

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

# آزمایشگاه متالورژی

رشته متالورژی

زمینه صنعت

شاخه آموزش فنی و حرفه‌ای

شماره درس ۲۳۴۸

آزمایشگاه متالورژی / [ویرایش دوم] / بازسازی و تجدیدنظر : کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف رشته متالورژی. - تهران : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۵.	۶۶۹ / ۰۲۸
۸۵ ص. : مصور. - (آموزش فنی و حرفه‌ای؛ شماره درس ۲۳۴۸)	آ ۵۶۷ /
متون درسی رشته متالورژی، زمینه صنعت.	۱۳۹۵
برنامه‌ریزی و نظارت، بررسی و تصویب محتوا : کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشته متالورژی دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کار دانش وزارت آموزش و پرورش.	
۱. متالورژی - آزمایش‌ها. الف. ایران. وزارت آموزش و پرورش. کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف رشته متالورژی. ب. عنوان. ج. فروست.	

همکاران محترم و دانش آموزان عزیز :

پیشنهادات و نظرات خود را درباره محتوای این کتاب به نشانی  
تهران - صندوق پستی شماره ۴۸۷۴/۱۵ دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و  
حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایند.

info@tvoccd.sch.ir

پیام‌نگار (ایمیل)

www.tvoccd.sch.ir

وب‌گاه (وب‌سایت)

این کتاب با توجه به برنامه سالی و پیشنهاد هنرآموزان سراسر کشور در گردهمایی‌های تنکابن و  
تصویب کمیسیون تخصصی در تابستان سال ۸۶ مورد بازبینی، اصلاح و تألیف قرار گرفت.

وزارت آموزش و پرورش

سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف : دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش

نام کتاب : آزمایشگاه متالورژی - ۴۸۹/۷

مؤلف : کمیسیون تخصصی رشته متالورژی

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی

تهران : خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن : ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار : ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وب‌سایت : www.chap.sch.ir

عکاس : غلامرضا خلیج

صفحه‌آرا : مریم نصرتی

طراح جلد : طاهره حسن‌زاده

ناشر : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران - تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

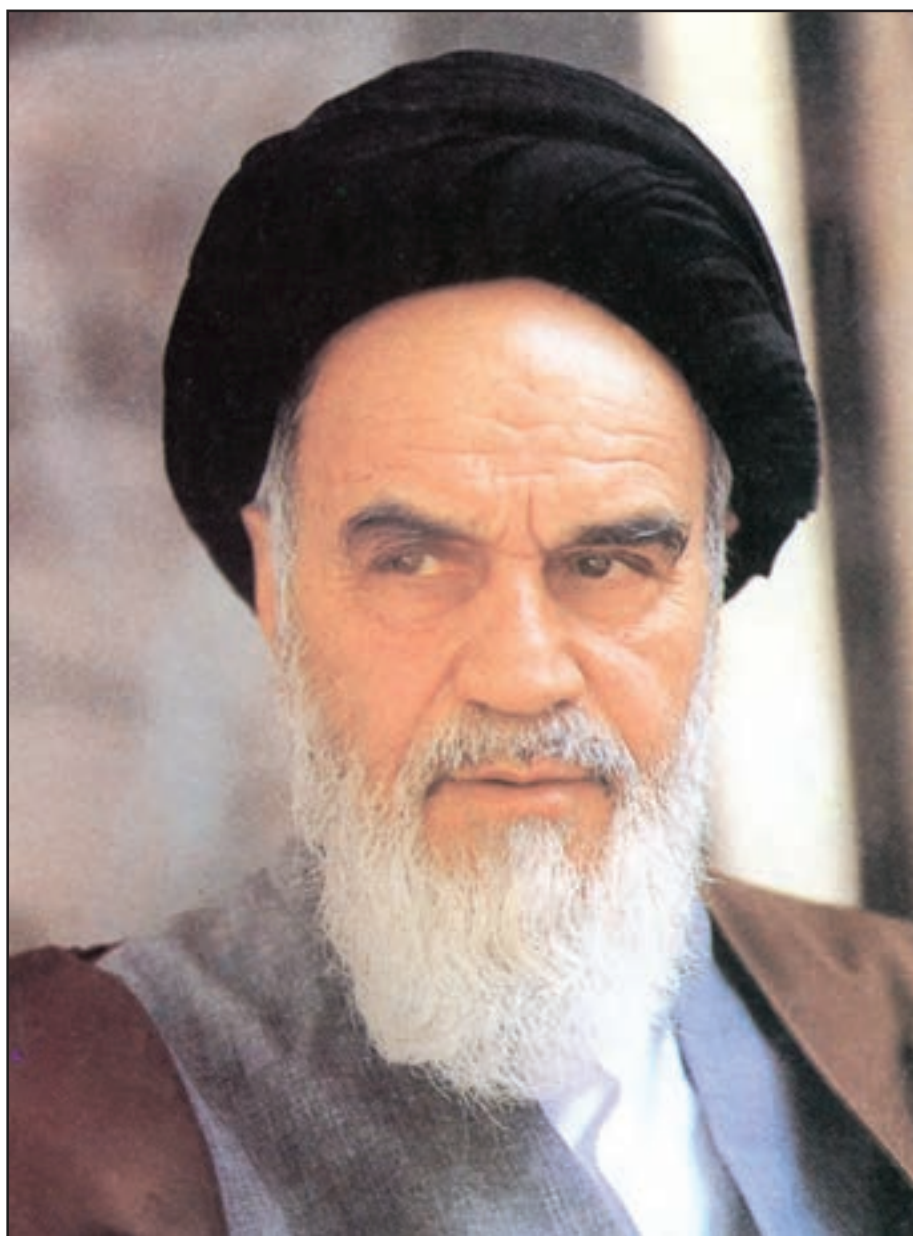
تلفن : ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار : ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی : ۳۷۵۱۵-۱۳۹

چاپخانه : شرکت چاپ و نشر کتابهای درسی ایران «سهامی خاص»

سال انتشار و نوبت چاپ : چاپ سیزدهم ۱۳۹۵

حق چاپ محفوظ است.

شابک ۸-۱۵۷۲-۰۵-۹۶۴ ISBN 964-05-1572-8



شما عزیزان کوشش کنید که از این وابستگی بیرون آید و احتیاجات کشور خودتان را برآورده سازید، از نیروی انسانی ایمانی خودتان غافل نباشید و از اتکای به اجانب بپرهیزید.

امام خمینی «قدس سره الشریف»



## فهرست

صفحه	عنوان
	مقدمه
۱	فصل اول
۱	آزمایشگاه مواد قالب گیری
۹-۱۷	آزمایش ها
۱۸	فصل دوم
۱۸	آزمایشگاه متالورژی مکانیکی
۲۲-۴۲	آزمایش ها
۴۳	فصل سوم
۴۳	متالوگرافی
۴۴-۶۵	آزمایش ها
۶۶	فصل چهارم
۶۶	عملیات حرارتی فولادها و چدن ها
۷۹-۸۴	آزمایش ها
۸۵	فهرست منابع

## هدف کلی

توانایی انجام آزمایش‌های مربوط به خواص ماسه، خواص مکانیکی فلزات، متالوگرافی و عملیات حرارتی

### آزمایشگاه مواد قالب‌گیری آزمایش‌های ماسه

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از هنرجو انتظار می‌رود که:

- ۱- ماسه‌ی ریخته‌گری، ترکیبات آن، مشخصات ماسه‌ی مصنوعی، بازسازی و آماده‌سازی ماسه و سیستم‌های مخلوط‌کن آسیابی را توضیح دهد.
- ۲- آزمایش تعیین اندازه و پخش ذرات را انجام دهد و عدد ریزی و اندازه‌ی ذرات ماسه را تعیین کند.
- ۳- آزمایش تعیین خاک رس دارای ماسه و اثر آن بر روی استحکام و نفوذپذیری ماسه را تشریح کند و آزمایش تعیین درصد خاک ماسه را انجام دهد.
- ۴- آزمایش تعیین رطوبت ماسه را انجام دهد.
- ۵- آزمایش‌های استحکام (فشاری، کششی، برشی) ماسه را در دو حالت تر و خشک انجام دهد.
- ۶- آزمایش قابلیت نفوذ گاز را انجام دهد و به کمک زمان آزمایش، این قابلیت را تعیین کند.

#### ۱- آزمایش‌های ماسه

مثلاً بر اثر تابش خورشید سنگ‌ها گرم شده و بر حجمشان اضافه می‌گردد اما در شب چون این حرارت فوراً از دست می‌رود انقباض نسبتاً سریعی در سنگ‌ها انجام می‌گیرد که به ایجاد ترک‌های ریزی در آن‌ها می‌انجامد. چون زمستان فرا می‌رسد این ترک‌ها از آب برف و باران پر شده و در اثر یخ‌بندان، سنگ‌ها خرد شده و رفته‌رفته به قطعات کوچک‌تر و ریزتری تبدیل می‌گردند تا بالاخره توسط جریان آب شسته شده و به صورت ماسه به طرف رودخانه‌ها سرازیر می‌گردند. بعد از آن ذرات ماسه در مسیر جریان آب انباشته شده تشکیل توده‌های ماسه را می‌دهند. ماسه در کلیه‌ی نقاط زمین به‌وفور یافت می‌شود و البته همواره دارای مقدار زیادی خاک می‌باشد. این خاک در طبقات مختلف ماسه فرق می‌کند؛ یک ریخته‌گر ماهر باید خود به محل

۱-۱- ماسه‌ی ریخته‌گری، ترکیبات و مشخصات آن  
ماسه یکی از موادی است که در ریخته‌گری اهمیت بسیار دارد. از این رو هر ریخته‌گر باید درباره‌ی آن مطالعه و تجربه‌های زیادی کسب کند.  
در هنگام ریختن ماده‌ی مذاب به داخل قالب مقدار زیادی گاز ایجاد می‌شود که باید به‌سهولت خارج گردد. در غیر این صورت این گازها در قطعه ریخته شده ایجاد مک و سوسه می‌کند. ماسه علاوه بر این باید دارای خاصیت شکل‌پذیری باشد.  
۱-۱-۱- پیدایش ماسه در طبیعت: بر اثر عوامل طبیعی از قبیل گرما، سرما، آب، نباتات و جانوران در فرایندی بسیار طولانی بر روی سنگ‌ها و خرد شدن آن‌ها ماسه تولید می‌شود.

رفته و پس از آزمایش‌های متعدد ماسه‌ی مورد نیاز خود را انتخاب کند. و در بعضی کشورها ماسه‌هایی یافت می‌شود که از نظر ریخته‌گری مرغوب و قابل استفاده است و معروفیت جهانی دارد. از جمله‌ی این کشورها فرانسه است که دارای ماسه‌ی قرمز رنگی می‌باشد که معادن آن در نزدیکی پاریس است. هم‌چنین کشور آلمان دارای یک نوع ماسه‌ی قرمز رنگ می‌باشد که معادن آن در منطقه‌ی هارتس واقع شده است.

**۱-۱-۲ ترکیبات و مشخصات ماسه‌ی طبیعی:**  
قسمت اصلی ماسه را ماده‌ای به نام کوارتز ( $\text{SiO}_2$ ) یا اکسید سیلیسیم تشکیل می‌دهد که معمولاً با مواد و ترکیبات معدنی دیگری که رنگ و خواص ماسه را از نظر ریخته‌گری تعیین می‌کند، مخلوط است. مثلاً اگر ماسه اکسید آهن ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) زیاد داشته باشد رنگ آن قرمز یا قهوه‌ای و اگر اکسید سدیم ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) و اکسید پتاسیم ( $\text{K}_2\text{O}$ ) داشته باشد به ترتیب رنگ‌های سبز و آبی خواهد داشت.

مواد شیمیایی تشکیل‌دهنده‌ی یک ماسه‌ی طبیعی معمولاً از این قرار است:

۹۴٪ اکسید سیلیسیم  $\text{SiO}_2$

۱٪ اکسید آلومینیوم  $\text{Al}_2\text{O}_3$

۲٪ اکسید کلسیم  $\text{CaO}$

۲٪ اکسید آهن  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

۱٪ اکسید سدیم  $\text{Na}_2\text{O}$  و اکسید پتاسیم  $\text{K}_2\text{O}$

ماسه‌های طبیعی را از لحاظ مقدار خاکی که همراه دارند می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

– ماسه‌ی ضعیف که حداکثر ۸٪ خاک دارد.

– ماسه‌ی متوسط که از ۸٪ تا ۱۸٪ خاک دارد.

– ماسه‌ی غنی که بیش از ۱۸٪ خاک دارد.

ماسه‌ی ریخته‌گری باید در مقابل حرارت به اندازه‌ی کافی مقاوم باشد. مثلاً اکسید سیلیسیم در مقابل حرارت مقاوم است ولی سایر مواد اضافی که همراه ماسه‌اند گاهی در مقابل حرارت مقاوم نبوده و هنگام ریخته‌گری می‌سوزند و یا ذوب می‌شوند که

در نتیجه کلوخه‌ی ماسه را تشکیل می‌دهند.

ماسه‌ی ریخته‌گری باید قابلیت نفوذپذیری گاز و بخار را در هنگام ریخته‌گری داشته باشد و این در صورتی ممکن است که ماسه دارای شرایط زیر باشد:

الف) توزیع اندازه دانه‌های ماسه متناسب با آلیاژ و قطعه ریخته‌گری مورد نظر باشد.

ب) ماسه از نوع متوسط باشد؛ یعنی در حدود ۸٪ الی ۱۸٪ خاک داشته باشد.

در ریخته‌گری قطعات بزرگ و هم‌چنین فلزاتی با نقطه ذوب بالا دانه‌های ماسه را درشت‌تر انتخاب می‌کنند تا گاز حاصل از مذاب‌ریزی به‌آسانی از قالب خارج شود. برای ریختن قطعات کوچک از ماسه‌ی دانه ریز استفاده می‌شود.

عوامل تولید گاز در موقع ریختن مذاب به داخل قالب، عبارتند از:

الف) هوای موجود در محفظه قالب

ب) هوای موجود بین ذرات ماسه

ج) گازهای حاصل از اثر سوختن مواد افزودنی به ماسه نظیر چسب ماهیچه، خاکه زغال‌سنگ و غیره....

**۱-۱-۳ ماسه‌ی مصنوعی:** این نوع ماسه‌ها معمولاً از شکستن، خرد کردن و غربال نمودن سنگ‌های سیلیسی، زیرکیتی، کرومیتی و اولیوینی به دست می‌آیند که برای ایجاد قابلیت شکل‌پذیری به آن‌ها چسب افزوده می‌شود دلایل استفاده از این ماسه‌ها به جای ماسه‌های طبیعی عبارتند از:

۱- دست‌یابی به دیرگدازی بالاتر

۲- کنترل مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوط به منظور تأمین خواص مورد نیاز و قابلیت بازسازی و استفاده مجدد.

**۱-۲ تعیین خواص و مشخصات ماسه ریخته‌گری\***  
با توجه به توضیحات قبل اهمیت خواص و مشخصات مختلف ماسه به‌خوبی آشکار می‌شود برای تعیین خواص ماسه

\*- به منظور درک بهتر مطالب این فصل به هنرجویان توصیه می‌شود که مشخصات ماسه‌ی ریخته‌گری را از کتاب اصول تکنولوژیکی ریخته‌گری مطالعه نمایند.



همواره آزمایش‌های مختلف و متعددی به کار می‌رود که هر تکسین ریخته‌گری باید از چگونگی آن‌ها اطلاع داشته باشد که اهم این آزمایش‌ها عبارتند از:

- تعیین اندازه ذرات ماسه
- تعیین درصد خاک ماسه
- تعیین درصد رطوبت
- تعیین استحکام فشاری تر و خشک ماسه
- تعیین استحکام کششی تر و خشک ماسه
- تعیین استحکام برشی تر و خشک ماسه
- تعیین قابلیت نفوذ گاز

### ۱-۲-۱- آزمایش تعیین اندازه و پخش ذرات:

ماسه‌ی قالب‌گیری براساس اندازه‌ی ذرات آن طبقه‌بندی می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد قطعات کوچک و سبک ریخته شده به ماسه‌ی ریز و نرم نیاز دارند. درحالی که قطعات سنگین به ماسه‌های درشت‌تر نیازمندند تا قابلیت نفوذ بیش‌تری داشته باشند. برای تعیین اندازه‌ی ذرات ماسه، استانداردهای متفاوتی به کار می‌رود که از جمله می‌توان استاندارد انگلیسی و استاندارد

آمریکایی را نام برد.

استانداردهای مختلف براساس غربال‌ها یا الک‌هایی که کلیه‌ی آن‌ها تقریباً برابر بوده و مشابه هستند، تعیین می‌گردند. قطر سوراخ، و شبکه‌های غربال و قطر سیم‌های سازنده‌ی غربال متفاوت است. در سیستم جامعه‌ی ریخته‌گران آمریکا (A.F.S) که معروفیت جهانی دارد، سیستم آزمایش از ۱۴ غربال (الک) تشکیل شده که درشت‌ترین غربال آن تحت شماره‌ی ۴، در هر اینچ طولی دارای ۴ دهانه و ریزترین غربال آن تحت شماره‌ی ۲۷۰، در هر اینچ طولی دارای ۲۷۰ سوراخ است.

