال، وضعیت جریان و ماهیت آن‌ها را که در یک کانی ثبت شده است نشان می‌دهد. بنابراین با مطالعه سیستماتیک آن‌ها می‌توان نواحی‌ای را که در آن‌ها سیالات ویژه (یعنی سیالات کانه‌دار و هیدروکربن) فعال بوده‌اند را مشخص ساخت. یکی از مهم‌ترین کاربردهای سیالات درگیر، بررسی نحوه تشکیل و اکتشاف کانسارهای گرمایی است. با مطالعه سیالات درگیر، امکان شناسایی زون‌های کانی‌سازی شده و زون‌های فاقد کانی‌سازی وجود دارد و از آن‌ها می‌توان به عنوان معیار اکتشافی مواد معدنی مثل ذخایر طلا استفاده کرد.

**۵-۳-۳- تکتونیک**

با توجه به اهمیت سیالات درگیر در تغییر شکل سنگ‌ها، شکستگی (گسلش) و احتمالاً ایجاد زمین‌لرزه از سیالات درگیر استفاده می‌شود. بنابراین دورنمای وسیعی برای تحقیقات در این زمینه وجود دارد.

**۵-۳-۴- جواهرشناسی**

از مشاهدات میکروسکوپی ساده می‌توان جواهرات مصنوعی را از انواع طبیعی تشخیص داد. حتی در برخی موارد می‌توان

کانساری را که یک سنگ جواهر خاص از آن مشتق شده است، مشخص کرد.

## ۴-۵- تجهیزات مورد نیاز

تجهیزات مورد نیاز برای مطالعه سیالات درگیر عبارتند از:

- میکروسکوپ نوری با وضوح مناسب و قابلیت بزرگنمایی تا ۱۰۰۰ برابر (شکل ۱-۵)
- صفحه گرم‌کننده و سردکننده<sup>۱</sup> با حداقل بازه دمایی ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد (شکل ۲-۵)
- کنترل‌کننده گرمایش
- کنترل‌کننده سرمایش
- مخزن نیتروژن مایع
- مخزن آب (برای خنک کردن صفحه گرم‌کننده در حرارت‌های بالا)
- عدسی‌های شیئی با فاصله کاری زیاد<sup>۲</sup>



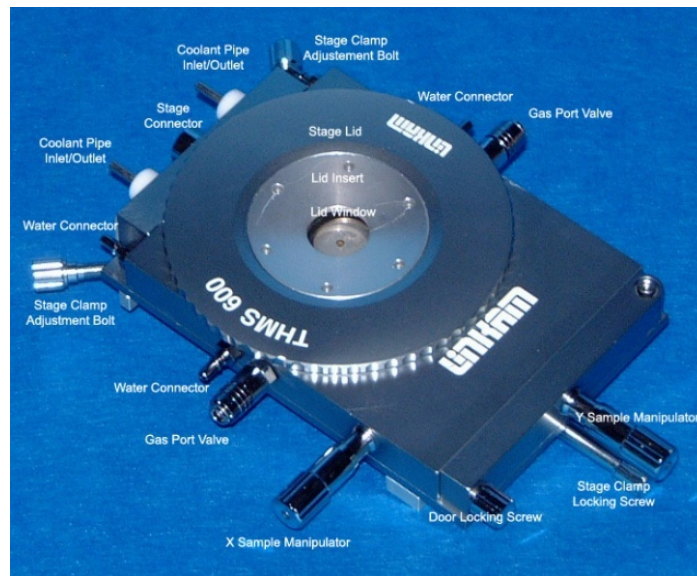
شکل ۱-۵- میکروسکوپ مجهز به صفحه گرم‌کننده و سردکننده

## ۵-۵- نکات ایمنی

نیتروژن مایع، منجمدکننده بسیار ایمن است که تا دمای ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد اجسام را سرد می‌کند، به شرطی که با احتیاط با آن کار شود و در محفظه‌های کاملاً عایق ذخیره شود. در این حالت هدر رفتن آن در اثر تبخیر نیز به حداقل خواهد رسید. نیتروژن، گاز غیرسمی و از نظر شیمیایی بی‌اثر و غیر قابل اشتعال است اما به منظور رعایت ایمنی کامل بهتر است در یک اتاق با تهویه مناسب نگهداری شود. در هنگام پر کردن مخزن نیتروژن دستگاه، باید از وسایل ایمنی مناسب (دستکش، روپوش، ماسک و عینک مناسب) استفاده کرد.

<sup>۱</sup> Heating- freezing stage

<sup>۲</sup> Long working distance (LWD)



شکل ۵-۲- صفحه گرم کننده و سردکننده مدل لینکهام

## ۶-۵- واسنجی (کالیبراسیون) صفحه گرم کننده و سردکننده

واسنجی دقیق، یکی از پیش‌نیازهای مطالعات میکروترمومتری است و باید به عنوان شاخص اندازه‌گیری آزمایشگاهی در نظر گرفته شود. ضرورت واسنجی به این دلیل است که سنسور حرارتی با کمی فاصله از سیالات درگیر قرار دارد و دمای آن ممکن است بالاتر یا پایین‌تر از دمای واقعی باشد (شکل ۵-۳). به علاوه، این اختلاف زمانی، اختلاف دمای کاری استیج و دمای محیط را افزایش می‌دهد و ممکن است باعث عدم اطمینان در نتایج حاصل شود. برای واسنجی از استاندارد استفاده می‌شود. یک ماده زمانی به عنوان استاندارد در واسنجی به کار می‌رود که دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- عاری از ناخالصی باشد.

- قبل از ذوب متحمل هیچ نوع تجزیه حرارتی نشود.

- نقطه ذوب مشخص، واضح و دقیقاً قابل تشخیص داشته باشد.

مراحل انجام واسنجی در شکل ۵-۳ و مواد مورد استفاده در جدول ۵-۱ ارائه شده است.

در انجام واسنجی باید نکات زیر رعایت شود:

- برای به دست آوردن نتایج تکرارپذیر، استانداردهای جامد باید در یک خشک‌کن نگهداری شوند تا جذب رطوبت از اتمسفر به حداقل برسد. به همین ترتیب مایعات نیز باید در بطری‌های با درب محکم، در یک مکان خنک و خشک و به دور از نور مستقیم آفتاب نگهداری شوند.

- مقدار ماده مورد استفاده باید همیشه کمتر از یک میکرولیتر باشد، ماده اضافی را باید دور ریخت و نباید مجدداً به داخل بطری بازگرداند.

- لوله‌های مویینه بهترین روش برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مایعات و لامل‌های شیشه‌ای بهترین روش برای جامدات هستند.

- در حین نزدیک شدن به نقطه ذوب گرمایش باید با آهنگ ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش یابد.
- کنترل منظم ماهانه واسنجی از نظر صفر بودن انحراف و کهنه شدن تدریجی سنسور حرارتی توصیه می‌شود.