کلمه‌ی مش (mesh) در مقیاس اندازه‌گیری عبارت است از تعداد سوراخ‌های غربال یا الک در یک اینچ طول. بدیهی است بدون دانستن قطر سیم‌های شبکه‌بندی غربال کلمه‌ی مش معنایی ندارد. در جدول ۱-۱ سیستم غربال‌های استاندارد مش انجمن ریخته‌گران آمریکا (A.F.S) و همچنین استاندارد آمریکایی (A.F.S.T) درج گردیده‌اند و در آزمایشگاه‌های مختلف معمولاً از ۱۱ ردیف غربال برحسب ریزی و درشتی ذرات ماسه استفاده می‌کنند.

جدول ۱-۱- مشخصات غربال‌های استاندارد آمریکایی و جامعه‌ی ریخته‌گران آمریکا

استاندارد آمریکایی شماره‌ی غربال $a_i$	اندازه‌ی طول دهانه (میلی‌متر)	تولرانس مجاز % +	قطر	استاندارد (مش) انجمن ریخته‌گران آمریکا A.F.S
۴	۴/۶۹۹	۳	۱/۶۵۱	۴
۶	۳/۳۲۷	۳	۰/۹۱۴	۶
۸	۳/۳۶۲	۳	۰/۸۸۹	۸
۱۰	۱/۶۵۱	۳	۰/۸۱۳	۱۰
۱۲	۱/۱۶۷	۳	۰/۶۳۵	۱۴
۱۶	۰/۸۳۳	۵	۰/۴۳۷	۲۰
۲۰	۰/۵۸۹	۵	۰/۳۲۸	۲۸
۳۰	۰/۴۱۴	۵	۰/۳۰۹	۳۵
۴۰	۰/۲۹۵	۵	۰/۲۳۳	۴۸
۵۰	۰/۲۰۸	۵	۰/۱۸۳	۶۵
۷۰	۰/۱۴۷	۶	۰/۱۰۶	۱۰۰
۱۰۰	۰/۱۰۴	۶	۰/۰۷۶	۱۵۰
۱۴۰	۰/۰۷۴	۷	۰/۰۷۴	۲۰۰
۲۰۰	۰/۰۵۳	۷	۰/۰۴۰	۲۷۰

وسایل مورد نیاز:

۱- دستگاه تعیین دانه بندی ماسه: مشخصات این دستگاه‌ها به شرح زیر است:

۱- دارای الکتروموتور با توان حدود ۱۰۰ وات، با دور در دقیقه‌ی قابل کنترل و تنظیم و با داشتن یک تایمر (ساعت) اتوماتیک که در زمان مورد نظر قطع می‌شود.

۲- دارای وزنی معادل تقریباً ۲۰ کیلوگرم و قابل استفاده برای تمام الک‌هایی که دارای استانداردهای بین‌المللی هستند.

۳- دارای برق ۲۲۰ ولت، ۵۰ هرتز و یک فاز

۴- معمولاً دارای حداقل شش عدد الک با مش‌های مختلف و یک عدد درپوش و یک عدد کفه‌ی تحتانی (شکل ۱-۱).

۱- ترازوی آزمایشگاه ماسه: برای توزین مواد از

ترازوهای مختلف استفاده می‌شود. ترازوهای موجود در آزمایشگاه‌های متالورژی را با حساسیت‌های مختلف می‌سازند که عبارت‌اند از:

$$۱/۰۰۰۰-۱/۰۰۰۱-۱/۰۰۰۰۱-۱/۰۰۰۰۰۱-۱/۰۰۰۰۰۰۱$$

هرچه حساسیت ترازو بیشتر باشد ظرفیت آن کاهش پیدا می‌کند. مثلاً یک نوع ترازوی آزمایشگاهی که تا یک صدم گرم دقت دارد، ترازوهای آزمایشگاهی، از نظر مکانیسم عمل به طور کلی به دو نوع تقسیم می‌شوند: مکانیکی و الکتریکی (دیجیتالی)، که دقت ترازوهای الکتریکی بیش‌تر از ترازوهای مکانیکی است. شکل (۱-۲).

### نحوه‌ی اجرای آزمایش

ابتدا مقدار  $\pm 5^\circ$  گرم ماسه‌ی سیلیسی را که قبلاً کاملاً خشک شده است با ترازو وزن می‌کنیم که البته منظور همان تعیین جرم است چون دقت ترازوی مذکور  $1/10^\circ$  گرم است لذا توله‌انس  $5^\circ$  گرم ماسه عبارت خواهد بود از  $5/10^\circ \pm$  گرم. بعد از توزین، این مقدار ماسه را بر روی بالاترین الک (غریبال) می‌ریزیم و به مدت ۱۵ دقیقه الک می‌کنیم (در ماشین لرزان، شکل ۱-۳ تعداد لرزه‌ها  $300^\circ$  لرزه در هر دقیقه است که ضربه‌های اعمال شده به الک‌ها توسط این ماشین  $180^\circ$  ضربه در هر دقیقه می‌باشد. این ارقام در ماشین‌های مختلف و استانداردهای هر کشور تفاوت دارد) پس از خاتمه‌ی لرزش الک‌ها، درپوش را برمی‌داریم و به ترتیب هر یک از الک‌ها را از بالا به پایین از ماشین یا دستگاه باز کرده و جدا می‌کنیم. در ادامه‌ی آزمایش به نوبت ذرات، ماسه‌ی باقی‌مانده در هر الک را بر روی یک ورق کاغذ برگردانده و تخلیه می‌کنیم. به کمک برس ذرات ماسه‌ی به‌جا مانده را به دقت و آرام از شبکه‌ی هر الک جدا می‌کنیم (برای تمیز کردن می‌توان با احتیاط و به آرامی ضرباتی به هر الک وارد کرد). لازم به توضیح است که همواره باید الک‌ها را کاملاً تمیز نگه داشت.

چنان‌چه آزمایش و توزین به دقت انجام شده باشد بدیهی است که مجموع جرم مواد و ماسه‌های تمامی غریبال‌ها و هم چنین کفه باید برابر جرم نمونه یعنی  $5^\circ$  گرم باشد.



شکل ۱-۱- دستگاه لرزان آزمایشگاهی سری الک‌های استاندارد

درصد جرمی باقی مانده در هر الک  $g_i$  چنین خواهد بود.

$$g_i = \frac{\text{جرم مواد باقی مانده در هر الک}}{\text{جرم نمونه ی اولیه}} \times 100$$

با به کار بردن رابطه ی زیر به سهولت می توان عدد ریزی (a) را به دست آورد:

$$a = \frac{\sum a_i g_i}{\sum g_i}$$

در این رابطه:

$a$  = عدد ریزی

$a_i$  = ضریب الک

$g_i$  = درصد جرمی باقی مانده در هر الک، و حرف یونانی  $\Sigma$  (سیگما) مشخص کننده ی مجموع چند کمیت است.

مثال زیر، عدد ریزی دانه را روشن می کند:

مثال: در یک آزمایش تعیین عدد ریزی دانه، جرم نمونه ۵۰ گرم، جرم خاک رس ۶/۱ گرم و جرم دانه های ماسه ۴۳/۹ گرم تعیین شده است. با توجه به جدول ۱-۲ که اعداد و ارقام مربوط به آزمایش مقادیر ماسه ی باقی مانده بر هر الک را نشان می دهد، مطلوب است محاسبه و تعیین:

الف) عدد ریزی دانه

ب) نحوه ی توزیع ذرات ماسه به صورت یک نمودار

حل: الف) با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۱-۲ (جمع کل) می توان نوشت:

$$\sum g_i = 87/8, \sum a_i g_i = 15274$$

از این رو عدد ریزی دانه چنین خواهد بود:

$$a = \frac{\sum a_i g_i}{\sum g_i} = \frac{15274}{87/8} \approx 174$$



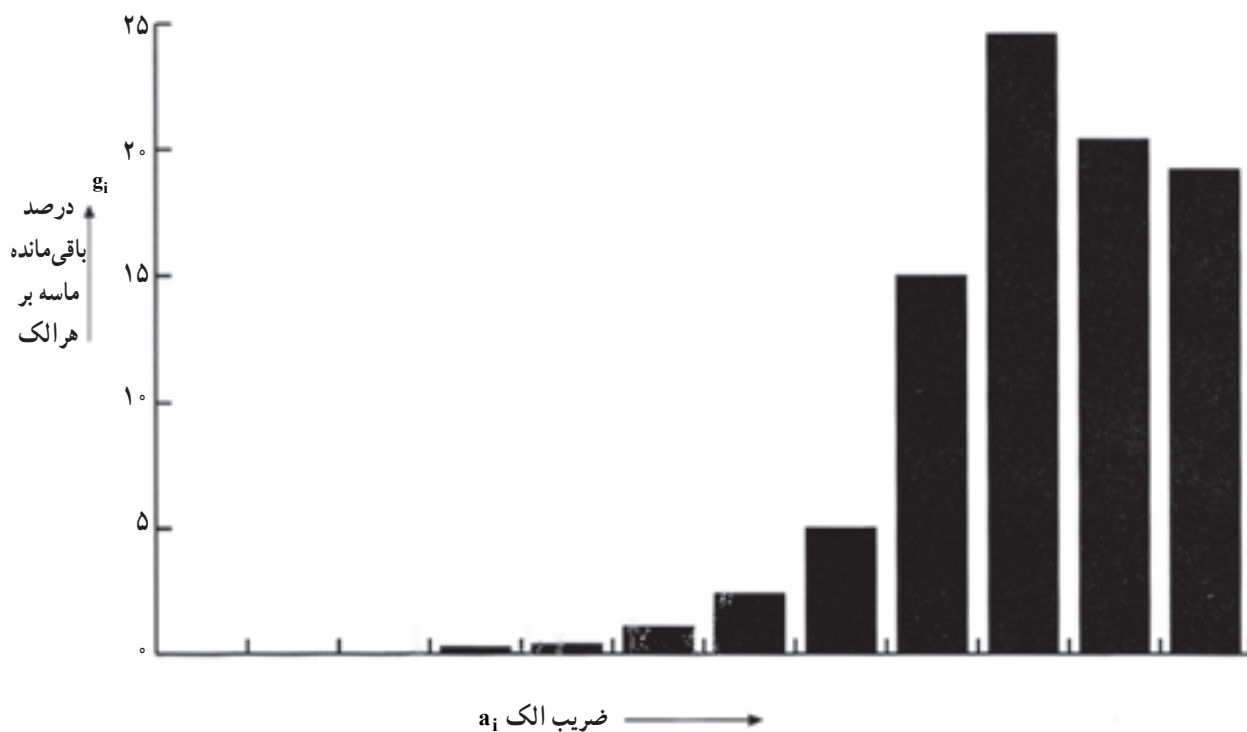
شکل ۱-۲- ترازوی الکتریکی



شکل ۱-۳- سری الک ها یا غربال های استاندارد شامل شش الک، یک درپوش و یک کفه

جدول ۱-۲- آزمایش تعیین عدد ریزی و چند الکه بودن یک نوع ماسه

حاصل ضرب $a_i$ و $g_i$	ضریب غربال یا الکه	درصد باقی مانده $g_i$	جرم باقی مانده روی هر الکه (گرم)	استاندارد آمریکایی شماره ی الکه مش
۰	۳	۰	۰	۶
۰	۵	۰	۰	۱۲
۰	۱۰	۰	۰	۲۰
۶	۲۰	۰/۳	۰/۱۵	۳۰
۱۲	۳۰	۰/۴	۰/۲	۴۰
۴۴	۴۰	۱/۱	۰/۵۵	۵۰
۱۲۰	۵۰	۲/۴	۱/۲	۷۰
۳۰۸	۷۰	۴/۴	۲/۲	۱۰۰
۱۵۰۰	۱۰۰	۱۵	۷/۵	۱۴۰
۳۴۴۴	۱۴۰	۲۴/۶	۱۲/۳	۲۰۰
۴۰۸۰	۲۰۰	۲۰/۴	۱۰/۲	۲۷۰
۵۷۶۰	۳۰۰	۱۹/۲	۹/۶	کفه
۱۵۲۷۴		۸۷/۸	۴۳/۹	جمع



شکل ۱-۴- نمودار ستونی درصد باقی مانده ماسه بر روی الکه ها

رس می‌شود. (فرمول خاک رس خالص یا کائولن عبارت است از:  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  که پس از یونیزاسیون تولید یون‌های  $2H^+$  و  $O^-$  می‌کند این یون‌ها که دارای بارهای مثبت و منفی هستند و در لابه‌لای ذرات سیلیس قرار می‌گیرند، باید چسبندگی لازم را برای ماسه تأمین کنند زیرا این بارها مختلف‌العلامه هستند و یکدیگر را جذب می‌کنند).

باید توجه داشت که عمل یونیزاسیون در داخل آب و رطوبت ماسه انجام می‌شود، لذا کنترل آن اهمیت زیادی دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که خاک رس در آب و رطوبت ماسه فعال می‌شود.

وسایل موردنیاز:

- ۱- بشر یک لیتری
- ۲- هم‌زن الکتریکی و سیفون
- ۳- ظرف محتوی آب گرم
- ۴- قیف و کاغذ صافی
- ۵- ترازوی دقیق و حساس
- ۶- تایمر
- ۷- سیفون

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

ابتدا  $475^{\circ}C$  آب مقطر  $25^{\circ}C$  را داخل بشر یک لیتری ریخته، سپس  $5^{\circ}C$  گرم ماسه‌ی خشک به آن اضافه می‌کنیم (عمل خشک کردن ماسه باید به مدت یک ساعت و در دمای بین  $105^{\circ}C$  تا  $110^{\circ}C$  انجام گیرد. در چنین شرایطی لازم است سطح تبخیر زیاد باشد.) با اضافه کردن  $25^{\circ}C$  محلول سود سوزآور (NaOH) یا محلول تتراسدیم پیروفسفات  $1/5\%$  ( $Na_2OP_3O_5$ ) حجم مایع بشر را به  $50^{\circ}C$  می‌رسانیم. (اضافه کردن این ترکیبات به منظور جلوگیری از بهم چسبیدن ذرات ماسه است.) اکنون مایع بشر را وارد دستگاه شست‌وشوی ماسه (شکل ۵-۱) کرده و در آن را محکم می‌بندیم. حال باید دستگاه را به مدت یک ساعت با سرعت  $60^{\circ}$  دور در دقیقه به چرخش درآوریم. بعد از این عمل، مایع را وارد بشر کرده و با افزودن آب در بشر، سطح آن را تا ارتفاع  $15^{\circ}$  میلی‌متر بالا می‌آوریم. سپس بشر را روی سطح صاف و

ب) برای رسم نمودار نحوه‌ی توزیع ذرات ماسه، دو محور عمود بر هم انتخاب کرده و روی محور افقی ضریب الک (a<sub>i</sub>) و روی محور قائم درصد باقی‌مانده‌ی ماسه روی هریک از آن‌ها (g<sub>i</sub>) را منتقل می‌کنیم. سپس به کمک نوارهای ستونی مستطیل شکل این نمودار را مطابق شکل ۴-۱ رسم می‌نماییم.

در حقیقت عددریزی دانه می‌تواند تجسمی از میانگین اندازه‌ی دانه‌های یک ماسه بدهد که به کمک آن می‌توان مقایسه‌ای بین ماسه‌های مختلف به عمل آورد.

این مطلب برای تنظیم ماسه‌ی ذخیره شده، یا ماسه‌ی در گردش یک کارخانه‌ی ریخته‌گری حائز اهمیت است. هم‌چنین عددریزی دانه، تا حدودی برای کمیت‌های مختلف ماسه نظیر: پخش دانه‌های ماسه، نفوذپذیری و قابلیت عبور گاز مفید است.

**توضیح:** در مورد ماسه‌هایی که دارای خاک رس هستند، برای محاسبه و تعیین عددریزی دانه ابتدا باید ماسه کاملاً شسته شود و خاک رس آن جدا گردد، سپس ماسه‌ی بدون خاک رس در درجه حرارت و زمان معین و مناسب حرارت داده شود و خشک گردد. بعد از این مرحله می‌توان مبادرت به آزمایش جدا کردن با الک یا غربال نمود.

چنان‌چه چند ماسه، دارای شکل‌های متفاوتی در دانه‌های تشکیل‌دهنده‌ی خود داشته باشند. (مثلاً گرد یا گوشه‌دار باشند) با این‌که عددریزی یکسانی دارند، به احتمال زیاد دارای پخش و توزیع دانه‌ی برابری نبوده و متفاوت هستند.