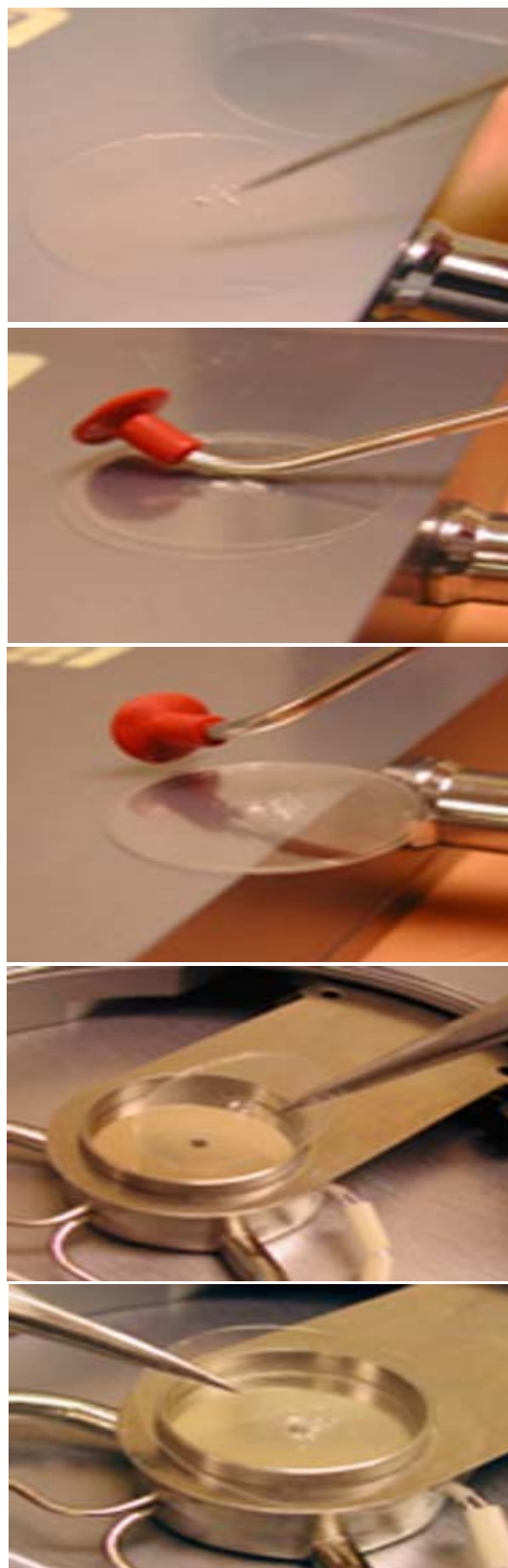
### ۵-۶-۱- مراحل انجام واسنجی (کالیبراسیون)

مراحل واسنجی به شرح زیر است:

- تمیز کردن سطح استیج با الکل
- قرار دادن لامل بر روی استیج
- ریختن مقدار کمی از نمونه استاندارد بر روی لامل کوارتزی با سوزن
- صاف و یکنواخت کردن ماده استاندارد
- قرار دادن لامل در محل قرارگیری نمونه و بستن درب استیل آن
- تمرکز بر روی مقدار کمی از نمونه با به کارگیری اهرم‌های جابه‌جایی در جهت X و Y
- انتخاب آهنگ تغییرات حرارتی معمولاً حدود  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- ثابت نگه داشتن دما به مدت ۱۰ دقیقه
- ادامه فرآیند تغییرات دمایی تا ۰/۲ درجه سانتی‌گراد نقطه ذوب ویژه نمونه و سپس تا ۳ درجه بعد از نقطه ذوب

جدول ۵-۱- مواد استاندارد متداول برای واسنجی دما و نقطه ذوب آن‌ها

نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	مواد
-۹۵/۰۰	هگزان
-۹۰/۶۱	هپتان
-۶۳/۰۰	کلروفرم
-۵۶/۷۹	اوکتان
-۵۶/۶۰	ادخال دی‌اکسید کربن خالص
-۲۹/۷۰	دکان
-۲۲/۹۹	تتراکلرید کربن
۰۰	آب (یخ)
۱۰/۰۰	پنتادکان
۱۸/۱۷	هگزادکان
۹۵/۰۰	بنزیل
۱۲۲/۱۳	اسید بنزوئیک
۱۳۵/۰۰	اوره
۱۹۰/۰۰	سالوفن
۴۴۹/۵۰	تلوریم
۵۰۱/۰۰	کلرید سرب
۶۳۰/۵۰	آنتیمونی



شکل ۵-۳- مراحل انجام واسنجی صفحه گرم کننده و سردکننده

## ۵-۷- پتروگرافی سیالات درگیر

مطالعات پتروگرافی سیالات درگیر به وسیله میکروسکوپ نوری معمولی با بزرگنمایی بالا انجام می‌شود که شامل بررسی شکل سیال، فراوانی سیال، محتویات سیال و نوع کانی‌های دختر<sup>۱</sup> و پدیده‌های ثانویه مثل گردن‌دار شدن<sup>۲</sup> و نشت است. در پتروگرافی سیالات درگیر، مطالعه به صورت سه بعدی انجام می‌گیرد. قبل از حرارت دادن یا سرد کردن ویفرها به وسیله صفحات گرمایش و سرمایش، باید به طور کامل خصوصیات مختلف سیالات درگیر را مطالعه کرد. تشخیص پدیده‌های گردن‌دار شدن و نشت در مطالعه سیالات درگیر اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد، و بدون توجه به آن گزارش‌های مربوط به مطالعات سیالات درگیر اعتبار لازم را نخواهد داشت. تشخیص نشت نسبت به گردن‌دار شدن مشکل‌تر است. کانی‌هایی مثل کلسیت، باریت، ژیبس که دارای کلیواژ کامل‌اند، بیشتر در معرض این پدیده قرار دارند. کانی‌هایی که تحت تنش واقع شده‌اند، تغییر شکل می‌یابند و یا اگر در معرض دمایی بالاتر از دمای تشکیل واقع شوند، پدیده نشت در آن‌ها رخ می‌دهد و برای مطالعات میکروترمومتری قابل استفاده نیستند. از ارتباط بین سیالات درگیر و بلور میزبان برای تشخیص منشا اولیه یا ثانویه بودن آن‌ها استفاده می‌شود.

اندازه اکثر سیالات درگیر معمولاً از ۱۰۰ میکرون کوچکتر است ولی گاه، سیالات درگیر در حد چند میلی‌متر که با چشم غیر مسلح دیده می‌شوند نیز وجود دارد. معمولی‌ترین اندازه سیالات درگیر ۲ تا ۲۰ میکرون است و اطلاعات سیالات درگیر که اندازه آن‌ها کمتر از ۵ میکرون است فاقد اعتبار است.

## ۵-۸- روش میکروترمومتری

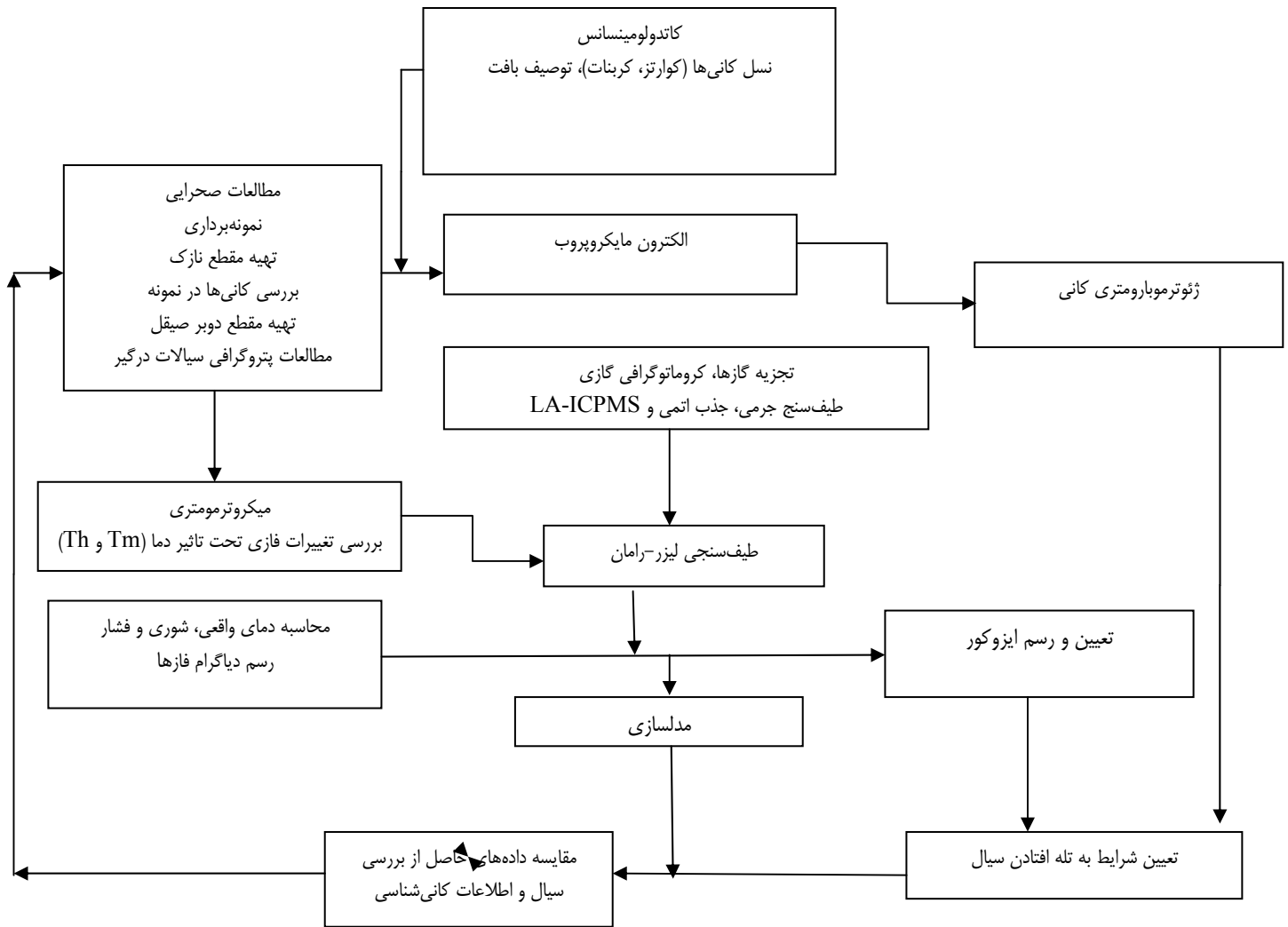
میکروترمومتری بررسی تغییرات فازی در داخل سیالات درگیر در گرم کردن یا سرد کردن آن است. بسته به ترکیب سیال، ممکن است تغییر فاز (جامد، مایع یا بخار) رخ دهد. با اندازه‌گیری دقیق دمایی که این تغییرات در آن رخ می‌دهند، می‌توان با استناد به سیستم‌های ارایه شده بر مبنای مطالعات تجربی (یک، دو یا سه جزئی)، وضعیت فشار، دما، شوری و ترکیبات سیالات را در زمان به دام افتادن تخمین زد. مطالعات میکروترمومتری برای به دست آوردن داده‌هایی در مورد ترکیب، چگالی سیال کانی‌ساز و تعیین دما انجام می‌گیرد. به کمک داده‌های حاصل از تعیین دمای تغییر فازها، میزان شوری و جرم مخصوص ترکیب سیالات که کانی میزبان از آن‌ها نهشته شده است، به دست می‌آید. در شکل ۵-۴ روند کلی مطالعات سیالات درگیر نشان داده شده است.

### ۵-۸-۱- آزمایش گرم کردن

آزمایشات گرم کردن بر مبنای گرم کردن سیال درگیر تا دمایی که کلیه فازها به یک فاز اصلی همگن شوند، انجام گیرد. دمایی را که این پدیده رخ می‌دهد، دمای همگن شدن (Th) می‌نامند و بیانگر حداقل دمای به تله افتادن سیال است. اگر مایع در زمان به تله افتادن در حالت بحرانی باشد، این دما عبارت از دمای حقیقی به تله افتادن سیال خواهد بود. وقتی سیال به تله می‌افتد، هر چه فشار بیشتر شود، اختلاف بین دمای همگن شدن و دمای واقعی به تله افتادن بیشتر خواهد بود. در موارد لزوم، با به کار بردن تصحیح فشار مناسب، می‌توان دمای واقعی به تله افتادن را به کمک محاسبه ایزوکرها تخمین زد.

۱- Daughter mineral

۲- Necking down



شکل ۵-۴- روند کلی مطالعات سیالات درگیر

اگر کانی دختر نظیر هالیت و سیلویت در سیال وجود داشته باشد، میزان شوری مایع را نمی‌توان با پایین آوردن نقطه انجماد اندازه‌گیری کرد و برای تعیین شوری باید دمای انحلال کانی دختر اندازه‌گیری شود. از روی منحنی‌های موجود و استفاده از دمای انحلال کانی دختر، میزان شوری سیال به دست می‌آید (شکل ۵-۵). بنابراین با آزمایشات گرم کردن می‌توان موارد زیر را مشخص کرد:

- حداقل دمای به تله افتادن

- اگر فاز نمک نظیر هالیت و سیلویت وجود داشته باشد میزان شوری سیال

- چگالی کل سیال

در این آزمایش نمونه‌ها را با آهنگ مناسب (حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه) تا حداکثر ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دهند و اندازه‌گیری‌ها با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. میزان شوری سیالاتی که حاوی کانی‌های دختر نظیر هالیت و سیلویت هستند دمای انحلال این کانی‌ها اندازه‌گیری می‌شود. هنگامی که سیال‌های درگیر چند فازی حرارت داده می‌شوند کانی‌های دختر حل می‌شوند و آهنگ حل شدن این کانی‌ها وابسته به حالیت آن‌ها در فاز مایع است.

با افزایش دما حباب شروع به تحرک نوسانی می‌کند و کوچک و کوچکتر می‌شود تا اینکه ناپدید شود. بلور هالیت نیز در آغاز افزایش

حرارت از طرف گوشه‌های مکعبی گرد می‌شود و کم‌کم اندازه بلورها کاهش می‌یابد تا اینکه به طور کامل حل شود. در صورت افزایش بیش از اندازه دما ممکن است سیالات درگیر در اثر فشار بخار شدید و افزایش حجم منفجر شوند، در این صورت سیال درگیر کاملاً سیاه می‌شود و دیگر برای اندازه‌گیری‌های بعدی غیرقابل استفاده خواهد بود. به همین دلیل، باید اول سیالات درگیری را مورد آزمایش قرار داد که دمای همگن شدن آن‌ها پایین است، زیرا در غیر این صورت سیالات درگیر با دمای تشکیل پایین از دست خواهند رفت. در حین عمل گرمایش، دمای انحلال‌هالیت ( $T_{SNaCl}$ ) با توجه به اندازه بلورها متفاوت است و در مواردی که حباب بخار بعد از انحلال بلور نمک ناپدید می‌شود ( $T_{SNaCl} < T_h$ ) دمای همگن شدن حباب، دمای همگن شدن محسوب می‌شود.