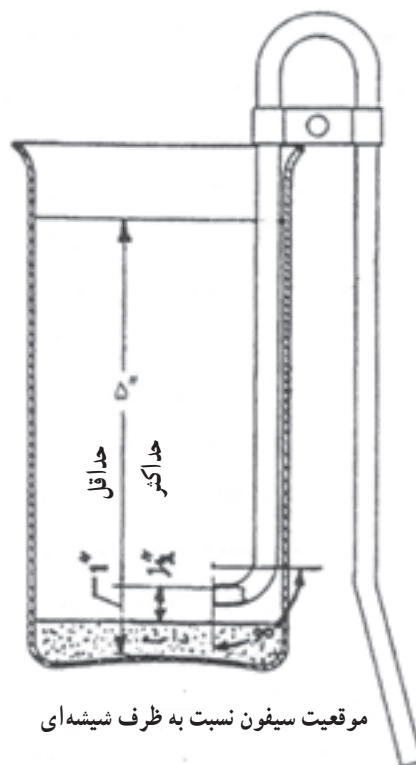
**تمرین:** آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه آن را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.

۲-۲-۱- آزمایش تعیین درصد خاک ماسه: خاک

محتوی ماسه که عامل چسبندگی ذرات ماسه است تأثیر زیادی روی خواص فیزیکی ماسه از جمله: استحکام تر، استحکام خشک و قابلیت نفوذ گاز دارد. در حقیقت رطوبت کافی ماسه (آب فیزیکی) عامل یونیزه شدن آب تبلور (آب ملکولی) خاک

تراز یک میز قرار داده و به مدت ۱۰ دقیقه (توسط تایمر) اجازه می‌دهیم تا ذرات ماسه رسوب کنند. در چنین وضعی ذرات خاک معلق خواهند بود و می‌توانیم با یک سیفون که ارتفاعش ۱۲۵ میلی‌متر است مایع بشر را تخلیه کنیم. مجدداً به بشر آب اضافه می‌کنیم و پس از بهم زدن ۱۰ دقیقه‌ی دیگر صبر می‌کنیم تا ذرات ماسه‌ی باقی‌مانده رسوب کند. با ادامه‌ی این کار در بار سوم شفافیت مایع را بیشتر می‌کنیم. و آن‌قدر این کار را ادامه می‌دهیم تا مایع بشر کاملاً شفاف و زلال شود. نهایتاً با خارج کردن ماسه روی فیلتر با دقت ذرات ماسه را خشک کرده و با ترازوی حساس ۰/۰۱ گرم جرم ماسه‌ی روی کاغذ صافی را تعیین می‌نماییم و به کمک آن با تشکیل یک تناسب درصد خاک ماسه را محاسبه می‌کنیم.

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه مختلف انجام داده و نتیجه آن را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.



موقعیت سیفون نسبت به ظرف شیشه‌ای

شکل ۵-۱- یک نوع هم‌زن الکتریکی و سیفون، تایمر و ظرف شیشه‌ای (بشر)

در نتیجه بر اثر فشرده شدن ماسه و نزدیک شدن ذرات به یکدیگر استحکام ماسه افزایش می‌یابد.

خلاصه این‌که، رطوبت، قابلیت قالب‌گیری را بالا می‌برد. ولی اگر مقدار آن از حد معینی بیش‌تر شود استحکام ماسه را کاهش می‌دهد. از این‌رو کنترل و تنظیم میزان درصد آب ماسه خیلی مهم است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، در واقع وجود یون‌های آب تبلور خاک رس در داخل آب (رطوبت) عامل اصلی چسبندگی ذرات ماسه و در نتیجه استحکام و سفتی ماسه می‌باشد.

#### وسایل مورد نیاز:

- ۱- شیشه ساعت آزمایشگاهی ۶ سانتی‌متری
- ۲- کوره‌ی الکتریکی کوچک (شکل ۱-۶)
- ۳- ترازوی دقیق ۲۰ میلی‌گرمی
- ۴- دسیکاتور (دستگاه خشک‌کن) (شکل ۱-۷)

۳-۲-۱- آزمایش‌های تعیین رطوبت ماسه: از آن‌جا که مقدار رطوبت در بسیاری از خواص قالب مانند امکان تولید بخار، استحکام، امکان متلاشی شدن و غیره تأثیر دارد، مقدار رطوبت ماسه، نباید از حد معینی بیشتر شود؛ برعکس چون کاهش مقدار رطوبت نیز باعث از هم‌پاشیدگی و کاهش شکل‌پذیری قالب می‌گردد تعیین مقدار مناسب رطوبت لازم است. ریخته‌گران با تجربه به سهولت میزان این رطوبت را تخمین می‌زنند ولی در کارهای بزرگ و موارد مصرف زیاد، تعیین رطوبت ماسه از اهمیت زیاد برخوردار است و نمی‌توان تنها به تجربه متکی بود.

رطوبت عبارت است از آب موجود در ماسه به میزان ۱/۵ تا ۸ درصد که با حضور خاک رس باعث بالا رفتن خاصیت شکل‌پذیری<sup>۱</sup> (پلاستیسیته) و استحکام‌تر<sup>۲</sup> ماسه می‌شود. خاک رس آب و رطوبت ماسه را جذب می‌کند و به حد اشباع می‌رسد،



شکل ۱-۶- کوره‌ی خشک‌کن الکتریکی



شکل ۱-۲- دسیکاتور

### نحوه‌ی اجرای آزمایش:

آن عمل خشک کردن ماسه‌ی مرطوب، توسط گرما و انرژی تشعشعی یک لامپ مادون قرمز، در مدت کوتاه ۳ دقیقه انجام می‌گیرد. ممکن است کفه، مستقیماً به یک ترازو مربوط شود و اندازه‌گیری جرم توسط آن مقدور گردد. این روش به دقت روش قبل نیست ولی چون مدت آزمایش کوتاه و حدود چند دقیقه می‌باشد. در کارخانجات ریخته‌گری از آن استقبال شده است چنانچه جرم‌های اندازه‌گیری شده قبل و بعد از خشک کردن ماسه‌ی نمونه (برحسب گرم) به ترتیب برابر  $m$  و  $m_1$  باشد در این صورت درصد رطوبت ماسه ( $-W$ ) برابر است با:

$$-W = \frac{m - m_1}{m} \times 100$$

از طرفی چون جرم ماسه‌ی مرطوب ( $m$ ) ۵۰ گرم است،

لذا:

$$-W = \frac{50 - m_1}{50} \times 100 \Rightarrow -W = 2 \times \text{جرم}$$

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه با میزان رطوبت مختلف انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.

درصد رطوبت ماسه عبارت است از نسبت جرم آب موجود در مقدار معینی ماسه، به جرم کل ماسه، ضرب در صد. در آزمایش معمولاً حدود تقریبی ۵۰ گرم ماسه‌ی مخلوط را توسط یک ظرف نمونه‌گیر تمیز و خشک (شیشه ساعت آزمایشگاهی) به کمک ترازوی دقیق توزین و جرم مجموعه را به دقت تعیین می‌نماییم. بعد از این مرحله، عملیات خشک کردن ماسه را در کوره‌ی الکتریکی کوچک یا آون انجام می‌دهیم. دمای کوره باید بین محدوده‌ی ۱۰۵ تا ۱۱۰ C باشد.

زمان حرارت دادن ۲ ساعت است و بعد از مرحله‌ی خشک کردن، نمونه را داخل دستگاه دسیکاتور می‌گذاریم تا دمای آن کاهش یافته و به دمای محیط برسد. دسیکاتور باید مجهز به یک پنکه‌ی تخلیه باشد تا بخار آب حاصل را از محیط خارج کند. پس از آن جرم نمونه را مجدداً با همان ترازو و به دقت تعیین می‌کنیم. کاهش جرم، معادل جرم آبی است که در مخلوط ماسه وجود داشته است.

روش دیگری برای تعیین رطوبت ماسه وجود دارد که در





شکل ۸-۱- دستگاه نمونه‌ساز (کوبه‌ی آزمایشگاهی) استاندارد برای آزمایش استحکام ماسه

فشار ماسه در حالت تر بین ۵ تا ۲۲ P.S.I<sup>۲</sup> که بستگی به نوع ماسه دارد تغییر می‌کند. این فشار در حقیقت مشخص‌کننده‌ی استحکام فشاری تر ماسه است. شکل ۹-۱ نمونه‌ای از دستگاه آزمایش استحکام ماسه را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۱- دستگاه اندازه‌گیری استحکام ماسه

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.

#### ۴-۲-۱- آزمایش استحکام فشاری تر: ماکزیمم

تنش فشاری نمونه برحسب PSI که یک نمونه‌ی معین از ماسه‌ی تر با ابعاد مشخص و استاندارد می‌تواند تحمل کند و گسیخته نشود «استحکام فشاری تر آن» نمونه نامیده می‌شود در عمل برای تعیین این استحکام ابتدا نمونه‌ای تهیه کرده و آن را با کوبیدن متراکم می‌کنند. سپس نمونه را (استوانه‌ی استاندارد) در امتداد طول، تحت نیروی فشاری قرار می‌دهند تا گسیخته<sup>۱</sup> شود. عواملی چون مقدار خاک و سایر چسب‌ها، مقدار رطوبت و اندازه ذرات در استحکام فشاری تر ماسه مؤثر می‌باشند.

#### وسایل مورد نیاز:

۱- استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه

۲- دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد

۳- دستگاه اندازه‌گیری استحکام ماسه

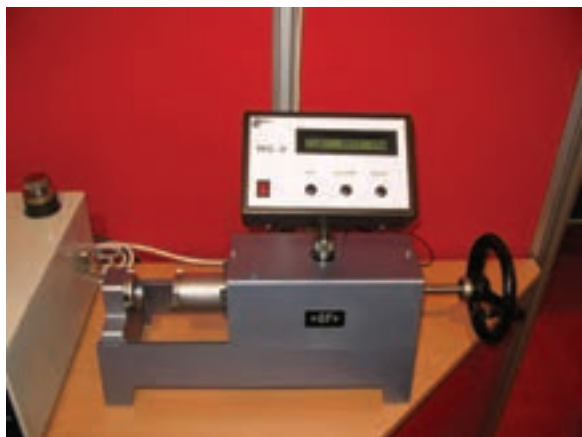
#### نحوه‌ی اجرای آزمایش:

ابتدا نمونه‌ای استوانه‌ای به قطر ۲ اینچ (۵/۰۸ سانتی‌متر) و به ارتفاع ۲ اینچ توسط استوانه‌ی استاندارد می‌سازیم. برای ساختن نمونه معمولاً ۱۴۵ تا ۱۷۵ گرم ماسه را در استوانه (لوله یا سیلندر)ی استاندارد ریخته و سپس به وسیله‌ی دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد ضربه‌ای (معمولاً ۳ ضربه) تا ارتفاع ۲ اینچ، که در دستگاه نیز مشخص گردیده است آن را می‌کوبیم (شکل ۸-۱). بعد از تهیه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ای، آن را در دستگاه آزمایش استحکام ماسه قرار می‌دهیم. این دستگاه دارای دو کفه‌ی دایره‌ای تخت است که به سهولت در امتداد محور بین آن‌ها قرار می‌گیرد. با چرخش اهرم دستگاه، دو کفه‌ی دایره‌ای (مانند دو فک) به نمونه فشار وارد می‌کند.

۱ - Rupture

۲ - Specimen-tube

کج و معوج نباشد و تاب بر ندارد) گذاشته و به داخل یک کوره‌ی گرم‌کن قرار می‌دهیم، سپس نمونه‌ها را تا دمای بیشتر از  $105^{\circ}\text{C}$  و کمتر از  $110^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت پخته و خشک می‌کنیم. سپس نمونه‌ها را وارد دسیکاتور کرده و آن‌ها را تا دمای محیط سرد و خنک می‌کنیم. بعد از اجرای مراحل مذکور، نمونه‌ها را توسط دستگاه آزمایش استحکام ماسه (شکل ۱۱-۱) تحت فشار قرار می‌دهیم. سرعت وارده توسط دستگاه به هر نمونه باید بین  $120$  تا  $160$  P.S.I./min یعنی  $83/0$  تا  $1/1$  مگا پاسکال بر دقیقه (mpa/min) باشد. در چنین وضعیتی فشار نشان داده شده‌ی دستگاه مشخص‌کننده‌ی استحکام فشاری خشک ماسه خواهد بود. این استحکام فشاری بین  $20$  تا  $250$  PSI ( $14/0$  تا  $17/0$  mpa/min) که بستگی به نوع ماسه دارد تغییر می‌کند (در مورد ماسه‌های سخت شده توسط چسب سیلیکات سدیم و گاز  $\text{CO}_2$  این استحکام در شرایط مناسب به  $300$  P.S.I تقریباً به ۲ مگا پاسکال نیز می‌رسد)



شکل ۱۱-۱- دستگاه آزمایش استحکام ماسه

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.

## ۵-۲-۱- آزمایش استحکام فشاری خشک:

استحکام فشاری خشک کاملاً مانند استحکام فشاری تر تعریف می‌شود؛ با این تفاوت که استحکام ماسه، در حالت خشک و پخته شده مورد نظر است.

وسایل مورد نیاز:

۱- استوانه‌ی استاندارد آماده سازی نمونه

۲- دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد

۳- دستگاه اندازه‌گیری استحکام ماسه

۵- صفحه‌ی صافی توپر

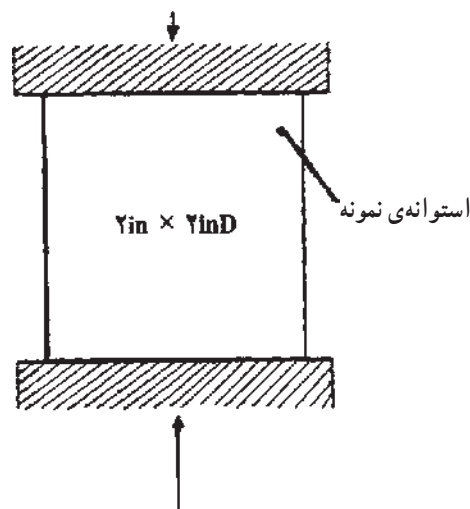
۶- کوره‌ی گرم‌کن (اون)

۷- دسیکاتور

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

بعد از تهیه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ای به قطر ۲ اینچ و ارتفاع

۲ اینچ (شکل ۱۰-۱) (بهتر است چند نمونه گرفته شود تا در صورت خراب شدن یا شکستن تعویض شود) مانند آزمایش ۴ آن‌ها را روی یک صفحه‌ی فلزی توپر، صاف و محکم (صفحه



شکل ۱۰-۱- نمونه استاندارد فشاری و نیروهای وارد بر آن

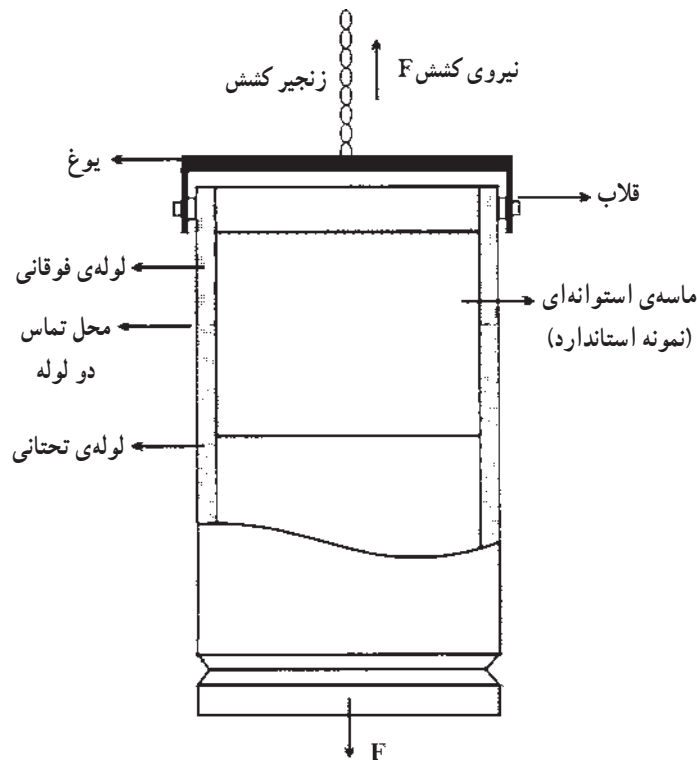
۶-۲-۱- آزمایش استحکام کششی تر: این استحکام عبارت است از حداکثر تنش کششی یک نمونه (نمونه‌ی کششی ماسه‌ای استاندارد) در حالت مرطوب تا مرحله‌ی گسیخته شدن. این استحکام بر حسب P.S.I تعیین می‌شود.

وسایل مورد نیاز:

- ۱- استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه‌ی دو تکه
- ۲- دستگاه نمونه‌ساز (کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد)

۳- دستگاه استحکام کششی  
نحوه‌ی اجرای آزمایش:

لوله یا استوانه‌ی استاندارد نمونه در این آزمایش، مطابق شکل ۱۲-۱ دو تکه است و نمونه در داخل دو استوانه‌ی بالایی و پایینی تحت کشش قرار می‌گیرد. هنگام شکست و گسیخته شدن نمونه، دو استوانه‌ی مذکور در قسمت وسط از هم جدا می‌شوند.



شکل ۱۲-۱- تعیین استحکام کششی ماسه‌ی تر

استحکام کششی ماسه‌های تر حدود ۱ تا ۶ پوند بر اینچ مربع یا ۶/۹ تا ۴۱/۵ کیلو پاسکال است (بستگی به ترکیب و نوع ماسه دارد).