### ۵-۸-۲- آزمایش سرد کردن

این آزمایش قبل از آزمایش گرم کردن و برای اندازه‌گیری میزان شوری سیالات درگیر تک فازی و دو فازی انجام می‌شود. با اندازه‌گیری دمای ذوب آخرین قطعه یخ، میزان شوری بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه می‌شود. آزمایش سرمایش تنها برای پی بردن به دمای اوتکتیک ( $T_{FM}$  یا  $T_e$ ) و نمک‌های حل شده در محلول انجام می‌شود. دمای اوتکتیک یا دمای ذوب اولین قطعه یخ با یون‌های حل شده در محلول در ارتباط است. در مورد سیستم  $NaCl-H_2O$ ، دمای اولین ذوب  $20/8-^{\circ}C$  درجه سانتی‌گراد است، بنابراین وقتی یک عضو متشکله سوم در مایع وجود داشته باشد، دمای ذوب بسیار پایین‌تر خواهد بود. در این آزمایش ابتدا سیالات درگیر مورد مطالعه را با نیتروژن مایع تا دمای  $60-$  درجه سانتی‌گراد برودت می‌دهند و سپس دستگاه به مدت حدود ۲ دقیقه در این وضعیت تثبیت می‌شود. بعد از آن، با آهنگ مناسب ۱۰ درجه در دقیقه آزمایش ادامه می‌یابد. در این آزمایش، دمای اوتکتیک اندازه‌گیری می‌شود. به کمک آزمایشات انجماد، نه تنها میزان شوری سیال‌های درگیر رقیق شده را می‌توان تعیین کرد، بلکه ماهیت انواع نمک‌های حل شده در مایع را نیز می‌توان تشخیص داد (جدول ۵-۲). از آن جا که نمک‌های حل شده در یک سیال درگیر موجب افت دمای انجماد می‌شوند، بنابراین کاهش نقطه انجماد مایع پایین‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری میزان شوری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از طریق آزمایش سرمایش می‌توان حضور گازهایی نظیر  $CO_2$  و  $CH_4$  را شناسایی کرد. بررسی‌های انجماد با اولین تبدیل به انجماد آغاز می‌شود، سپس به تدریج در حالی که در زیر میکروسکوپ یا در مانیتور کنترل می‌شود، سیالات درگیر گرم می‌شوند. به محض این که سیال منجمد شد، ناگهان حباب بخار جمع می‌شود و به صورت یک توده از دانه‌های بلور یخ توسعه پیدا می‌کند. انقباض حجمی بخار در نتیجه بالا رفتن حجم یخ در مقایسه با آب است. سپس سیال به تدریج گرم شده و از حالت انجماد خارج می‌شود. دما آنقدر افزایش می‌یابد تا یخ شروع به ذوب شدن کند. مقدار کمی از مایع ناگهان در اولین دمای ذوب ظاهر می‌شود. دمایی که در آن اولین اجزای یخ ذوب می‌شوند، دمای اوتکتیک است و مقدار آن به وضعیت نمک‌های حل شده در مایع بستگی دارد. اگر در جریان گرم کردن، دما اندکی از دمای اولین ذوب بالاتر رود، مقدار بیشتری از یخ ذوب می‌شود. به تدریج تعداد قطعات یخ کمتر می‌شود تا جایی که فقط چند دانه باقی می‌ماند. دمایی را که طی آن آخرین بلور یخ ذوب می‌شود به دقت اندازه‌گیری می‌کنند. از آنجا که نمک‌های حل شده در سیال درگیر، دما را تا حدی پایین می‌آورند که باعث انجماد آبی که آن‌ها را احاطه کرده است می‌شود، بنابراین پایین آمدن نقطه انجماد مایع تا زیر صفر درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری میزان شوری به کار می‌رود. این مقدار بر حسب درصد وزنی معادل  $NaCl$  اندازه‌گیری می‌شود.

برای اطمینان از یخ زدن کامل، معمولاً سیالات درگیر آبدار تا دمای  $60-$  و سیالات  $CO_2$  دار تا  $100-$  درجه سانتی‌گراد سرد می‌شوند تا از یخ زدن کامل فازها اطمینان حاصل شود. سرد شدن تحت دمای پایین‌تر از دمای اتاق باعث می‌شود سیال درگیر حاوی دی‌اکسید کربن به صورت دو حباب در داخل هم درآید. حباب درونی، بخار دی‌اکسید کربن و حباب بیرونی، مایع دی‌اکسید کربن است.



دی‌اکسیدکربن خالص منجمد شده در دمای ۵۶/۶- درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود و دماهای ذوب پایین‌تر از این نقطه، حضور هیدروکربن‌های دیگر نظیر متان را نشان می‌دهد. مقدار متان را می‌توان از روی نمودارهایی به صورت نیمه‌کمی تخمین زد.

### ۹-۵- سیستم‌های شیمیایی سیالات درگیر

به منظور مطالعه و تجزیه و تحلیل نتایج مطالعات میکروتومتری، کارشناس باید سیستم شیمیایی سیال درگیر را تشخیص دهد و بر مبنای آن نقاط اندازه‌گیری را مشخص کند. علاوه بر آن باید از ویژگی‌های سیستم‌های شیمیایی و نمودارهای فاز آن اطلاع کامل داشته باشد. چهار سیستم بسیار متداول در ادامه ارائه می‌شود.

#### ۹-۵-۱- سیال‌های دو فاز مایع-گاز (L+V)

این سیال‌ها از فاز مایع و حباب گاز تشکیل شده است. در هنگام گرم کردن این سیال‌ها ممکن است سه حالت اتفاق بیفتد که حالت اولی رایج‌تر است.

الف- همگن شدن به فاز مایع (L+V→L)

ب- همگن شدن به فاز گاز (L+V→V)

پ- همگن شدن بحرانی که با محو شدن مرز مایع و گاز اتفاق می‌افتد.

در این نوع سیال‌های درگیر در آزمایش گرمایش دمای همگن شدن (Th) و در آزمایش سرمایش دمای اوتکتیک (Te) و دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T<sub>Mice</sub>) اندازه‌گیری می‌شود. غیر از محلول‌های نمکی ممکن است هیدرات‌های نمکی نیز در هنگام انجماد به بلورهای یخ تبدیل شوند. هیدروهالیت (NaCl.۲H<sub>2</sub>O) شناخته شده‌ترین مثال از این گونه هیدرات‌ها است. نقطه ذوب آخرین بلور یخ هیدرات‌های نمکی با T<sub>MH</sub> نشان داده می‌شود. با مقایسه T<sub>MH</sub>, T<sub>Mice</sub> و T<sub>FM</sub> می‌توان اطلاعات دقیق‌تری در مورد مقدار شوری سیال‌های درگیر به دست آورد.

#### ۹-۵-۲- سیال‌های درگیر سه فاز مایع-جامد-گاز (L+V+S)

این سیال‌ها غیر از فاز مایع و گاز دارای فاز جامد (فاز دختر) نیز هستند. کانی‌هالیت و سیلویت رایج‌ترین فازهای دختر درون سیالات درگیر هستند. در این سیال‌ها در آزمایش گرمایش، دمای همگن شدن، دمای انحلال کامل بلور هالیت (T<sub>SNaCl</sub>) و سیلویت (T<sub>SKCl</sub>) اندازه‌گیری می‌شود و نیازی به آزمایش سرمایش نیست.

#### ۹-۵-۳- سیالات درگیر ناآمیخته (L<sub>1</sub>+L<sub>2</sub>+V)

این سیال‌های درگیر آب و دی‌اکسید کربن دارند و همگن شدن CO<sub>2</sub> مایع به گاز در دمای ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. به دلیل مایع شدن سریع‌تر CO<sub>2</sub> نسبت به بخار آب، همیشه فاز CO<sub>2</sub> مایع در اطراف حباب بخار تشکیل می‌شود و آب مایع، آن را در برمی‌گیرد. در آزمایش گرمایش ابتدا همگن شدن و سپس همگن شدن کامل انجام می‌شود. نقطه ذوب فاز کلتریت<sup>۱</sup>، و ذوب CO<sub>2</sub> جامد

۱- Clathrate

در آزمایش سرمایش تعیین می‌شود. در آزمایش سرمایش کلتريت تشكيل می‌شود و فاز آبگین و غیرآبگین منجمد می‌شوند. کلتريت یک فاز ناپایدار است که به صورت موقتي تشكيل می‌شود و شامل  $CO_2$  و مقداری آب است. به دلیل ورود آب به فاز کلتريت، برای اندازه‌گیری شوری از نقطه ذوب نهایی یخ نمی‌توان استفاده کرد و شوری بر مبنای نقطه ذوب کلتريت که معمولاً در محدوده ۶- تا ۱۲+ درجه است، محاسبه می‌شود. در آزمایش سرمایش کلتريت (هیدرات گاز،  $CO_2, 23/4H_2O$ ) نیز در دمای ۲۸- درجه سانتی‌گراد تشكيل می‌شود. برای آزمایش سرمایش، نمونه تا دمای زیر ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد سرد می‌شود تا فاز  $CO_2$  و فازهای آبگین موجود در نمونه همه منجمد شوند. در گرم کردن،  $CO_2$  جامد در دمای ۵۶/۶- درجه سانتی‌گراد ( $T_{MCO_2}$ ) کاملاً ذوب شود. در دمایی که آخرین بلور یخ ذوب می‌شود ( $T_{Mice}$ ) هنوز بلورهای کلتريت حضور دارند و با افزایش دما تجزیه می‌شوند ( $T_{Mclath}$ ) که این مساله همراه با ظهور ناگهانی  $CO_2$  مایع در اطراف حباب بخار غنی از  $CO_2$  است. با گرم شدن بیشتر فاز  $CO_2$  در دمای ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد  $CO_2$  به حالت مایع همگن می‌شود  $Th_{CO_2}$  در این سیال‌ها، دمای همگن شدن ( $Th$ ) دمایی است که  $CO_2$  مایع و فاز مایع آبگین به صورت کامل همگن می‌شوند.

#### ۵-۹-۴- سیالات غنی از $CO_2$

سیال‌های درگیر حاوی  $CO_2$  خالص در دمای ۵۶/۶- ( $T_{MCO_2}$ ) درجه سانتی‌گراد ذوب یا منجمد می‌شوند. در صورتی که ترکیبی از  $CO_2$  و مایعات دیگر مثل آب در درون سیال وجود داشته باشد، نقطه ذوب مایع درون سیال درگیر به طرف صفر میل می‌کند. در صورتی که  $CH_4$  به صورت مایع در داخل  $CO_2$  حل شده باشد، درجه ذوب بلورهای یخ تشكيل شده یا درجه انجماد سیال درگیر ۵۶/۶- درجه سانتی‌گراد به طرف ۱۸۵/۵- میل می‌کنند. در دمای ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد  $CO_2$  مایع به فاز گاز  $CO_2$  تبدیل می‌شود. برای سیستم  $CO_2$  دو فازی دو نقطه ذوب  $CO_2$  جامد و همگن شدن کامل  $CO_2$  اندازه‌گیری می‌شود.

#### ۵-۱۰- نقاط اندازه‌گیری

در مطالعات میکروترمومتری دمای تغییرات فازهای موجود در سیالات درگیر در طی شرایط سرد و گرم کردن اندازه‌گیری می‌شود. بسته به سیستم شیمیایی، نقاط اندازه‌گیری (تغییر فاز) متفاوت است. نقاط مورد اندازه‌گیری در سیستم‌های مختلف در جدول ۵-۳ ارائه شده است.

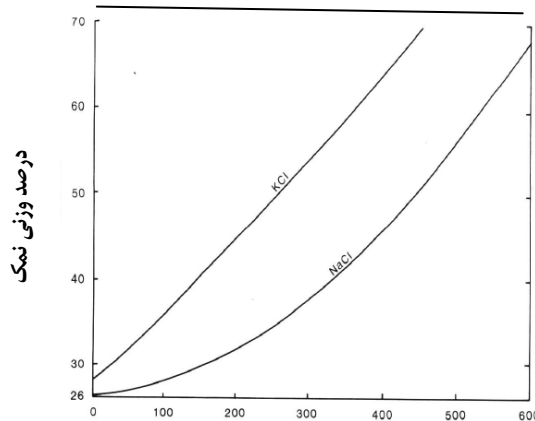
#### ۵-۱۱- ارایه نتایج مطالعات میکروترمومتری

بسته به نوع ذخیره و اهداف مطالعه ارایه نتایج و تعبیر و تفسیر متفاوت است و کارشناسان خبره بسته به نیاز از روش‌های متفاوت استفاده می‌کنند. به منظور ارایه نتایج، استفاده از جدول‌ها و نمودارهایی که در ادامه آمده متداول است. به منظور حصول اطمینان، بین ۱۵ تا ۲۵ سیال درگیر از هر سیستم باید به طور کامل مطالعه شود.

مطالعه کامل شامل نوع سیستم شیمیایی، اندازه‌گیری تغییرات شیمیایی، اندازه‌گیری تغییرات فازی و نوع سیال درگیر از نظر اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب بودن است.

- هیستوگرام دمای ذوب آخرین قطعه یخ

- هیستوگرام درجه همگن شدن
- هیستوگرام شوری محاسبه شده
- نمودار Th در مقابل شوری
- محاسبه و رسم ایزوکرها<sup>۱</sup>



دمای انحلال بر حسب درجه سانتی گراد

شکل ۵-۵- منحنی‌های حالیت NaCl و KCl در محلول‌های همگن برای اندازه‌گیری میزان شوری سیالات درگیر دارای کانی‌های دختر هالیت و سیلیت

جدول ۵-۲- تعیین میزان شوری بر حسب درصد نمک طعام با استفاده از ذوب آخرین قطعه یخ

نقطه ذوب آخرین قطعه یخ (Tmice)	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۰	۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۷۱	۰/۸۸	۱/۰۵	۱/۲۳	۱/۴۰	۱/۵۷
۱	۱/۷۴	۱/۹۱	۲/۰۷	۲/۲۴	۲/۴۱	۲/۵۷	۲/۷۴	۲/۹۰	۳/۰۶	۳/۲۳
۲	۳/۳۹	۳/۵۵	۳/۷۱	۳/۸۷	۴/۰۳	۴/۱۸	۴/۳۴	۴/۴۹	۴/۶۵	۴/۸۰
۳	۴/۹۶	۵/۱۱	۵/۲۶	۵/۴۱	۵/۵۶	۵/۷۱	۵/۸۶	۶/۰۱	۶/۱۶	۶/۳۰
۴	۶/۴۵	۶/۵۹	۶/۷۴	۶/۸۸	۷/۰۲	۷/۱۷	۷/۳۱	۷/۴۵	۷/۵۹	۷/۷۳
۵	۷/۸۶	۸/۰۰	۸/۱۴	۸/۲۸	۸/۴۱	۸/۵۵	۸/۶۸	۸/۸۱	۸/۹۵	۹/۰۸
۶	۹/۲۱	۹/۳۴	۹/۴۷	۹/۶۰	۹/۷۳	۹/۸۶	۹/۹۸	۱۰/۱۱	۱۰/۲۴	۱۰/۳۶
۷	۱۰/۴۹	۱۰/۶۱	۱۰/۷۳	۱۰/۸۶	۱۰/۹۸	۱۱/۱۰	۱۱/۲۲	۱۱/۳۴	۱۱/۴۶	۱۱/۵۸
۸	۱۱/۷۰	۱۱/۸۱	۱۱/۹۳	۱۲/۰۵	۱۲/۱۶	۱۲/۲۸	۱۲/۳۹	۱۲/۵۱	۱۲/۶۲	۱۲/۷۳
۹	۱۲/۸۵	۱۲/۹۶	۱۳/۰۷	۱۳/۱۸	۱۳/۲۹	۱۳/۴۰	۱۳/۵۱	۱۳/۶۲	۱۳/۷۲	۱۳/۸۳
۱۰	۱۳/۹۴	۱۴/۰۴	۱۴/۱۵	۱۴/۲۵	۱۴/۳۶	۱۴/۴۶	۱۴/۵۷	۱۴/۶۷	۱۴/۷۷	۱۴/۸۷
۱۱	۱۴/۹۷	۱۵/۰۷	۱۵/۱۷	۱۵/۲۷	۱۵/۳۷	۱۵/۴۷	۱۵/۵۷	۱۵/۶۷	۱۵/۷۶	۱۵/۸۶
۱۲	۱۵/۹۶	۱۶/۰۵	۱۶/۱۵	۱۶/۲۴	۱۶/۳۴	۱۶/۴۳	۱۶/۵۳	۱۶/۶۲	۱۶/۷۱	۱۶/۸۰
۱۳	۱۶/۸۹	۱۶/۹۹	۱۷/۰۸	۱۷/۱۷	۱۷/۲۶	۱۷/۳۴	۱۷/۴۳	۱۷/۵۲	۱۷/۶۱	۱۷/۷۰
۱۴	۱۷/۷۹	۱۷/۸۷	۱۷/۹۶	۱۸/۰۴	۱۸/۱۳	۱۸/۲۲	۱۸/۳۰	۱۸/۳۸	۱۸/۴۷	۱۸/۵۵

ادامه جدول ۵-۲- تعیین میزان شوری بر حسب درصد نمک طعام با استفاده از ذوب آخرین قطعه یخ