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.

در این آزمایش حداکثر سرعت عمل کشش ۴۰ و حداقل ۲۰ اونس<sup>۱</sup> بر اینچ مربع در هر دقیقه است (۴۳/۰ ± ۱/۲۹ نیوتن بر سانتی متر مربع<sup>۲</sup> N/Cm<sup>۲</sup>). چنانچه ملاحظه می‌شود استحکام مخلوط ماسه برای کشش کم می‌باشد. برای تعیین استحکام کششی مخلوط‌های ماسه که استحکام زیادی دارند از روش تعیین استحکام ماهیچه‌های پخته شده استفاده می‌کنند.

۱ - Ounce

۱۶٪ افزایش یابد استحکام کششی خشک حدود ۱۱۰٪ خواهد بود. (در مورد استحکام کششی تر این افزایش حدود ۱۶۰٪ است).

بعد از تهیه‌ی نمونه‌ی استاندارد (قالب‌گیری و پخته شده) آن را روی دستگاه آزمایش کشش تنن قرار می‌دهیم و استحکام کششی آن را اندازه می‌گیریم. شکل‌های ۱-۱۴ و ۱-۱۵ فک‌های دستگاه و نحوه‌ی اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه را نشان می‌دهند.



شکل ۱-۱۴- فک‌های دستگاه کشش



شکل ۱-۱۵- نحوه‌ی اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

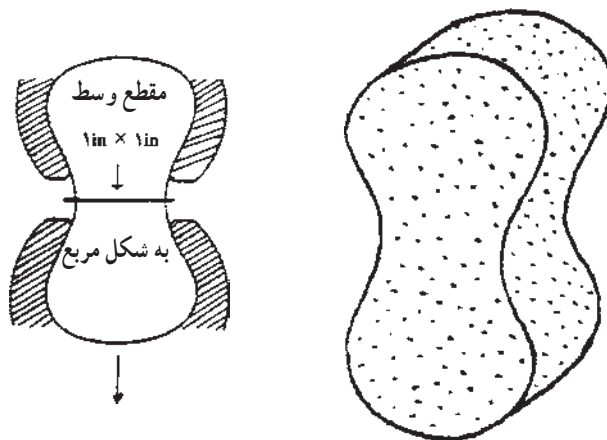
۷-۲-۱- آزمایش استحکام کششی خشک برای ماهیچه‌های پخته شده: این استحکام نیز عبارت از حداکثر تنش کششی (بر حسب P.S.I) است که یک نمونه می‌تواند تا مرحله‌ی شکستن تحمل کند.

وسایل مورد نیاز:

- ۱- جعبه‌ی ماهیچه‌ی نمونه‌ی فلزی
- ۲- کوره‌ی ماهیچه خشک‌کنی (گرم‌خانه)
- ۳- دسیکاتور
- ۴- دستگاه آزمایش کشش نمونه

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

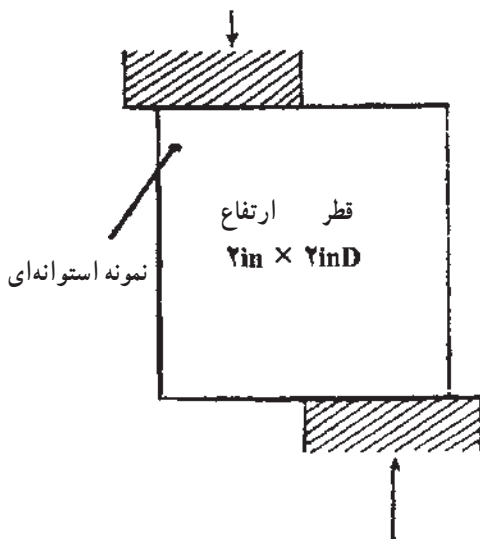
ابتدا مخلوط ماسه را آماده می‌کنیم و سپس به کمک جعبه‌ی قالب‌گیری نمونه یک یا چند نمونه را قالب‌گیری و تهیه می‌نماییم. نمونه را در دمای  $25^{\circ}C$  و به مدت ۳۰ ثانیه پخته و در دسیکاتور تا دمای محیط خنک می‌کنیم. ابعاد استاندارد این نمونه، در شکل ۱-۱۳ نشان داده شده است.



نمونه‌ی کششی استاندارد

شکل ۱-۱۳- نمونه‌ی استاندارد کششی و نیروهای وارد بر آن

لازم به توضیح است که با افزایش درصد خاک رس استحکام ماسه زیاد می‌شود. مثلاً اگر درصد خاک رس ۱۰٪ به



شکل ۱۶-۱ الف - نمونه استاندارد برشی و نیروهای وارد بر آن



شکل ۱۶-۱ ب

**توضیح:** نسبت استحکام برشی خشک به استحکام فشاری خشک کمیتی است که در تهیه و آماده‌سازی ماسه‌ی ریخته‌گری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به طوری که اگر این نسبت از حد معینی کمتر باشد نشان آماده نبودن و به عمل نیامدن ماسه است و اگر بیش از آن حد معین باشد، نشانگر بالا بودن درصد مواد افزودنی به ماسه است.

**تمرین:** آزمایش استحکام برشی تر و خشک را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

## ۸-۲-۱- آزمایش‌های استحکام برشی ماسه:

استحکام برشی ماسه نیز مانند استحکام فشاری و کششی تعریف می‌شود: استحکام برشی ماسه عبارت است از حداکثر تنش برشی که نمونه‌ی استاندارد می‌تواند تا مرحله‌ی برش و گسیخته‌شدن تحمل کند. این تنش نیز برحسب پوند بر اینچ مربع بیان می‌شود: آزمایش استحکام برشی به دو صورت تر و خشک انجام می‌شود.

وسایل مورد نیاز:

۱- استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه

۲- دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد

۳- دستگاه اندازه‌گیری استحکام ماسه

۴- صفحه‌ی صافی توپر

۵- کوره‌ی گرم‌کن (اون)

۶- دسیکاتور

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

**الف - استحکام برشی تر:** در این آزمایش پس از

تهیه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ی (با قطر و ارتفاع ۲ اینچ) تنش برشی توسط ماشین مربوطه به نمونه اعمال می‌شود. (شکل ۱۶-۱ الف) در نتیجه نمونه بریده و گسیخته می‌گردد. سرعت عمل نیروی برش توسط دستگاه بین ۱۹ تا ۲۹ PSI در دقیقه است. در این آزمایش استحکام برشی تر حدود ۱/۵ تا ۷ PSI است. (شکل ۱۶-۱ ب) فک‌های برش را نشان می‌دهد.

**ب - استحکام برشی خشک:** در آزمایش استحکام

خشک، نمونه‌های استاندارد ابتدا در درجه حرارت  $110^{\circ}C$  تا  $105^{\circ}C$  به مدت ۲ ساعت خشک می‌شود و سپس در یک دسیکاتور تا دمای محیط خنک می‌گردد. پس از این مرحله می‌توان نمونه‌های تهیه شده را، در ماشین مربوطه مورد آزمایش قرار داد و استحکام آن‌ها را اندازه‌گیری کرد.

معین و در تحت فشار ثابت اندازه‌گیری می‌کنند. این سرعت در واقع می‌تواند مشخص‌کننده‌ی توانایی خروج گاز از ماسه باشد. آزمایش شماره ۹ این مطلب را روشن می‌کند.

وسایل مورد نیاز:

- ۱- استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه
- ۲- دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد
- ۳- دستگاه تعیین قابلیت نفوذ ماسه (مجهز به استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه) (شکل ۱۷-۱).

۹-۲-۱- آزمایش قابلیت نفوذ گاز: یکی از عوامل مهم در تولید قطعات ریختگی سالم قابلیت نفوذ گاز از ماسه یا نفوذپذیری ماسه است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد دانه‌بندی و پخش ذرات ماسه، نقش مهمی در خروج گازهای محلول در مذاب، هوای قالب، بخار آب و غیره دارد، لذا کنترل و تعیین قابلیت نفوذ گاز، می‌تواند نتایج بسیار مفیدی برای کیفیت قطعات ریختگی داشته باشد.

برای تعیین این قابلیت معمولاً سرعت خروج هوا از یک نمونه‌ی ماسه‌ای را برحسب سانتی‌متر مکعب در دقیقه در زمان



شکل ۱۷-۱- یک نوع دستگاه تعیین قابلیت نفوذ گاز

مربع عبور می‌کند قابلیت نفوذ گاز آن ماسه است. بنابراین اگر حجم هوای عبوری  $V$ ، ارتفاع نمونه‌ی ماسه‌ای (استوانه‌ی استاندارد)  $H$ ، سطح مقطع نمونه  $A$ ، فشار وارد بر هوای عبوری  $P$  و مدت زمان عبور هوا  $T$  (دقیقه) باشد، در این

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

حجم هوایی (برحسب  $CC$ ) که در مدت یک دقیقه با فشار یک گرم نیرو بر سانتی‌متر مربع ( $1^\circ CC$  آب) از درون یک نمونه‌ی ماسه‌ای به ارتفاع ۱ سانتی‌متر و سطح مقطع یک سانتی‌متر

صورت قابلیت نفوذ گاز در این ماسه (K)، با H و V نسبت مستقیم، ولی با P و A و T نسبت معکوس دارد. به عبارت ریاضی می توان نوشت.

$$K = \frac{V.H}{P.A.T}$$

در استاندارد جامعه‌ی ریخته‌گران آمریکا (A.F.S) با در نظر گرفتن مقادیر استاندارد، می توان رابطه‌ی اخیر را به صورت زیر ساده کرد؛ چون قطر استوانه‌ی استاندارد نمونه، اینچ  $D=2$  و ارتفاع آن H، نیز برابر ۲ اینچ است. لذا خواهیم داشت:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.14 \times (2 \times 2 / 54)^2}{4} = 20.68 \text{ cm}$$

سطح مقطع استوانه‌ی نمونه

$$H = 2 \times 2 / 54 = 5 / 0.8 \text{ cm}$$

ارتفاع استوانه‌ی نمونه

از طرفی مطابق استاندارد مذکور V(AFS) برابر است با ۱۲۲ اینچ مکعب، و فشار هوای عبوری  $P=10 \text{ cmHg}_O$  زمان عبور هوا (T) برحسب ثانیه است، به این ترتیب می توان نوشت:

$$V = 122 \text{ in}^3 = 122 \times (2 / 54)^3 \\ = 1999 / 22 \text{ cm}^3 = 2000 \text{ cm}^3 (2 \text{ lit})$$

حجم هوای عبوری از ماسه

اگر T برحسب دقیقه منظور شود، مقدار K (قابلیت نفوذ

گاز ماسه) چنین است:

$$K = \frac{V.H}{P.A.T} = \frac{2000 \times 5 / 0.8}{10 \times 20 / 268 \times T} = \frac{2000 \times 5 / 0.8}{10 \times 20 / 268} \times \frac{1}{T}$$

حجم هوای عبوری از ماسه

و یا

$$K = \frac{50 / 12}{T}$$

چنانچه T برحسب ثانیه بیان شود رابطه‌ی K چنین است:

$$K = \frac{50 / 12}{T} \times 60 \Rightarrow K = \frac{3007 / 2}{T}$$

همان طور که ملاحظه می شود قابلیت نفوذ گاز تابعی است

از زمان T، لذا در دستگاه تعیین قابلیت نفوذ (مطابق شکل ۱۷-۱)

صفحه‌ی اندازه گیری برحسب معکوس زمان T در مقدار ثابت

$3007 / 2$  (مطابق استاندارد AFS) مدرج شده است. لذا پس از

قراردادن نمونه‌ی استاندارد در این دستگاه، زمان لازم و عدد

قابلیت نفوذ گاز در ماسه به طور اتوماتیک روی دستگاه خوانده

می شود.

یادآوری می شود که هر چه زمان T کمتر باشد، مفهوم آن

این است که حجم گاز عبوری در شرایط استاندارد آزمایش

بیشتر است، به عبارت دیگر قابلیت نفوذ گاز از ماسه بیش تر

است.

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده

نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

## آزمایشگاه متالورژی مکانیکی آزمایش‌های خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از هنرجو انتظار می‌رود که:

- ۱- خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها را توضیح دهد.
- ۲- تنش کشش (مقاومت به کشش) فلزات و آلیاژها را توضیح دهد و به وسیله‌ی ماشین تنش کششی، اندازه‌ی این مقاومت را از طریق آزمایش تعیین کند.
- ۳- تنش فشاری یا مقاومت به فشار فلزات و آلیاژها را توضیح دهد و با اجرای آزمایش مربوطه، این تنش را مشخص کند.
- ۴- سختی اجسام را توضیح دهد و سختی فلزات و آلیاژها را با روش‌های: برینل، راکول و ویکرز تشریح کند. همچنین آزمایش‌های این روش‌ها را انجام دهد.
- ۵- مقاومت به ضربه‌ی فلزات و آلیاژها را با روش «شارپی» و «آیزود» توضیح دهد و اندازه‌ی این مقاومت را تعیین کند.
- ۶- خواص مکانیکی چند نوع چدن (نشکن، خاکستری و مالی بل) را بررسی کند.

### ۲- خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها

مثلاً افزایش طول یک میله ( $\Delta l = l - l_0$ ) تحت تأثیر یک

نیروی کششی خارجی ( $F$ ) با مقدار این نیرو و طول اولیه ( $l_0$ ) نسبت مستقیم و با سطح مقطع مؤثر ( $A$ ) نسبت معکوس دارد. بنابراین مطابق شکل ۱-۲ می‌توان نوشت:

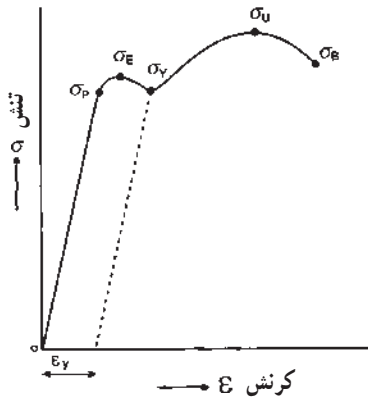
$$\Delta l = K \frac{l \times F}{A}$$

که در آن  $K$  ضریب تناسب بوده و خواص ارتجاعی جنس میله‌ی فلزی را مشخص می‌کند. رابطه‌ی فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

همان‌طور که در درس شناخت فلزات توضیح داده شده است، هنگامی که یک قطعه‌ی نمونه‌ی فلزی تحت تأثیر نیروهای خارجی (مثلاً کششی یا فشاری) قرار گیرد، تغییر شکل می‌دهد. اگر پس از حذف این نیروها ابعاد قطعه به اندازه‌های اولیه‌ی خود بازگشت نماید، تغییر شکل را ارتجاعی (الاستیک) می‌نامند. در صورتی که نیروهای وارد بر قطعه در حد ارتجاعی باشند با تغییر شکل آن متناسب خواهند بود.



اگر مقادیر کرنش و تنش وارد بر قطعه‌ی نمونه را در هر لحظه؛ روی صفحه مختصات دو بعدی (محور افقی کرنش و محور قائم تنش) منتقل نماییم و نقاط به دست آمده را به هم وصل کنیم منحنی تغییرات تنش وارد بر قطعه، بر حسب کرنش به دست خواهد آمد (شکل ۲-۲).

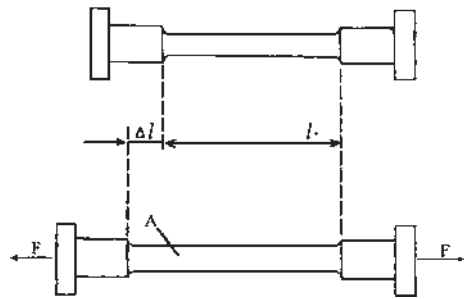


شکل ۲-۲- دیاگرام کششی یک قطعه‌ی نمونه

در روی منحنی دیاگرام، نقاطی مشخص شده‌اند که مربوط به مقادیر تنش‌هایی به شرح زیر هستند.

**الف) حد تنش تناسب  $\sigma_p$ :** این مقدار حد تنشی است که اگر به قطعه اعمال شود کرنشی متناسب با آن ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر می‌توان گفت اگر تنش تا این حد به قطعه اثر کند در صورت حذف آن تنش، طول جسم به اندازه‌ی اولیه برمی‌گردد. از این نظر چون تغییرات طول نسبی (کرنش) متناسب با نیرو است، منحنی در فاصله‌ی  $\sigma_p$  تا  $\sigma_E$  به شکل خط راست است باید دانست که قانون هوک فقط در این فاصله صادق است.

**ب) حد تنش ارتجاعی  $\sigma_E$ :** این نقطه نمایانگر حداکثر مقدار تنشی است که پس از حذف آن، جسم می‌تواند به حالت اولیه برگردد. ولی این تنش متناسب با کرنش نیست (تنش‌های مربوط به نقاط از  $\sigma_p$  تا  $\sigma_E$ ) بنابراین حد تنش ارتجاعی، تنشی است که برای کم‌تر از آن جسم تغییر شکل موقتی و برای بیشتر از آن تغییر شکل دائمی می‌دهد.