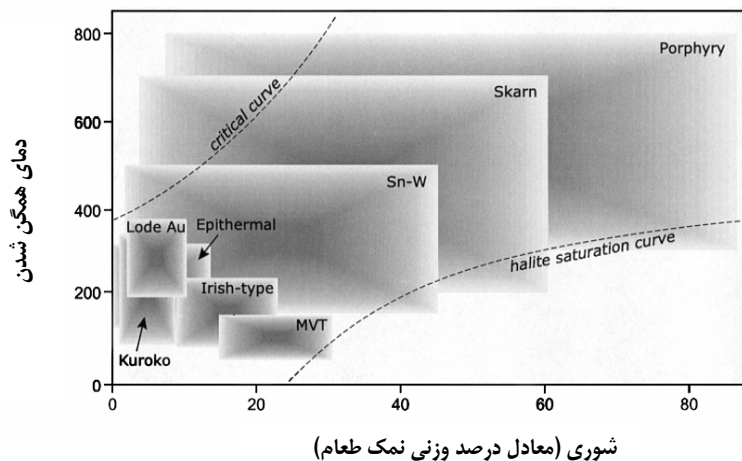
نقطه ذوب آخرین قطعه یخ (T <sub>ice</sub> )	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۱۵	۱۸,۶۳	۱۸,۷۲	۱۸,۸۰	۱۸,۸۸	۱۸,۹۶	۱۹,۰۵	۱۹,۱۳	۱۹,۲۱	۱۹,۲۹	۱۹,۳۷
۱۶	۱۹,۴۵	۱۹,۵۳	۱۹,۶۰	۱۹,۶۸	۱۹,۷۶	۱۹,۸۴	۱۹,۹۲	۱۹,۹۹	۲۰,۰۷	۲۰,۱۵
۱۷	۲۰,۲۲	۲۰,۳۰	۲۰,۳۷	۲۰,۴۵	۲۰,۵۲	۲۰,۶۰	۲۰,۶۷	۲۰,۷۵	۲۰,۸۲	۲۰,۸۹
۱۸	۲۰,۹۷	۲۱,۰۴	۲۱,۱۱	۲۱,۱۹	۲۱,۲۶	۲۱,۳۳	۲۱,۴۰	۲۱,۴۷	۲۱,۵۴	۲۱,۶۱
۱۹	۲۱,۶۸	۲۱,۷۵	۲۱,۸۲	۲۱,۸۹	۲۱,۹۶	۲۲,۰۳	۲۲,۱۰	۲۲,۱۷	۲۲,۲۴	۲۲,۳۱
۲۰	۲۲,۲۸	۲۲,۴۴	۲۲,۵۱	۲۲,۵۸	۲۲,۶۵	۲۲,۷۱	۲۲,۷۸	۲۲,۸۵	۲۲,۹۱	۲۲,۹۸
۲۱	۲۳,۰۵	۲۳,۱۱	۲۳,۱۸							

جدول ۵-۳- پارامترهای قابل اندازه‌گیری در انواع مختلف سیالات درگیر

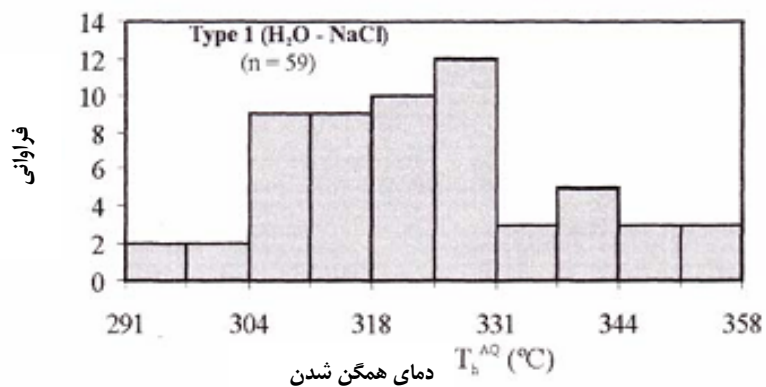
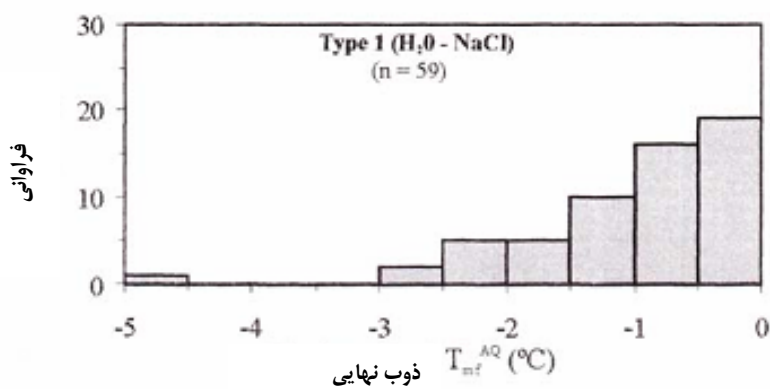
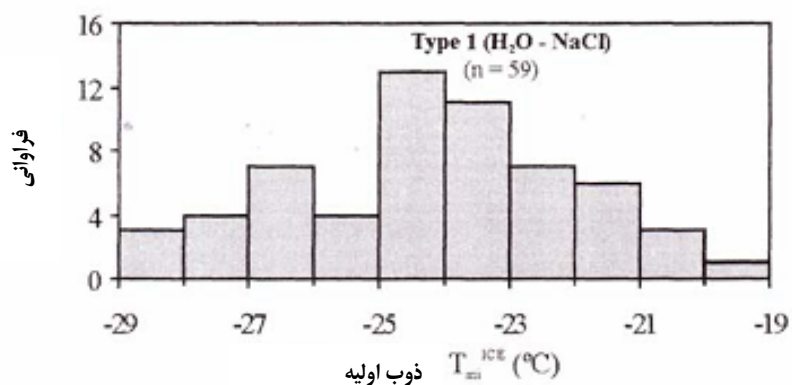
نقاط اندازه‌گیری فاز	Th	TSS <sub>۲</sub>	TSS <sub>۱</sub>	Th CO <sub>۲</sub>	TMclath	TM ice	TMHH	Te	TMCO <sub>۲</sub>
L+V	√	-	-	-	-	√	±	√	-
L+V+S	√	-	√	-	-	-	-	-	-
L+V+mS	√	√	√	-	-	-	-	-	-
L <sub>۱</sub> +L <sub>۲</sub> +V	√	-	-	√	√	-	-	√	√
L+VCO <sub>۲</sub>	-	-	-	√	-	-	-	-	√

### ۵-۱۲- ارتباط درجه شوری و دمای همگن شدن در تیپ‌های مختلف کانساری

ارتباط درجه شوری و دمای همگن شدن به صورت تقریبی و با برخی همپوشانی‌ها برای تیپ کانسارهای مختلف در شکل ۵-۶ ارائه شده است. در این شکل، هر تیپ کانسار در محدوده‌ای از دما و شوری قرار می‌گیرد و با تعیین شوری و دمای همگن شدن می‌توان نوع کانسار مورد مطالعه را تا حدودی تعیین کرد. نتایج مطالعات سیالات درگیر معمولاً به صورت جدول‌ها و نمودارهای هیستوگرام گزارش می‌شود و تغییرات دمای همگن شدن و شوری سیالات درگیر مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۵-۷). استفاده از مطالعه سیالات درگیر به تنهایی کافی نیست و باید این داده‌ها در کنار سایر داده‌های زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵-۶- ارتباط تقریبی کانسارهای مختلف با دمای همگن شدن و شوری سیالات درگیر



شکل ۵-۷- نمونه‌ای از نمودار دمای همگن شدن، ذوب اولین قطعه یخ و ذوب آخرین قطعه یخ سیالات درگیر



# فصل ۶

---

---

دستور العمل تصویربرداری از

مقاطع و تعبیر و تفسیر آنها



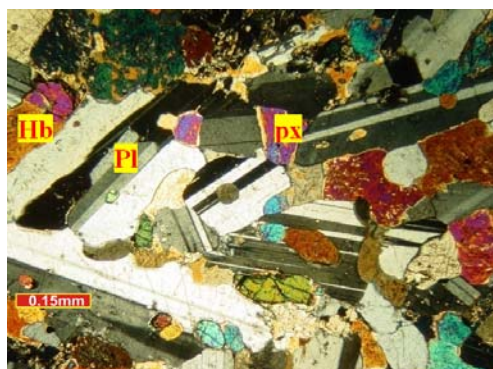


## ۶-۱- آشنایی

به منظور مستندسازی مطالعات میکروسکوپی و ارایه نکات کلیدی به صورت تصویری باید همراه با گزارش مطالعات، تعدادی عکس گویا شده نیز ارایه شود. تعداد عکس‌ها به پارامترهای کلیدی و موضوع مورد نظر بستگی دارد اما در هر مورد ارایه حداقل دو عکس ضروری است.