شکل ۲-۱- افزایش طول میله‌ی فلزی تحت تأثیر نیروی کشش در حد ارتجاعی (کشسان)

$$\frac{F}{A} = \frac{1}{K} \times \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

نسبت  $\frac{F}{A}$  را با  $\sigma$  نمایش می‌دهند و آن را تنش<sup>۱</sup> میله می‌نامند (نیروی وارد بر واحد سطح). معمولاً تغییر شکل میله‌ها با طول و سطح مقطع معینی (استاندارد شده) از روی کمیتی به نام تغییر طول نسبی یا کرنش<sup>۲</sup> (تغییر طول به ازای هر واحد طول) یعنی  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  مشخص می‌گردند.

ضریب  $\frac{1}{K}$  را با E نمایش می‌دهند و به آن ضریب ارتجاعی (مدول الاستیسیته) یا ضریب «یانگ»<sup>۳</sup> می‌گویند. با توجه به نکات اخیر، رابطه‌ی (۱) را می‌توان به صورت رابطه‌ی ساده‌ی زیر تبدیل کرد.

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

که در آن هم  $\sigma$  و هم E بر حسب  $\text{kgf}/\text{m}^2$  یا  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  بیان می‌شوند (واحد عملی). واحد عملی (SI) برای این دو کمیت عبارت است از نیوتن بر متر مربع یا کیلو نیوتن بر متر مربع ( $\text{N}/\text{m}^2$  یا  $\text{kN}/\text{m}^2$ ) به طوری که می‌توان نوشت:

$$1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 98 / 0.665 \text{ kN}/\text{m}^2 \approx 100 \text{ kN}/\text{m}^2$$

$\varepsilon$  فاقد واحد است چون نسبت دو کمیت هم واحد  $\sigma$  و E می‌باشد.

رابطه‌ی اخیر ( $\sigma$ ) در واقع بیان ریاضی قانون هوک<sup>۴</sup> می‌باشد (متناسب بودن تنش با ازدیاد طول نسبی)

گسیخته شدن)  $I_B$  فرض شود در این صورت خواهیم داشت :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_B - l_0}{l_0} \times 100\%$$

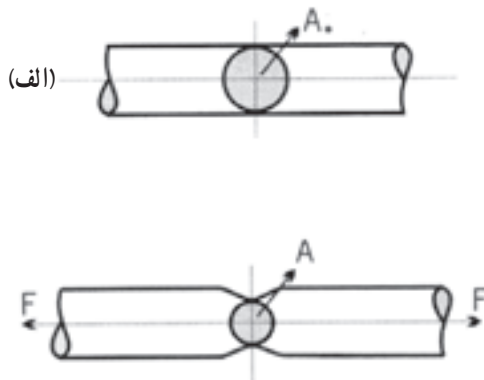
کرنش برحسب درصد

در مورد اغلب فلزات و آلیاژها قطعه‌ی نمونه قبل از گسیخته شدن، در یک ناحیه باریک شده (شکل ۲-۴) و با ادامه‌ی عمل کشش در باریک‌ترین مقطع پاره می‌شود. اگر سطح مقطع اولیه  $A_0$  و سطح مقطع باریک شده  $A$  باشد، درصد کاهش سطح مقطع نسبی قطعه چنین خواهد بود.

$$S = \frac{\Delta A}{A_0} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$$

درصد کاهش سطح مقطع نسبی

به طور کلی فلزات و آلیاژهایی که تحت تأثیر نیروهای خارجی هم ازدیاد طول و هم کاهش سطح مقطع بیشتری داشته باشند قابلیت مفتول شدن و تورق یا چکش‌خواری<sup>۲</sup> زیادتری خواهند داشت (مانند برنج نرم) و برعکس اگر این تغییرات در آن‌ها کمتر باشد شکننده تر و همچنین سخت تر خواهند بود. (مانند چدن خاکستری). کاهش سطح مقطع در مورد آلیاژهای سخت تقریباً صفر است.



شکل ۲-۴- تقلیل سطح مقطع<sup>۲</sup> تحت تأثیر نیروی کشش  $F$  (الف) قبل از کشش (ب) بعد از کشش

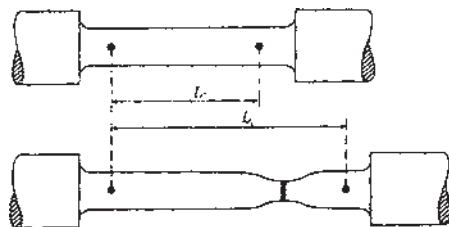
مثال: یک قطعه‌ی نمونه با مقطع گرد و طول اولیه‌ی ۷۶ میلی‌متر و قطر ۵ میلی‌متر تحت تأثیر نیروی کششی قرار گرفته

(ج) نقطه‌ی تسلیم  $\sigma_Y$ : در این نقطه، تنش وارد بر جسم، باعث تغییر شکل دائمی آن می‌شود، یعنی در صورت حذف این تنش، دیگر طول جسم به حال اولیه بر نمی‌گردد. بلکه به اندازه‌ی  $\Delta l_Y$  متناسب با کرنش  $(\varepsilon_Y = \frac{\Delta l_Y}{l_0})$  افزایش می‌یابد. (شکل ۲-۲)

با این تعریف معلوم می‌شود که تمام نقاط بعد از حد ارتجاعی  $(\sigma_E)$  تا گسیخته شدن و پاره شدن جسم  $(\sigma_B)$  نقاط تسلیم می‌باشند. ولی در عمل معمولاً نقطه‌ی تسلیم را نقطه‌ای انتخاب می‌کنند که ازدیاد طول نسبی (تغییر شکل) ایجاد شده در اثر این تنش در محور افقی برابر ۰/۲ درصد باشد.

(د) حداکثر تنش کششی  $\sigma_U$ : در این نقطه تنش کششی وارد به جسم به بیش‌ترین مقدار رسیده است و از این نقطه به بعد با توجه به این که تنش کششی کاهش یافته باز هم ازدیاد طول ایجاد خواهد شد. به همین علت این مقدار مربوط به نقطه‌ی ماکزیمم منحنی خواهد بود.

(ه) حد گسیختگی یا پارگی  $\sigma_B$ : اگر عمل کشش باز هم ادامه پیدا کند، طول جسم افزوده می‌گردد و بالاخره به ازای یک تنش معینی  $(\sigma_B)$  جسم گسیخته و دو قسمت خواهد شد. (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- یک قطعه‌ی نمونه‌ی استاندارد با مقطع گرد، قبل و بعد از کشش (تا مرحله‌ی گسیختن)

۲-۱- درصد ازدیاد طول نسبی<sup>۱</sup> و درصد کاهش سطح مقطع نسبی: معمولاً کرنش را برحسب درصد تعیین می‌کنند. اگر طول اولیه  $l_0$  و طول بعد از تغییر شکل (مثلاً هنگام

است. در صورتی که طول آن بعد از کشش به ۹۵/۸ میلی متر و قطر آن به ۴/۶ میلی متر رسیده باشد، اولاً درصد کرنش و ثانیاً درصد نسبی کاهش سطح مقطع آن را تعیین کنید.  
حل:

$$\varepsilon = \frac{1-1.0}{1.0} \times 100$$

درصد نسبی ازدیاد

$$\varepsilon = \frac{95/8 - 76}{76} \times 100 = 26/05$$

طولی یا درصد کرنش

برای محاسبه و تعیین درصد نسبی سطح مقطع ابتدا لازم

است سطح مقطع های قبل و بعد از کشش حساب شود:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3/14 \times 5^2}{4} = 19/635 \text{ mm}^2$$

سطح مقطع اولیه

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3/14 \times 4/6^2}{4} = 16/619 \text{ mm}^2$$

سطح مقطع بعد از کشش

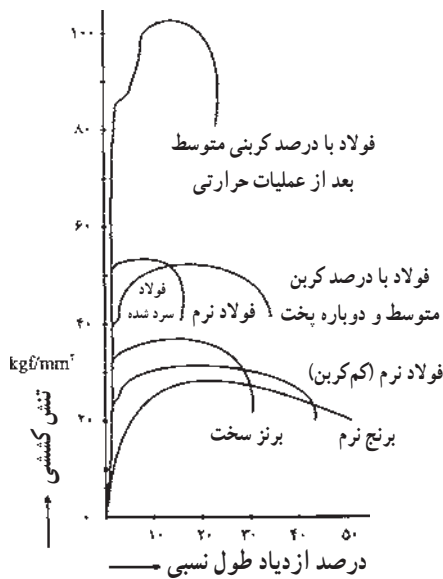
بنابراین درصد نسبی کاهش سطح مقطع چنین است:

$$S = \frac{A - A_0}{A_0} \times 100 = \frac{19/635 - 16/619}{19/635} \times 100 = 15/36$$

درصد

معادله‌ی ریاضی کلی برای آن تعیین کرد. لذا در هر مورد با توجه به شرایط مختلف مذکور، برای تعیین مقدار آن، لازم است آزمایش تنش کششی انجام گیرد.

در شکل ۵-۲ نمودارهای تنش کششی چند آلیاژ، به منظور مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر نمایش داده شده است. آزمایش‌های مربوطه همگی در دمای محیط (۲۵°C) انجام شده است. تجربه نشان داده است که با افزایش دما، تنش کششی کاهش می‌یابد. یادآوری می‌شود که نقاط ماکزیمم در منحنی‌های این شکل مشخص کننده‌ی تنش کششی مربوطه هستند.



شکل ۵-۲- مقایسه نمودارهای تنش کششی چند آلیاژ (برنج - برنز و فولاد) در دمای محیط ۲۵°C

آزمایش کشش<sup>۳</sup> از نوع آزمایش‌های استاتیک می‌باشد، یعنی آزمایش‌هایی که در آن‌ها، بار (نیروی کشش) به طور نسبتاً آهسته از صفر تا یک مقدار نهایی و معین افزایش پیدا می‌کند. هنگامی که جسم تحت تأثیر نیروی کشش قرار می‌گیرد از خود عکس‌العمل‌های مختلفی نظیر رفتار کشسان (ارتجاعی) یا الاستیک نشان می‌دهد.

وسایل مورد نیاز:

۱- دستگاه آزمایش تنش کششی (۱۰ تن نیرو) شکل ۶-۲

## ۱-۱-۲- آزمایش تعیین کشش فلزات و آلیاژها

هدف آزمایش: تعیین رفتار فلزات و آلیاژها تحت تأثیر

تنش کشش و کرنش آن‌هاست حداکثر نیروی کششی قطعه‌ی نمونه قبل از گسیخته شدن نسبت به سطح مقطع اولیه‌ی آن نمونه را تنش کششی یا مقاومت به کشش می‌نامند و آن را با  $\sigma_U$  نمایش می‌دهند.

بنابراین می‌توان نوشت:

$$\sigma_U = \frac{F_U}{A} = \frac{\text{حداکثر نیروی کشش نمونه قبل از گسیختن}}{\text{سطح مقطع اولیه‌ی نمونه}}$$

$$\sigma_U = \frac{F_U}{A} \quad \text{و یا}$$

برای تنش کشش اصطلاحاتی نظیر: مقاومت کششی،

قدرت کششی، بار کششی، حد گسیختگی، مقاومت به کشش، تنش حداکثر<sup>۱</sup> و استحکام کششی نیز به کار می‌رود.

در واقع می‌توان گفت که تنش کششی، حداکثر نیروی

لازم برای گسیخته شدن در هر واحد سطح است. در فرمول

آخر  $F_U$  بر حسب کیلوگرم نیرو و  $A$  بر حسب میلی‌متر مربع

یا سانتی‌متر مربع است در این صورت تنش کششی  $\sigma_U$  بر حسب

کیلوگرم نیرو بر میلی‌متر مربع یا کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع

بیان می‌شود. واحدهای SI که در این مورد متداول اند عبارت‌اند

از:

$$\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} = \frac{\text{GN}}{\text{m}^2} = \text{GP}_\alpha$$

(۱ کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربع = ۱ گیگا پاسکال)

برای تبدیل واحد عملی تنش به واحد SI، یعنی کیلوگرم

نیرو بر میلی‌متر مربع به کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربع، می‌توان همواره

از تساوی:  $1 \text{ kgf/mm}^2 = 9/8 \text{ N/mm}^2$  استفاده کرد.

لازم به توضیح است که تنش کششی و به طور کلی منحنی

تغییرات و دیاگرام کششی با توجه به ترکیب و جنس آلیاژ، عملیات

حرارتی، عملیات مکانیکی (مثل نورد سرد)، درجه حرارت و

بالاخره شکل قطعه‌ی نمونه متفاوت می‌باشد و نمی‌توان یک

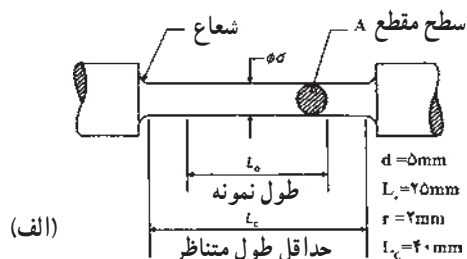
۱ - Ultimate strength یا Maximum stress (M.S)

۲ - Giga =  $10^9$

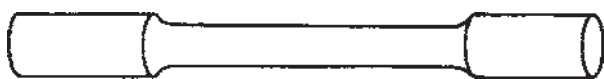
۳ - Tensile test



شکل ۲-۶- ماشین آزمایش تنش کششی انیورسال



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۲-۷- نمونه‌های آزمایش کشش  
الف) نمایش ابعاد قطعه نمونه‌ی استوانه‌ای  
ب) نمونه‌ی گرد برای درگیری گوه‌ای  
پ) نمونه‌ی گرد با دو انتهای بیچ شده

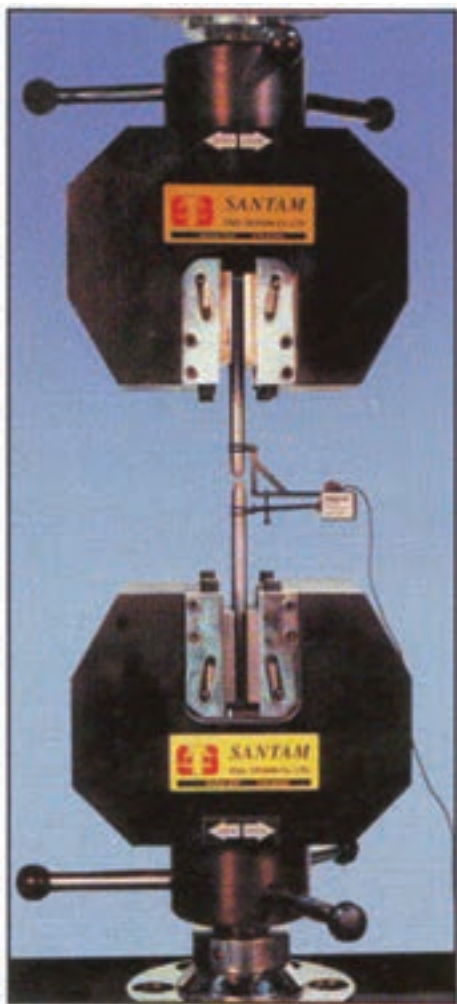
۲- نمونه‌ی کشش استاندارد (با قطر ۵ میلی‌متر و طول ۲۵ میلی‌متر از آلیاژهای: سرب، روی، چدن خاکستری، چدن نشکن، فولاد ساختمانی، فولاد آلیاژی، برنج، برنز و آلیاژهای آلومینیوم نظیر سیلومین و آلیاژهای آلومینیوم منیزیم)

### نحوه‌ی اجرای آزمایش:

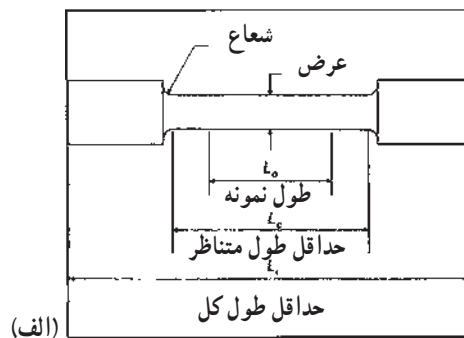
۱- تهیه‌ی نمونه استاندارد، نمونه استاندارد نمونه‌ای است که طول اولیه‌ی نمونه تقریباً ۵ برابر قطر نمونه باشد ( $L_0 = 5d$ ). این استاندارد برای نمونه‌های کوتاه است در مورد نمونه‌ی بلند رابطه به صورت ( $L_0 = 10d$ ) می‌باشد نمونه‌های استاندارد را به روش ماشینکاری به صورت استوانه‌ای تهیه می‌کنند مطابق (شکل ۲-۷).

به کمک منحنی تنش - کرنش می توان از رفتار فلز و آلیاژ مطلع شد.

برای ورق‌ها و تسمه‌ها از نمونه‌های تخت مانند شکل ۲-۸ استفاده می‌شود.



شکل ۲-۹- دستگاه آزمایش کششی و نمونه آزمایش



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۲-۸- نمونه‌های آزمایش کششی  
الف) نمایش ابعاد قطعه نمونه‌ی تخت  
ب) نمونه‌ی تیغه‌ای برای درگیری گوه‌ای  
پ) نمونه‌ی تیغه‌ای برای درگیری و اتصال پین‌دار

به طور کلی در آزمایش کششی باید کمیت‌های، ضریب ارتجاعی (مدول الاستیسیته)  $E$ ، تنش کششی (یا استحکام کششی)  $\sigma_U$ ، مقاومت تسلیم  $\sigma_Y$ ، ازدیاد طول نسبی (کرنش)  $\epsilon$  و ضریب باریک شدن (تقلیل سطح مقطع نسبی)  $S$  با چندین بار تکرار و آزمایش و تعیین میانگین آن‌ها مشخص شوند.  
تمرین: چند نمونه استاندارد از فلزات و آلیاژهای مختلف تهیه نموده آزمایش را تکرار کنید و نتایج را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

۲- نمونه استاندارد را مطابق شکل (۲-۹) در دستگاه آزمایش کشش قراردادده و پس از اعمال نیرو و شکست نمونه، طول نهایی نمونه را اندازه‌گیری می‌نماییم در ضمن دستگاه آزمایش کشش نمودار نیرو برحسب تغییر طول نمونه را نیز رسم می‌نماید که با کمک روابط

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{و} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{L_0}$$

مقدار تنش و کرنش را می‌توان محاسبه نموده و منحنی تنش - کرنش را رسم نمود.

## ۲-۱-۲- آزمایش تعیین تنش فشاری (تست)

فشار<sup>۱</sup>): اگر قطعه‌ی نمونه تحت تأثیر نیروی فشار معینی قرار گیرد، تغییر شکل آن (کوتاه شدن طول و ازدیاد سطح مقطع) متناسب با این نیرو خواهد بود ولی اگر فشار وارده بیش تر گردد، برای فلزات و آلیاژهایی که قابلیت تغییر شکل مکانیکی دارند، یک تغییر شکل خمیری و برای فلزات و آلیاژهایی که شکننده می‌باشند شکستگی ایجاد خواهد شد.

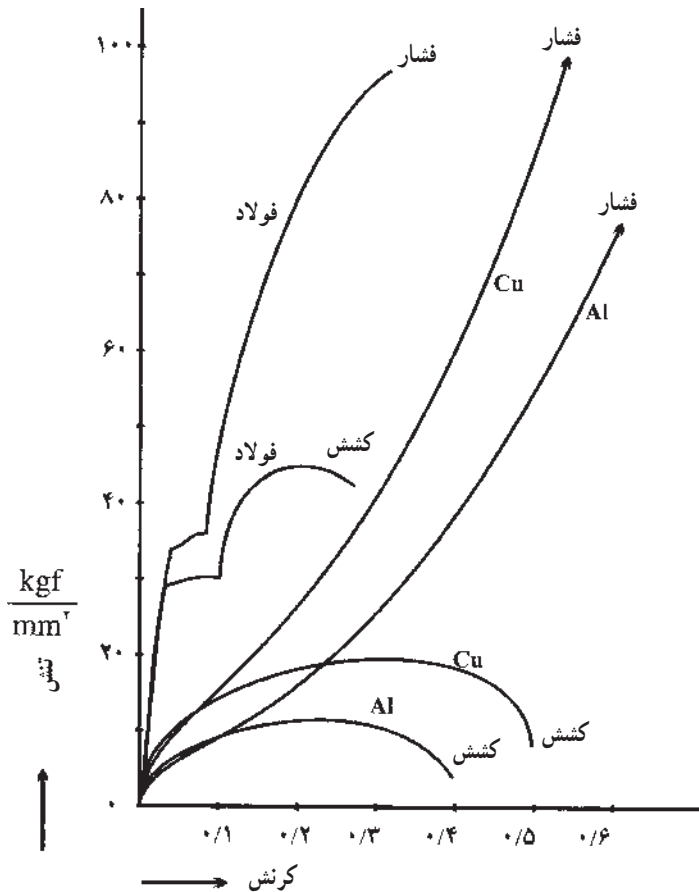
در تنش فشاری اندازه و شکل قطعه‌ی نمونه تأثیر زیادی نسبت به تنش کششی دارد و معمولاً تنش فشاری فلزات و آلیاژها

به مراتب بیشتر از تنش کششی آنها است. تنش فشاری یا مقاومت به فشار یک جسم عبارت است از حداکثر نیروی فشاری قبل از شکستن نسبت به سطح مقطع اولیه

$$\text{حداکثر نیروی فشاری قبل از شکستن} = \frac{\text{تنش فشاری یا مقاومت به فشار}}{\text{سطح مقطع اولیه}}$$

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_0}$$

شکل ۱۰-۲، نمودارهای کششی و فشاری برای فولاد، مس و آلومینیوم را به منظور مقایسه نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۲- نمودارهای کششی و فشاری برای فولاد، مس و آلومینیوم

وسایل مورد نیاز:

سرب، روی، چدن خاکستری، چدن نشکن و چند نوع فولاد (ابعاد نمونه‌های با استحکام بالا کوچک‌تر و نمونه‌های نرم‌تر بزرگ‌تر انتخاب شوند)

۱- دستگاه آزمایش تنش فشار (شکل ۱۱-۲)

۲- نمونه‌ی فشاری با ابعاد مناسب از فلزات و آلیاژهای

۱ - Compressive stress

دو فک دستگاه و دو قاعده نمونه بیش از حد شده و باعث تنش برشی می‌گردد.

تنش برشی ایجاد شده در سطوح دو قاعده استوانه‌ی نمونه با صفحات موازی، دو اشکال بزرگ در آزمایش فشار ایجاد می‌کنند که عبارت‌اند از:

(الف) نیروی تنش در دو سطح قاعده‌ی استوانه‌ی نمونه ماکزیمم است در حالی که در قسمت وسط نمونه، این تنش صفر است، در نتیجه، این امر باعث می‌شود که استوانه به شکل بشکه درآید (شکل ۱۲-۲) در این صورت ارتفاع کاهش یافته، نمی‌تواند ملاک صحیحی برای تعیین تنش فشاری باشد.



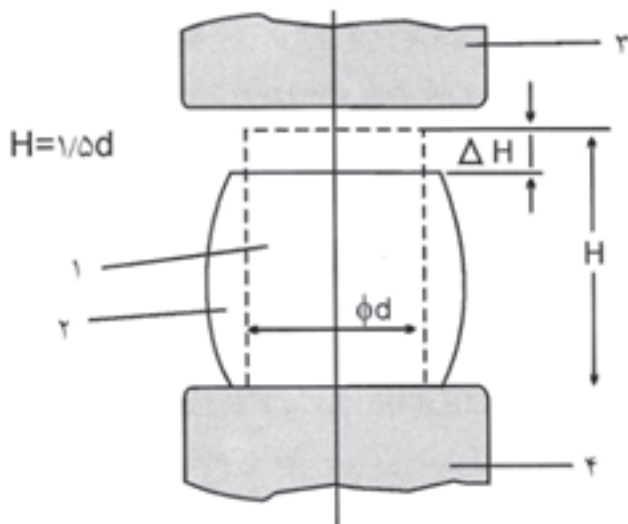
شکل ۱۱-۲- دستگاه آزمایش فشاری و نمونه آزمایش

### نحوه‌ی اجرای آزمایش:

در این آزمایش نمونه استاندارد به شکل استوانه‌ای می‌باشد که مناسب‌ترین نمونه، نمونه‌ای است که ارتفاع آن بین ۱ تا ۲ برابر قطر آن باشد اغلب از نسبت  $\frac{H}{d} = 1/5$  استفاده می‌شود چنانچه این نسبت از ۱/۵ بیشتر باشد امکان خم شدن نمونه وجود دارد در حالی که اگر نسبت مذکور از ۱/۵ کمتر باشد اصطکاک بین دو فک دستگاه که با قاعده‌های نمونه استوانه‌ای تماس دارد بیش از حد شده و باعث تنش برشی می‌گردد (در امتداد نیروی اصطکاکی که بر نیروی فشاری اعمال شده توسط ماشین عمود است) به همین علت است که در تمام مدت اعمال فشار باید دو سطح تماس قاعده‌های نمونه با دو فک دستگاه روغن کاری شود (از پودر گرافیت نقره‌ای برای نمونه‌های کوچک نیز می‌توان استفاده کرد)

نمونه‌ی تهیه شده پس از روغن کاری بین دو فک دستگاه انورسال قرار داده شده و نیروی فشاری به آن اعمال می‌گردد (شکل ۱۱-۲).

این نیرو که به طور یکنواخت و آهسته بر نمونه وارد می‌شود باعث تغییر شکل آن می‌گردد و در نهایت سبب کاهش ارتفاع و افزایش سطح نمونه می‌گردد با ادامه اعمال نیرو اصطکاک



شکل ۱۲-۲- آزمایش فشار، بشکه‌ای شدن نمونه‌ی استاندارد بر اثر ایجاد نیروی اصطکاک بین دو صفحه‌ی موازی با سطوح قاعده‌ها

(ب) نیروی فشاری ایجاد شده توسط ماشین، باید نیروی اصطکاکی صفحات موازی مذکور را نیز جبران کند. بنابراین محاسبه‌ی تنش فشاری به کمک این نیروی فشاری، از اندازه‌ی حقیقی بیشتر خواهد بود. شکل ۱۳-۲ منحنی تغییرات فشار وارد بر نمونه را برای یک فلز با نسبت‌های قطر به ارتفاع مختلف نشان می‌دهد.



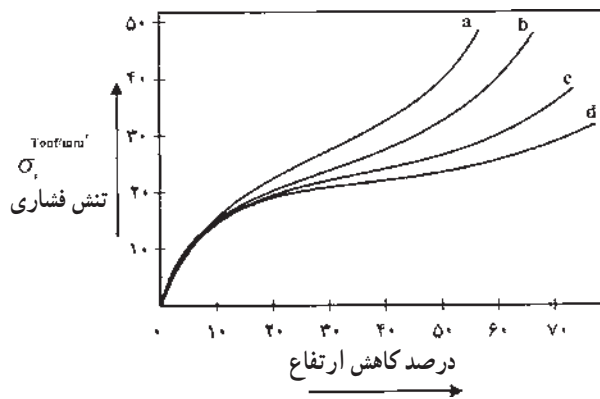
که تحت فشار قرار گرفته است (روش راکول) و یا روش‌های دیگر بنا گذاشته شده است.

ساده‌ترین روش تعیین سختی، روش خراش برداشتن است. با رجوع به جدول موهس (جدول ۱-۲) می‌توان سختی جسم را تعیین کرد. در این جدول سختی الماس که سخت‌ترین جسم است نمره ۱۰ و بودر تالک دارای نمره ۱ می‌باشد. اجسام سیال فاقد سختی می‌باشند. بنابراین نمره‌ی سختی آن‌ها صفر است.

جدول ۱-۲- سختی اجسام در مقیاس موهس (جدول موهس)

سختی	فرمول شیمیایی	جسم
۱۰	C	الماس
۹	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	کروندم
۸	Al <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> F <sub>2</sub>	توپاز
۷	SiO <sub>2</sub>	کوارتز
۶	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	ارتوکلاز
۵	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F	آپاتیت
۴	CaF <sub>2</sub>	فلوریت
۳	CaCO <sub>3</sub>	کلسیت
۲	CaSO <sub>4</sub> · ۲H <sub>2</sub> O	گچ
۱	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> · (OH) <sub>2</sub>	تالک

با استفاده از این جدول و مقایسه‌ی سختی اجسام با سختی مواد دیگر، سختی کاربیدتنگستن ۹/۵، کاربید سیلیسیم ۹، فولادها بین ۵ تا ۸/۵، سرب ۱/۵، گرافیت حدود ۱ و سدیم ۰/۴ تعیین شده‌اند. روشن است که تعیین سختی اجسام با این روش دقیق نبوده و فقط حدود نسبی سختی‌ها را مشخص می‌کند. برای تعیین سختی دقیق فلزات و آلیاژها از روش‌های برینل، راکول و ویکرز استفاده می‌کنند.



شکل ۱۳-۲- منحنی تغییرات فشار وارد بر نمونه‌ی استوانه‌ای برای یک فلز

به هر حال یادآوری می‌شود که روغن کاری بین صفحات و قاعده‌های استوانه‌ی نمونه از اهمیت زیادی برخوردار است و می‌تواند نیروی اصطکاکی مذکور را فوق‌العاده کاهش دهد.

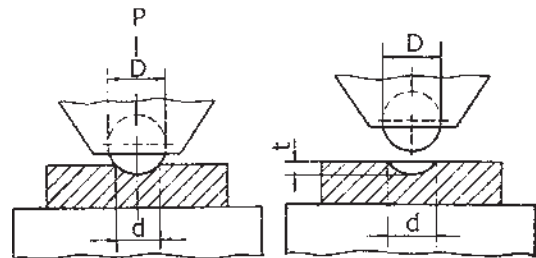
۱- استوانه‌ی نمونه قبل از فشار اعمال شده  
 ۲- نمونه بعد از فشار اعمال شده ۳ و ۴ صفحات موازی تمرین: آزمایش فوق را برای نمونه‌های از جنس مختلف انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

## ۲-۲- سختی اجسام

سختی جسم یعنی میزان مقاومت نیروهای داخلی در مقابل خراش یا سایش. سختی یک جسم با عملیات مکانیکی یا حرارتی که روی آن انجام می‌گیرد تغییر می‌کند. اندازه‌گیری سختی روی اصول خراش برداشتن جسم نرم از جسم سخت (روش موهس)، یا اثر گذاشتن یک ساچمه‌ی سخت روی جسم نمونه (روش برینل) یا ایجاد عمق به وسیله‌ی یک نوک الماسه به شکل مخروط

## ۱-۲-۲- آزمایش تعیین سختی به روش برینل<sup>۱</sup>:

در روش برینل یک ساچمه از کاربید تنگستن یا فولاد (پرکربن یا سماتنه آب داده شده) به قطر (D) روی جسم با نیروی (P) به مدت ثابتی (۱۰ ثانیه برای آلیاژهای آهنی و ۳۰ تا ۶۰ ثانیه برای آلیاژهای غیرآهنی) توسط ماشین مربوطه، فشار ایجاد می‌کند. از تقسیم نیروی وارد بر سطح ایجاد شده (سطح عرقچین کروی) عدد سختی در این روش به دست می‌آید (شکل ۱۴-۲). سختی برینل را به اختصار با BHN<sup>۲</sup> نمایش می‌دهند.



شکل ۱۴-۲- آزمایش و تعیین عدد سختی برینل

مقدار این سختی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$BHN = \frac{P}{A}$$

که در آن P عبارت است از نیروی وارد به ساچمه (بار) و A سطح عرقچین کروی ایجاد شده روی فلز یا آلیاژ مورد آزمایش است. از طرفی سطح عرقچین کروی با توجه به شکل اخیر چنین است.

$$A = \pi Dt \text{ و } t = \frac{1}{4}(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

در این روابط t عبارت از عمق فرو رفتگی (نفوذ ساچمه در فلز یا آلیاژ) و d قطر دایره‌ی اثر است. به این ترتیب می‌توان سختی برینل را از رابطه‌ی زیر محاسبه و تعیین کرد.

$$BHN = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi Dt} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

چون سختی برینل عبارت است از نیرو تقسیم بر سطح

(مانند فشار)، لذا واحد آن برحسب  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  یا  $\text{N}/\text{m}^2$  (پاسکال Pa) بیان می‌شود. در این صورت واحدهای D، t و d برحسب mm یا m خواهد بود (واحد مناسب دیگر برای سختی برینل، عبارت است از مگا پاسکال «MPa» که در این صورت واحد P برحسب نیوتن و واحد کمیت‌های D، t و d برحسب میلی‌متر خواهد بود). یادآوری می‌شود که:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgf}/\text{mm}^2 &= 9.8 \text{ N}/\text{mm}^2 = 9.8 \times 10^6 \text{ N}/\text{m}^2 = \\ &= 9.8 \times 10^6 \text{ Pa} = 9.8 \text{ MPa} \end{aligned}$$

تجربه نشان داده است که بین P (نیروی بار بر حسب نیوتن) و D (قطر ساچمه برحسب میلی‌متر) نسبتی وجود دارد که در جدول ۲-۲ نشان داده شده است. حداقل و حداکثر ضخامت نمونه برحسب قطر ساچمه نیز درج شده است. ضخامت نمونه‌ی مورد آزمایش باید حداقل ۱۰ برابر عمق فرو رفتگی ساچمه در فلز نمونه باشد یعنی:

$$h \geq \frac{10P}{\pi D(BHN)}$$

حداکثر عدد سختی برینل برای اندازه‌گیری سختی فلزات آهنی، فلزات غیرآهنی و آلیاژهای آن  $450 \text{ MPa}$  (تقریباً  $45 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ ) است.