## ۶-۲- تصاویر میکروسکوپی

تصاویر میکروسکوپی باید تاییدکننده توضیحات گزارش مطالعات میکروسکوپی باشند و خواننده را در درک گزارش کمک کنند. در مطالعات سنگ‌شناسی تصاویر میکروسکوپی باید گویای نام سنگ باشند و بافت‌های موجود در نمونه را به خوبی نشان دهند. پدیده‌های دگرسانی حتما باید تصویربرداری و در گزارش ارایه شود. هر عکس باید مقیاس خطی داشته باشد و نوع نوری که در آن تصویربرداری شده است در قسمت زیرین عکس ثبت شود. توضیحات مختصری از عکس تحت عنوان زیرنویس برای هر عکس ضروری است (شکل‌های ۶-۱ تا ۶-۳). در مطالعات سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی باید هر کانی یا کانه با استفاده از علائم استاندارد کانی‌ها گویا شود (پیوست). عکس‌برداری و ثبت آن چه که مشاهده می‌شود بهترین سند و مدرک برای اثبات یافته‌های محقق در مطالعات سیالات درگیر است. این عکس‌ها برای مستندسازی اندازه، شکل، فازهای درونی و نوع سیال‌های درگیر ضروری هستند. پدیده‌هایی مثل گردن‌دار شدن، نشت و تغییرات فازها به کمک عکس‌های برداشته شده از سیال‌ها در فواصل متفاوت و طولانی قابل اثبات است. عکس‌برداری از سیال‌های درگیر امکان مشاهده تغییرات و مقایسه وضعیت سیال‌ها در هنگام مطالعات پتروگرافی و پس از گرم یا سرد کردن آن‌ها را برای محقق فراهم می‌سازد. در مطالعات سیالات درگیر، فازهای موجود در تصاویر سیالات درگیر نیز باید با استفاده از علائم استاندارد گویا شود. شماره هر عکس باید در متن گزارش ارجاع داشته باشد. در مطالعات مقاطع صیقلی به منظور نشان دادن بهتر ارتباط کانه با بخش‌های باطله، بهتر است تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی‌های مختلف گرفته شده و از بزرگنمایی‌های کوچکتر برای نشان دادن نمای کلی نمونه و مقادیر کمی کانه‌های تشکیل دهنده نمونه استفاده شود. از بزرگنمایی‌های بزرگ به منظور نشان دادن بافت‌های خیلی ریز نمونه مثل بافت‌های جانشینی و ادخال‌های موجود در نمونه استفاده می‌شود. کانی‌های غیرفلزی در مطالعات مقاطع صیقلی تحت عنوان گانگ یا باطله نام‌گذاری می‌شوند.

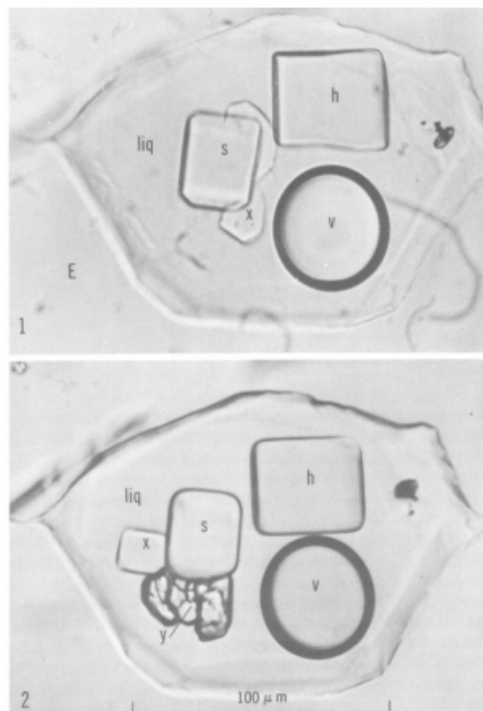


شکل ۶-۱- تصویر میکروسکوپی مربوط به یک نمونه گابرو (نور عبوری XPL)

نماد کانی‌ها: پیروکسن (Px)، پلاژیوکلاز (PI) و هورنبلند (Hb)



شکل ۶-۲- تصویر میکروسکوپی جانشینی کوولیت به جای کالکوپیریت (نور انعکاسی PPL)  
کالکوپیریت (Cep) و کوولیت (Cv)



شکل ۶-۳- تصویر میکروسکوپی از سیالات درگیر چند فازی  
بخار (v)، هالیت (h)، سیلویت (s)

# پیوست

---

---

علایم استاندارد برای نام گذاری برخی از

کانی ها در تصاویر میکروسکوپی



جدول ۱ - علایم استاندارد برای نام‌گذاری برخی از کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی

علایم	کانی	علایم	کانی
Act	Actinolite	Bst	Bustamite
Aeg	Aegirine	Cal	Calcite
Aik	Aikinite	Ccn	Cancrinite
Agt	Aegirine-augite	Car	Caryopilate
Ak	Akermanite	Cb	Carbonate mineral
Ab	Albite	Cph	Carpholite
All	Allactite	Cst	Cassiterite
Afs	Alkali feldspar	Cel	Celadonite
Aln	Allanite	Cls	Celestine
Alm	Almandine	Cbz	Chabazite
Als	Alumosilicate	Cc	Chalcocite
Amp	Amphibole	Ccp	Chalcopyrite
Anl	Analcime	Chm	Chamosite
Ant	Anatase	Chl	Chlorite
And	Andalusite	Cld	Chloritoid
Adr	Andradite	Chn	Chondrodite
Anh	Anhydrite	Csl	Chrisstanleyite
Ank	Ankerite	Chr	Chromite
Ann	Annite	Ccl	Chrysocolla
An	Anorthite	Ctl	Chrysotile
Ath	Anthophyllite	Clc	Clinochlore
Atg	Antigorite	Cen	Clinoenstatite
Ap	Apatite	Fe2-Chq	Clinoferroholmquistite
Apo	Apophyllite	Cfs	Clinoferrosilite
Arg	Aragonite	Chq	Clinoholmquistite
Arf	Arfvedsonite	Chu	Clinohumite
Arm	Armanigite	Cpt	Clinoptilolite
Apy	Arsenopyrite	Cpx	Clinopyroxene
Asp	Aspidolite	Czo	Clinozoisite
Aug	Augite	Cbt	Cobaltite
Ax	Axinite	Coe	Coesite
Brt	Barite	Cpr	Cooperite
Brr	Barrerite	Crd	Cordierite
Brs	Barroisite	Crr	Corrensite
Blt	Barylite	Crn	Corundum
Bsl	Barysilite	Cv	Covellite
Bnj	Benjaminite	Crs	Cristobalite
Ber	Berryite	Cum	Cummingtonite
Bet	Betafite	Dee	Deerite
Brl	Beryl	Dsp	Diaspore
Bry	Beryllonite	Dg	Digenite
Beu	Beusite	Di	Diopside
Bt	Biotite	Dol	Dolomite
Bmt	Bismuthinite	Drv	Dravite
Bhm	Boehmite	Dum	Dumortierite
Bor	Boralsilite	Eas	Eastonite
Bn	Bornite	Eck	Eckermannite
Bnn	Bournonite	Ed	Edenite
Brg	Braggite	Elb	Elbaite
Brk	Brookite	En	Enstatite
Brc	Brucite	Ep	Epidote

ادامه جدول ۱- علایم استاندارد برای نامگذاری برخی از کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی