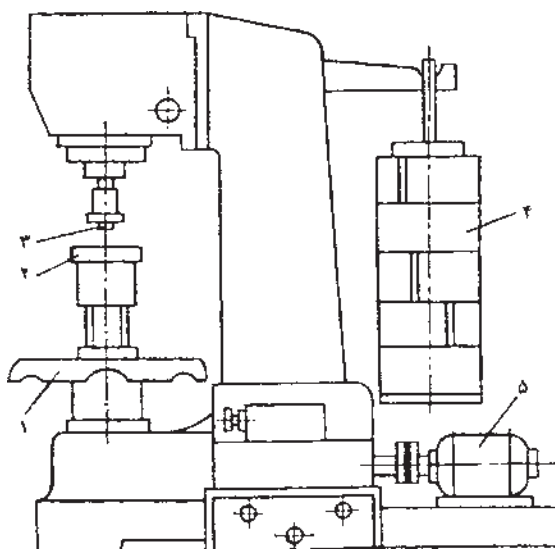
وسایل مورد نیاز:

- ۱- دستگاه سختی سنج برینل
- ۲- نمونه (مطابق شرح آزمایش)
- ۳- میکروسکپ میکرومتردار (یا دستگاه منعکس کننده‌ی نور از روی سطح نمونه روی یک صفحه)

ماشین یا دستگاه آزمایش برینل ممکن است از نوع تیدرولیکی باشد و به‌طور دستی عمل کند (یا این که دستگاه مجهز به یک نوع اهرمی باشد که توسط دست یا الکتروموتور، نیروی لازم را اعمال کند). در اغلب موارد، دستگاه آزمایش برینل از نوع تحرک اهرم توسط الکتروموتور بوده و کاربرد دارد. (شکل ۱۵-۲)

۱۰ برابر عمق فرورفتگی ساچمه بوده و همچنین باید دارای دو سطح موازی و صیقلی باشد.  
ابتدا نمونه‌ی تهیه شده روی سندان دستگاه سختی سنج قرار داده می‌شود.

و سپس گیره‌ی متحرک (چرخشی) آن قدر چرخانده می‌شود تا سندان بالا بیاید و نمونه‌ی روی آن با ساچمه تماس پیدا کند. در این هنگام الکتروموتور (اهرم) را به کار می‌اندازند تا وزنه آزاد شده و نیروی لازم توسط وزنه، به تدریج ساچمه را روی نمونه فشار دهد. زمان اعمال این فشار در جدول ۲-۲ برای قطرهای مختلف ساچمه (و سایر عوامل) درج شده است. پس از آن که فشار لازم ایجاد شد و دایره‌ی اثر روی نمونه به وجود آمد، جهت حرکت الکتروموتور (اهرم) را عوض می‌کنند تا نیروی وزنه قطع شود. اکنون می‌توان گیره‌ی متحرک را به‌طور وارونه گرداند و سندان را پایین آورد. نمونه که دایره‌ی اثر روی آن ایجاد شده است، برای اندازه‌گیری و تعیین قطر  $d$  توسط میکروسکوپ میکرومتر، آماده است.



شکل ۱۵-۲- دستگاه سختی سنج برینل

۱- گیره متحرک چرخشی ۲- سندان  
۳- ساچمه فرورونده ۴- وزنه ۵- الکتروموتور

### نحوه‌ی اجرای آزمایش:

نمونه‌ی آزمایش سختی باید دارای ضخامت حداقل

جدول ۲-۲- سختی برینل فلزات برحسب عوامل: قطر ساچمه، نیروی وارد بر نمونه، ضخامت نمونه و زمان اعمال نیرو

فلز	سختی Bhn MPa(N/mm <sup>2</sup> )	ضخامت نمونه h (mm)	نسبت بین D و P	قطر ساچمه D (mm)	نیروی وارد (بار) بر نمونه P(N)	زمان اعمال نیرو T(S)
فلزات آهنی	۱۴۰۰-۱۵۰۰	۶-۳	$P = 300 \cdot D^2$	۱۰	۳۰۰۰۰	۱۰
		۴-۲		۵	۷۵۰۰	
	حداکثر ۲		۲/۵	۱۸۷۵		
	حداقل ۶		۱۰	۱۰۰۰۰		
فلزات غیر آهنی	حداکثر ۱۴۰۰	۶-۳	$P = 100 \cdot D^2$	۵	۲۵۰۰	۱۰
		۴-۲		۲/۵	۶۲۵	
	حداکثر ۳		۱۰	۳۰۰۰۰		
	حداقل ۹-۳		۵	۱۰۰۰۰		
۱۳۰۰-۳۵۰	۶-۳	$P = 300 \cdot D^2$	۲/۵	۲۵۰۰	۳۰	
	۴-۲		۵	۶۲۵		
	حداکثر ۲		۱۰	۲۵۰۰		
۸۰-۳۵۰	۶-۳	$P = 25 \cdot D^2$	۲/۵	۲۵۰۰	۶۰	
	۴-۲		۵	۶۲۵		
حداکثر ۳		۱۰	۱۵۶			

معمولاً دستگاه‌های آزمایش سختی برینل جداولی به صورت ضمیمه (پلاک) دارند. به کمک این جدول‌ها و اندازه‌ی قطر دایره‌ی اثر به سهولت و به سرعت عدد سختی برینل معلوم می‌شود (بدون استفاده از فرمول و محاسبه).

تذکر: آزمایش سختی سنجی را معمولاً برای هر نمونه در سه نقطه دور از هم انجام داده و سپس میانگین سختی برینل سه نقطه به دست آمده را به عنوان سختی نمونه در نظر می‌گیرند.

مثال: برای اندازه‌گیری سختی برینل یک قطعه فولاد ریختگی، قطر گلوله‌ی مربوط ۱۰ میلی‌متر و بار وارد به آن ۳۰۰۰ کیلوگرم نیرو معین شده است. در صورتی که قطر دایره‌ی اثر ایجاد شده روی قطعه ۳ میلی‌متر باشد، سختی آن چنین حساب خواهد شد.

$$P = 3000 \text{ kgf} \quad \text{و} \quad d = 3 \text{ mm} \quad \text{و} \quad D = 10 \text{ mm}$$

$$\text{BHN} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$\text{BHN} = \frac{3000}{\frac{\pi}{4} \times 10(10 - \sqrt{10^2 - 3^2})} =$$

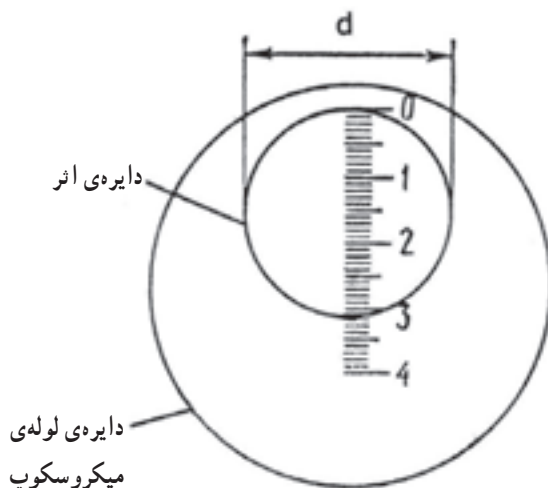
$$\frac{3000}{15.7(10 - 9.54)}$$

$$\text{BHN} \approx 415 \text{ kgf/mm}^2 \Rightarrow 415 \times 9.8$$

$$= 4067 \text{ MPa}$$

تمرین: سختی چند فلز مختلف را به روش برینل اندازه‌گیری نموده و نتایج را به روش گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

شکل ۱۶-۲ نحوه‌ی اندازه‌گیری قطر دایره‌ی اثر روی قطعه‌ی نمونه (d) را توسط یک میکروسکوپ میکرومتردار نشان می‌دهد هر فاصله نماینده‌ی  $\frac{1}{4}$  میلی‌متر است و در این شکل حداکثر قطر ۴ میلی‌متر قابل اندازه‌گیری می‌باشد.



شکل ۱۶-۲- اندازه‌گیری قطر دایره‌ی اثر با میکروسکوپ میکرومتردار.

ممکن است اندازه‌گیری قطر دایره‌ی اثر به وسیله‌ی تابش نور روی قطعه‌ی نمونه و سپس انعکاس آن پس از چند برابر شدن تصویر توسط عدسی‌های مخصوص روی یک صفحه انجام گیرد.

سپس قطر اندازه‌گیری شده (d) در فرمول (BHN) قرار داده می‌شود و عدد سختی برحسب برینل به دست می‌آید.

۲-۲-۲- آزمایش تعیین سختی به روش راکول<sup>۱</sup>:  
در روش راکول تعیین سختی از روی عمق فرو رفتگی ایجاد شده در قطعه‌ی مورد آزمایش توسط یک نوک مخروطی از الماس و یا یک ساچمه فولادی که تحت تأثیر بار ثابت و برای مدت معینی قرار گرفته است مشخص می‌گردد. (توسط عقربه‌ی دستگاه). روش سختی سنجی راکول نیز یکی از روش‌های مهم صنعتی است.

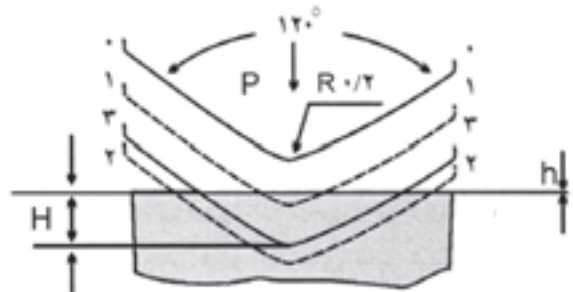
زاویه‌ی رأس مخروط<sup>۲</sup> ۱۲۰ درجه بوده و در مورد ساچمه‌ی فولادی<sup>۳</sup>، قطر آن ۱/۵۸۷۵ میلی‌متر (۱/۶ اینچ) مشخص و استاندارد شده است. بار وارد بر ساچمه معمولاً ۹۸ نیوتن و برای نوک مخروطی الماسه ۱۴۷۰ نیوتن است. در شروع آزمایش تعیین سختی، ابتدا یک بار: نیوتن  $P_0 = 98$  وارد می‌کنند تا خاصیت ارتجاعی اثر خنثی شود. عدد سختی راکول مستقیماً از روی عقربه‌ی دستگاه سختی سنج مربوطه خوانده می‌شود و درجات صفحه‌ی مدرج دستگاه برحسب رابطه‌ی زیر با توجه به شکل ۱۷-۲ درجه‌بندی شده است.

$$R = \frac{K - (H - h)}{C}$$

سختی راکول

در این رابطه:

K ضریبی است ثابت که برای نوک مخروطی ۲/۰ و برای



شکل ۱۷-۲- اندازه‌گیری سختی راکول با نوک مخروطی الماس<sup>۴</sup>

(شعاع کره‌ی نوک مخروط ۰/۲ میلی‌متر است).

۱-۱- فرو رفتگی مخروط زیر بار اولیه‌ی ۹۸ نیوتن.

۲-۲- فرو رفتگی مخروط زیر بار ۱۵۶۸ نیوتن

(مجموع بار اولیه:  $P_0 = 98N$  و بار اصلی یا نهایی  $P_0 = 1470N$ )

۳-۳- فرو رفتگی مخروط زیر بار ۱۴۷۰ نیوتن بدون بار اولیه است.

ساچمه‌ی فولادی برابر ۲۶/۰ است.

h عمق فرو رفتگی برحسب میلی‌متر برای نوک مخروطی

و ساچمه‌ی فولادی بعد از اضافه شدن بار اولیه می‌باشد.

H عمق فرو رفتگی برحسب میلی‌متر برای نوک مخروطی

و ساچمه‌ی فولادی بدون اضافه شدن بار اولیه است.

C ضریبی است ثابت برای بزرگ نشان دادن تقسیمات

مقیاس و مقدار آن برابر:  $2/0 \text{ mm}$  میلی‌متر است.

در حقیقت هر واحد سختی راکول معادل  $0.02 \text{ mm}$

عمق نفوذ نوک الماس (یا ساچمه‌ی فولادی) است.

با این که اندازه‌گیری سختی در آزمایشگاه‌ها با روش برینل

(و همچنین ویکرز) از دقت زیاد و مناسبی برخوردار است، با

این حال روش راکول به علت: سرعت عمل، سادگی کار و

آزمایش و قرائت مستقیم اندازه‌ی سختی از روی صفحه‌ی

مدرج دستگاه، امروز به خصوص برای اندازه‌گیری فلزات و

آلیاژهای سخت نظیر فولادهای آب داده زیاد استفاده می‌شود.

در شکل ۱۸-۲ صفحه مدرج دستگاه سختی سنج راکول نشان

داده شده است.



شکل ۱۸-۲- آزمایش سختی راکول

بار اولیه:  $P_0 = 98\text{ N} = 10\text{ kgf}$

بار نهایی:  $P = 1470\text{ N} = 150\text{ kgf}$

رنگ مقیاس صفحه‌ی مدرج (تقسیمات دایره‌ی بیرونی): سیاه

نفوذ کننده: نوک مخروطی الماسه

آلیاژهای مورد آزمایش: بسیاری از فولادهای سخت، انواع چدن‌ها و آلیاژهای تمبر شده.

لازم به توضیح است که اندازه‌گیری سختی ورق‌های نازک، قشر سماتته یا نیترووره شده‌ی فولادها و نظایر آنها با روش راکول معمولی که ذکر شد مقدور نیست. در این موارد از آزمایش سختی سطحی<sup>۳</sup> استفاده می‌کنند. بارهای به کار گرفته شده در این نوع آزمایش کم (حتی کم‌تر از ۳ kgf) و دقت اندازه‌گیری زیاد است.

در مورد سختی  $R_A$  (راکول A) بار نهایی عبارت است از  $588\text{ N} = 60\text{ kgf}$  و نفوذکننده نوک مخروطی الماسه است. راکول A برای اندازه‌گیری ورق‌های فولادی نازک به کار می‌رود.

وسایل مورد آزمایش:

۱- دستگاه سختی‌سنج راکول (مجهز به صفحه‌ی مدرج با مقیاس راکول B و C)

۲- قطعه‌ی نمونه (مطابق شرح آزمایش)

شکل ۱۹-۲ قسمت‌های مختلف یک دستگاه یا ماشین آزمایش راکول را نشان می‌دهد.

صفحه‌ی مدرج (۶) دارای دو مقیاس قرمز (راکول B<sup>۱</sup>) و سیاه (راکول C<sup>۲</sup>) و همچنین دو عقربه است.

عقربه‌ی بزرگ‌تر برای مشخص کردن عدد سختی و عقربه‌ی کوچک‌تر برای نمایش بار اولیه  $P_0 = 98\text{ N}$  می‌باشد.

در این سختی‌سنجی که ابتدا یک بار اولیه‌ی<sup>۱</sup>  $98\text{ N}$  ( $10\text{ kgf}$ ) بر روی نوک یا ساچمه‌ی فرو رونده وارد می‌شود که پس از تنظیم عقربه‌ی صفحه‌ی مدرج روی صفر، می‌توان بار نهایی<sup>۲</sup> را اعمال کرد. در این صورت عمق فرو رفتگی متناسب با تقسیمات سختی روی صفحه‌ی مدرج مشخص می‌شود. در این آزمایش هیچ‌گونه محاسبه و یا تبدیلی از روی جداول لازم نیست و مستقیماً عدد سختی راکول از روی عقربه‌ی متحرک صفحه‌ی مدرج قابل رؤیت است.

برحسب تغییر بار نهایی، نوع نوک و مقدار نفوذ آن در جسم انواع مختلفی از روش‌های راکول در صنایع مختلف طراحی شده است و به صورت  $R_A, R_B, R_C, \dots$  نمایش داده می‌شوند. متداول‌ترین این روش‌ها راکول B و راکول C هستند که به‌طور وسیعی در مهندسی صنایع کاربرد دارند. (B حرف اول کلمه‌ی انگلیسی ساچمه: Ball و C حرف اول کلمه‌ی مخروط: Cone است).

مشخصات این دو روش چنین هستند:

– راکول B:

$$R = 1000 - \frac{H-h}{0.002}$$

فرمول سختی:

بار اولیه:  $P_0 = 98\text{ N} = 10\text{ kgf}$

بار نهایی:  $P = 980\text{ N} = 100\text{ kgf}$

رنگ مقیاس صفحه‌ی مدرج (تقسیمات دایره‌ی درونی):

قرمز

نفوذ کننده (نوک): کره‌ی (ساچمه) فولادی به قطر

$$\frac{1}{16} = 1/5875\text{ mm}$$

آلیاژهای مورد آزمایش: آلیاژهای مس، آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای آنیل شده‌ی کم کربن

– راکول C:

$$R_C = 1300 - \frac{H-h}{0.002}$$

فرمول سختی:

۱- Minor force

۲- Major force

۳- Rockwell Superficial Hardness Test

۴- HRB

۵- HRC

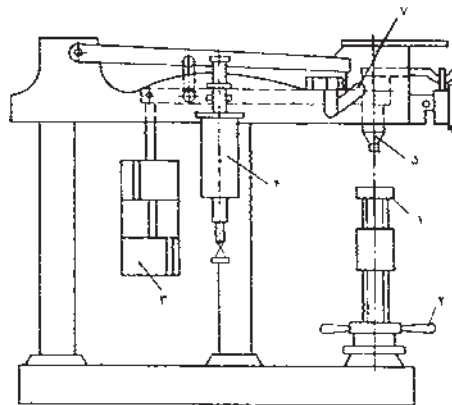
## نحوه‌ی اجرای آزمایش:

در آزمایش سختی سنجی با دستگاه یا ماشین راکول، باید هر دو طرف نمونه‌ی مورد آزمایش، تراشیده و پولیش شود. سپس نمونه را باید روی سندان (۱) قرار داد. در این هنگام می‌توانیم با چرخش گیره‌ی متحرک (۲)، سندان (و نمونه‌ی روی آن) را آن قدر بالا بیاوریم که با نوک ساچمه یا مخروط تماس پیدا کند. چرخش این گیره را به اندازه‌ای ادامه می‌دهیم تا عقربه‌ی کوچک‌تر به روی نقطه‌ی قرمز رنگ صفحه‌ی مدرج قرار گیرد. در این موقع مطمئن می‌شویم که بار اولیه‌ی ۹۸N اعمال شده است. در چنین وضعیتی، ممکن است عقربه‌ی بزرگ‌تر روی صفر قرار گرفته باشد یا نباشد. چنانچه عقربه روی صفر نباشد، صفحه‌ی مدرج را آن قدر دوران می‌دهیم تا این عقربه روی صفر میزان شود.