علایم	کانی	علایم	کانی
Ess	Esseneite	Hq	Holmquistite
Fa	Fayalite	Hbl	Hornblende
Fac	Ferro-actinolite	Hu	Humite
Fcl	Ferrocolumbite	Ill	Illite
Fed	Ferro-edenite	Ilm	Ilmenite
Fs	Ferrosilite	Ins	Inesite
Ftn	Ferrotantalite	Ixl	Ixiolite
Fts	Ferrotschermakite	Jd	Jadeite
Fer	Feruvite	Jrs	Jarosite
Fsp	Feldspar	Joe	Joersmithite
Fl	Fluorite	Jh	Johannsenite
Foi	Foitite	Jsv	Johnsomervilleite
Fo	Forsterite	Jnt	Junoite
Frd	Friedrichite	Krs	Kaersutite
Gad	Gadolinite	Kls	Kalsilite
Gn	Galena	Kln	Kaolinite
Grt	Garnet	Kln-Srp	Kaolinite-Serpentine
Ged	Gedrite	Ktp	Katophorite
Gh	Gehlenite	Kfs	K-feldspar
Gdf	Gersdorffite	Kie	Kieserite
Gbs	Gibbsite	Kob	Kobellite
Gir	Giraudite	Krn	Komerupine
Gld	Gladite	Koz	Kozulite
Glt	Glauconite	Kut	Kutnohorite
Gln	Glaucophanite	Ky	Kyanite
Gt	Goethite	Ltk	Laitakarite
Gft	Graftonite	Lan	Lanarkite
Gdd	Grandidierite	Ltp	Latrappite
Gr	Graphite	Lmt	Laumontite
Gre	Greenalite	Lrt	Laurite
Grg	Greigite	Lws	Lawsonite
Grs	Grossular	Laz	Lazulite
Gru	Grunerite	Lzr	Lazurite
Gp	Gypsum	Lpd	Lepidolite
Hak	Hakite	Lct	Leucite
Hl	Halite	Lm	Limonite
Ham	Hambergite	Lnd	Lindstromite
Hmr	Hammarite	Lz	Lizardite
Hs	Hastingsite	Lol	Loellingite
Hyn	Haüyne	Ldn	Londonite
Hz	Heazlewoodite	Lop	Loparite
Hd	Hedenbergite	Lou	Loughlinitite
Hdl	Hedleyite	Lue	Lueshite
Hlv	Helvite	Mkw	Mackinawite
Hem	Hematite	Mgh	Maghemite
Hc	Hercynite	Mhb	Magnesiophornblende
Hrd	Herderite	Mkt	Magnesiokatophorite
Hul	Heulandite	Mrb	Magnesioriebeckite
Hgb	Högbomite (Hoegbomite)	Mg-Sdg	Magnesiosadanagaite

ادامه جدول ۱ - علایم استاندارد برای نام‌گذاری برخی از کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی

علایم	کانی	علایم	کانی
Mgs	Magnesite	Pet	Petalite
Mgt	Magnetite	Phk	Phenakite
Mcl	Manganocolumbite	Phg	Phengite
Mtn	Manganotantalite	Phl	Phlogopite
Mrc	Marcasite	Pgt	Pigeonite
Mrg	Margarite	Pl	Plagioclase
Mar	Marialite	Pmc	Plumbomicrolite
Med	Medaite	Pol	Pollucite
Mei	Meionite	Prh	Prehnite
Mel	Melilite	Prm	Prismatine
Mer	Merwinite	Pmp	Pumpellyite
Mca	Mica	Py	Pyrite
Mc	Microline	Pya	Pyroaurite
Mic	Microclite	Pyc	Pyrochroite
Min	Minnesotaite	Pcl	Pyrochlore
MIb	Molybdenite	Prp	Pyrope
Mnz	Monazite	Pyf	Pyrophanite
Mon	Moncheite	Prl	Pyrophyllite
Mbs	Montebrasite	Prl-Tlc	Pyrophyllite-Talc
Mtc	Monticellite	Px	Pyroxene
Mnt	Montmorillonite	Pxm	Pyroxmangite
Mor	Mordenite	Po	Pyrrhotite
Mmt	Morimotoite	Qtz	Quartz
Mul	Mullite	Rnk	Rankinite
Ms	Muscovite	Rdz	Rhodizite
Nad	Nadorite	Rds	Rhodochrosite
Nas	Nasinite	Rdn	Rhodonite
Ntr	Natrolite	Rbk	Riebeckite
Ne	Nepheline	Rit	Richterite
Ney	Neyite	Rsm	Rossmannite
Nc	Nickeline	Rsb	Rustenbergite
Nrb	Norbergite	Rt	Rutile
Nsn	Nosean	Sdg	Sadanagaite
Nyb	Nyboite (Nyboeite)	Sa	Sanidine
Ol	Olivine	Spr	Sapphirine
Omp	Omphacite	Sar	Sarcopsidite
Op	Opaque mineral	Scp	Scapolite
Oam	Orthoamphibole	Srl	Schorl
Or	Orthoclase	Skn	Sekaninaite
Opx	Orthopyroxene	Sep	Sepiolite
Osu	Osumilite	Ser	Sericite
Pal	Palygorskite	Srp	Serpentine
Pg	Paragonite	Sd	Siderite
Prg	Pargasite	Sil	Sillimanite
Prk	Parkerite	Sme	Smectite
Pct	Pectolite	Sdl	Sodalite
Pek	Pekoite	Sps	Spessartine
Pn	Pentlandite	Sp	Sphalerite
Per	Periclase	Spl	Spinel
Prv	Perovskite	Spd	Spodumene

ادامه جدول ۱- علائم استاندارد برای نام‌گذاری برخی از کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی

علائم	کانی	علائم	کانی
Spu	Spurrite	Tph	Triphylite
St	Staurolite	Tro	Troilite
Stl	Stellerite	Ts	Tschermakite
Stf	Stibiobetafite	Usp	Ulvöspinel (Ulvoespinel)
Stm	Stibiomicrolite	Urn	Uraninite
Std	Stibiopalladinite	Umc	Uranmicrolite
Stb	Stilbite	Uv	Uvarovite
Stp	Stilpnomelane	Vrm	Vermiculite
Sti	Stishovite	Ves	Vesuvianite
Str	Strontianite	Vtm	Viitaniemiite
Tlc	Talc	Viv	Vivianite
Tap	Tapiolite	Vsk	Vysotskite
Tmt	Taramite	Wai	Wairakite
Tsn	Tausonite	Wrd	Weringite
Tn	Tennantite	Wmca	White Mica
Tep	Tephroite	Win	Winchite
Td	Tetrahedrite	Wth	Witherite
Thm	Thomsonite	Wtc	Wittichenite
Thr	Thorite	Wo	Wollastonite
Tmn	Tiemannite	Wus	Wüstite (Wuestite)
Til	Tilleyite	Xnt	Xenotime
Ttn	Titanite	Zeo	Zeolite
Toz	Topaz	Zwd	Zinnwaldite
Tur	Tourmaline	Zrn	Zircon
Tr	Tremolite	Zo	Zoisite
Trd	Tridymite		



## خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر ششصد عنوان ضابطه تخصصی- فنی، در قالب آیین‌نامه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی، نشریه و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست ضوابط منتشر شده در پایگاه اطلاع‌رسانی [nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir) قابل دسترسی می‌باشد.

امور نظام فنی و اجرایی

Islamic Republic of Iran  
Management and Planning Organization

# Instruction for Sample Preparation, Microscopic Studies and Fluid Inclusion Analysis

**No. 655**

Office of Deputy for Strategic Supervision  
Department of Technical and Executive Affairs

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

Ministry of Industry, Mine and Trade  
Deputy of Mine Affairs and Mineral  
Industries  
Office for Mining Supervision and  
Exploitation

<http://mimt.gov.ir>

**2016**

## این نشریه

به روش‌های آماده‌سازی نمونه‌ها برای مطالعات میکروسکوپی در نور عبوری و انعکاسی و سیالات درگیر می‌پردازد و در ادامه روش گزارش‌نویسی، تهیه تصاویر میکروسکوپی و تعبیر و تفسیر آن‌ها ارائه شده است.