اکنون می‌توانیم دستگیره (۷) را فشار دهیم تا این که بار نهایی (P) با آزاد شدن و معلق شدن وزنه (۳) که معادل همین بار است، روی نمونه اعمال شود. زمان نیروی وارده ۵ تا ۷ ثانیه است. بعد از این که عقربه‌ی صفحه‌ی مدرج، آرام و بی‌حرکت گردید، لازم است دستگیره به جلو کشیده شود تا وزنه‌ی مذکور باری را اعمال نکند. البته در این وضعیت بار اولیه نیز برداشته شده است. به این ترتیب عدد سختی راکول به‌طور اتوماتیک توسط عقربه‌ی بزرگ‌تر روی صفحه‌ی مدرج (۶) مشخص و معین می‌شود. در این موقع می‌توانیم عدد سختی را یادداشت کنیم و دستگیره‌ی متحرک چرخشی را دوران دهیم تا سندان پایین بیاید.

باید دانست که در تمام مدت آزمایش، نباید نمونه سرد یا گرم شود (برای تمام انواع سختی سنج‌ها).

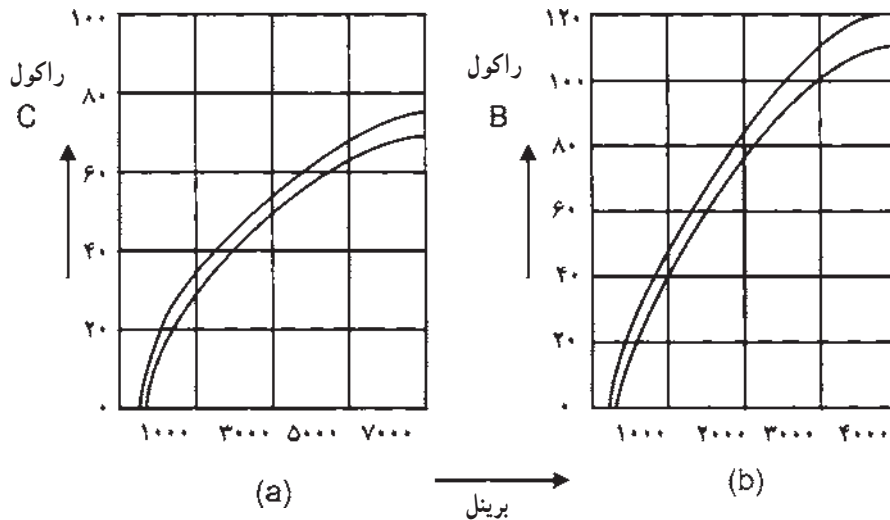
نوک الماسه برای اندازه‌گیری دقیق و صحیح فولادهای تمپر شده و کوئچ شده، سختی سطحی (بعد از کربوره شدن یا سختی القایی) سختی آلیاژهای کاربیدی (کاربیدهای سماتنه شدن). ساچمه‌ی فولادی برای اندازه‌گیری سختی فولاد آنیل شده و فلزات و آلیاژهای غیرآهنی به کار می‌رود. اندازه‌گیری‌های سختی باید حداقل در سه نقطه انجام گیرد و فاصله‌ی بین هر دو



شکل ۱۹-۲- اجزای مختلف یک نوع دستگاه آزمایش سختی راکول  
۱- سندان، ۲- گیره‌ی متحرک چرخشی، ۳- وزنه، ۴- مخزن روغن‌باش، ۵- سنبله، ۶- صفحه‌ی مشخص‌کننده‌ی سختی (صفحه‌ی مدرج) ۷- دستگیره

رفتن نوک مخروطی یا ساچمه در داخل فلز که برابر است با  $0.2^\circ$  میلی متر عدد سختی راکول را می توان تبدیل به عدد سختی برینل کرد که با مراجعه به نمودارهای شکل ۲-۲ و هم چنین جدول ۳-۲ این مطلب روشن می شود.

فرورفتگی<sup>۱</sup> حداقل برای نوک مخروطی باید  $1/5$  میلی متر و برای ساچمه  $4$  میلی متر باشد. ضخامت نمونه باید حداقل  $10^\circ$  برابر عمق نفوذ باشد. همان طور که قبلاً اشاره شد، در سختی سنجی راکول واحد سختی عبارت است از جابه جایی سنبه و در نتیجه فرو



شکل ۲-۲- مقایسه و تبدیل عدد سختی های برینل و راکول (a) راکول c (مخروط الماسه) به برینل - (b) راکول B (ساچمه) به برینل

دارد، می تواند حدود  $150^\circ$ ،  $300^\circ$ ،  $450^\circ$  و  $600^\circ$  نیوتن انتخاب شود.

مقیاس اندازه گیری در هر دو راکول (B و C) بین ۱ تا  $100^\circ$  است.

تمرین: سختی چند نمونه فلزی را با استفاده از روش های راکول B و C اندازه گیری نموده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

در مورد تبدیل عدد سختی راکول A به عدد سختی راکول C (و بالعکس) می توان از معادله ی زیر استفاده کرد:

$$HRC \approx 2HRA - 104$$

در مورد ورق های بسیار نازک (کم تر از  $3/0$  میلی متر) آزمایش تعیین سختی، باید از روش سختی سنج سطحی راکول انجام گیرد. بار اولیه در این آزمایش حدود  $30N$  ( $3$  کیلوگرم نیرو) و بار نهایی که بستگی به ضخامت نمونه و نوع نوک



جدول ۳-۲- مقایسه‌ی عدد سختی برینل، راکول و ویکروز

راکول			برینل ۱۰/۳۰۰۰۰P/P		ویکرز MPa	راکول			برینل ۱۰/۳۰۰۰۰D/P		ویکرز MPa
مقیاس B	مقیاس C	مقیاس A	قطر دایره‌ی اثر (d)mm	عدد سختی MPa		مقیاس B	مقیاس C	مقیاس A	قطر دایره‌ی اثر (d)mm	عدد سختی MPa	
-	-	-	۲/۰۰	۹۴۶۰	-	۹۸	۲۲	۶۲	۴/۰۰	۲۲۹۰	۲۲۶۰
-	-	-	۲/۰۵	۸۹۸۰	-	۹۷	۲۱	۶۱	۴/۰۵	۲۲۳۰	۲۲۱۰
-	-	-	۲/۱۰	۸۵۷۰	-	۹۷	۲۰	۶۱	۴/۱۰	۲۱۷۰	۲۱۷۰
-	-	-	۲/۱۵	۸۱۷۰	-	۹۶	۱۹	۶۰	۴/۱۵	۲۱۲۰	۲۱۳۰
-	۷۲	۸۹	۲/۲۰	۷۸۲۰	۱۲۲۰۰	۹۵	۱۸	۶۰	۴/۲۰	۲۰۷۰	۲۰۹۰
-	۶۹	۸۷	۲/۲۵	۷۴۴۰	۱۱۱۴۰	۹۴	-	۵۹	۴/۲۵	۲۰۱۰	۲۰۱۰
-	۶۷	۸۵	۲/۳۰	۷۱۳۰	۱۰۲۱۰	۹۳	-	۵۸	۴/۳۰	۱۹۷۰	۱۹۷۰
-	۶۵	۸۴	۲/۳۵	۶۸۳۰	۹۴۰۰	۹۲	-	۵۸	۴/۳۵	۱۹۲۰	۱۹۰۰
-	۶۳	۸۳	۲/۴۰	۶۵۲۰	۸۶۷۰	۹۱	-	۵۷	۴/۴۰	۱۸۷۰	۱۸۶۰
-	۶۱	۸۲	۲/۴۵	۶۲۷۰	۸۰۳۰	۸۹	-	۵۶	۴/۴۵	۱۸۳۰	۱۸۰۰
-	۵۹	۸۱	۲/۵۰	۶۰۰۰	۷۴۶۰	۸۸	-	۵۶	۴/۵۰	۱۷۹۰	۱۷۷۰
-	۵۸	۸۰	۲/۵۵	۵۷۸۰	۶۹۴۰	۸۷	-	۵۵	۴/۵۵	۱۷۴۰	۱۷۴۰
-	۵۶	۷۹	۲/۶۰	۵۵۵۰	۶۴۹۰	۸۶	-	۵۵	۴/۶۰	۱۷۰۰	۱۷۱۰
-	۵۴	۷۸	۲/۶۵	۵۳۲۰	۶۰۶۰	۸۵	-	۵۴	۴/۶۵	۱۶۷۰	۱۶۵۰
-	۵۲	۷۷	۲/۷۰	۵۱۲۰	۵۸۷۰	۸۴	-	۵۳	۴/۷۰	۱۶۳۰	۱۶۲۰
-	۵۱	۷۶	۲/۷۵	۴۹۵۰	۵۵۱۰	۸۳	-	۵۳	۴/۷۵	۱۵۹۰	۱۵۹۰
-	۴۹	۷۶	۲/۸۰	۴۷۷۰	۵۳۴۰	۸۲	-	۵۲	۴/۸۰	۱۵۶۰	۱۵۴۰
-	۴۸	۷۵	۲/۸۵	۴۶۰۰	۵۰۲۰	۸۱	-	۵۲	۴/۸۵	۱۵۲۰	۱۵۲۰
-	۴۷	۷۴	۲/۹۰	۴۴۴۰	۴۷۴۰	۸۰	-	۵۱	۴/۹۰	۱۴۹۰	۱۴۹۰
-	۴۵	۷۳	۲/۹۵	۴۲۹۰	۴۶۰۰	۷۸	-	۵۰	۴/۹۵	۱۴۶۰	۱۴۷۰
-	۴۴	۷۳	۳/۰۰	۴۱۵۰	۴۳۵۰	۷۶	-	۵۰	۵/۰۰	۱۴۳۰	۱۴۴۰
-	۴۳	۷۲	۳/۰۵	۴۰۱۰	۴۲۳۰	۷۶	-	-	۵/۰۵	۱۴۰۰	-
-	۴۱	۷۱	۳/۱۰	۳۸۸۰	۴۰۱۰	۷۵	-	-	۵/۱۰	۱۳۷۰	-
-	۴۰	۷۱	۳/۱۵	۳۷۵۰	۳۹۰۰	۷۴	-	-	۵/۱۵	۱۳۴۰	-
-	۳۹	۷۰	۳/۲۰	۳۶۳۰	۳۸۰۰	۷۲	-	-	۵/۲۰	۱۳۱۰	-
-	۳۸	۶۹	۳/۲۵	۳۵۲۰	۳۶۱۰	۷۱	-	-	۵/۲۵	۱۲۸۰	-
-	۳۷	۶۹	۳/۳۰	۳۴۱۰	۳۴۴۰	۶۹	-	-	۵/۳۰	۱۲۶۰	-
-	۳۶	۶۸	۳/۳۵	۳۳۱۰	۳۳۵۰	۶۸	-	-	۵/۳۵	۱۲۳۰	-
-	۳۵	۶۸	۳/۴۰	۳۲۱۰	۳۲۰۰	۶۷	-	-	۵/۴۰	۱۲۱۰	-
-	۳۴	۶۷	۳/۴۵	۳۱۱۰	۳۱۲۰	۶۶	-	-	۵/۴۵	۱۱۸۰	-
-	۳۳	۶۷	۳/۵۰	۳۰۲۰	۳۰۵۰	۶۵	-	-	۵/۵۰	۱۱۶۰	-
-	۳۱	۶۶	۳/۵۵	۲۹۳۰	۲۹۱۰	۶۴	-	-	۵/۵۵	۱۱۴۰	-
-	۳۰	۶۶	۳/۶۰	۲۸۵۰	۲۸۵۰	۶۲	-	-	۵/۶۰	۱۱۱۰	-
-	۲۹	۶۵	۳/۶۵	۲۷۷۰	۲۷۸۰	۶۱	-	-	۵/۶۵	۱۰۹۰	-
-	۲۸	۶۵	۳/۷۰	۲۶۹۰	۲۷۲۰	۵۹	-	-	۵/۷۰	۱۰۷۰	-
-	۲۷	۶۴	۳/۷۵	۲۶۲۰	۲۶۱۰	۵۸	-	-	۵/۷۵	۱۰۵۰	-
-	۲۶	۶۴	۳/۸۰	۲۵۵۰	۲۵۵۰	۵۷	-	-	۵/۸۰	۱۰۳۰	-
-	۲۵	۶۳	۳/۸۵	۲۴۸۰	۲۵۰۰	۵۶	-	-	۵/۸۵	۱۰۱۰	-
۱۰۰	۲۴	۶۳	۳/۹۰	۲۴۱۰	۲۴۰۰	۵۴	-	-	۵/۹۰	۹۹۰	-
۹۹	۲۳	۶۲	۳/۹۵	۲۳۵۰	۲۳۵۰	۵۳	-	-	۵/۹۵	۹۷۰	-

### ۲-۲-۳- آزمایش تعیین سختی به روش ویکرز:

روش دیگری که بیش تر برای تعیین سختی آلیاژهایی که سطح خارجی آن‌ها سخت است، به کار می‌رود روش ویکرز می‌باشد. آزمایش تعیین سختی در این روش با استفاده از یک هرم مربع القاعده با نوک الماسه انجام می‌گیرد. زاویه‌ی رأس بین دو سطح مقابل این هرم  $136^\circ$  است. نمونه‌ی مورد آزمایش قبلاً تراشیده و پولیش شده است. با فرو رفتن نوک الماسه‌ی هرم در این نمونه، سطح اثر شامل سطوح چهار مثلث جانبی متساوی الساقین پدید می‌آید. خارج قسمت بار وارد بر سطح این چهار مثلث، عدد سختی ویکرز نامیده می‌شود. محاسبه نشان می‌دهد که مقدار سختی در این روش از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$\text{VHN} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \quad \text{عدد سختی ویکرز}$$

و چون  $\alpha = 136^\circ$  بنابراین:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = 2 \sin \frac{136^\circ}{2} = 2 \sin 68^\circ = 1/8544$$

و رابطه‌ی ویکرز به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\text{VHN} = 1/8544 \frac{P}{d^2}$$

در روابط مذکور:

P بار وارد بر قطعه بر حسب کیلوگرم نیرو یا نیوتن؛

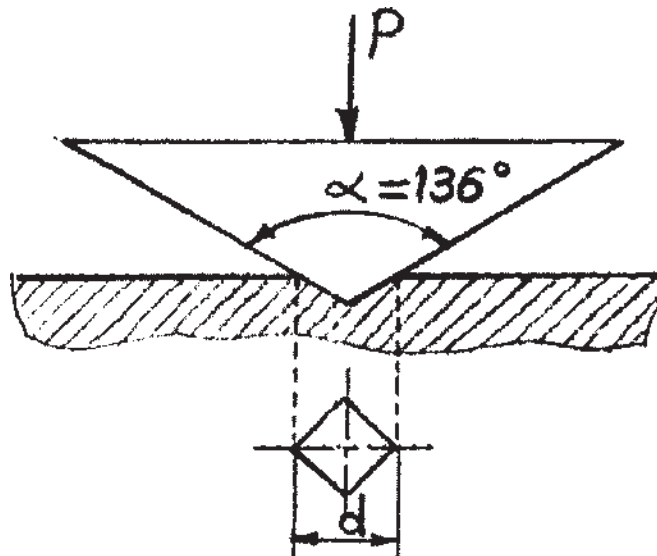
$\alpha$  زاویه‌ی رأس هرم بین دو سطح مقابل (فرجه‌ی بین دو

سطح متساوی الساقین مقابل) که برابر  $136^\circ$  انتخاب شده است؛

d قطر چهار ضلعی اثر (مربع) ایجاد شده توسط هرم بر

حسب میلی‌متر (مطابق شکل ۲-۲۱) و VHN عدد سختی ویکرز

بر حسب  $\text{kfg/mm}^2$  یا  $\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$  است.



شکل ۲-۲۱- اندازه‌گیری سختی ویکرز (اثر نوک هرم)

بار P می‌تواند یکی از مقادیر: ۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، میکرومتردار یا مجهز به صفحه یا پرده‌ی نمایش) (شکل

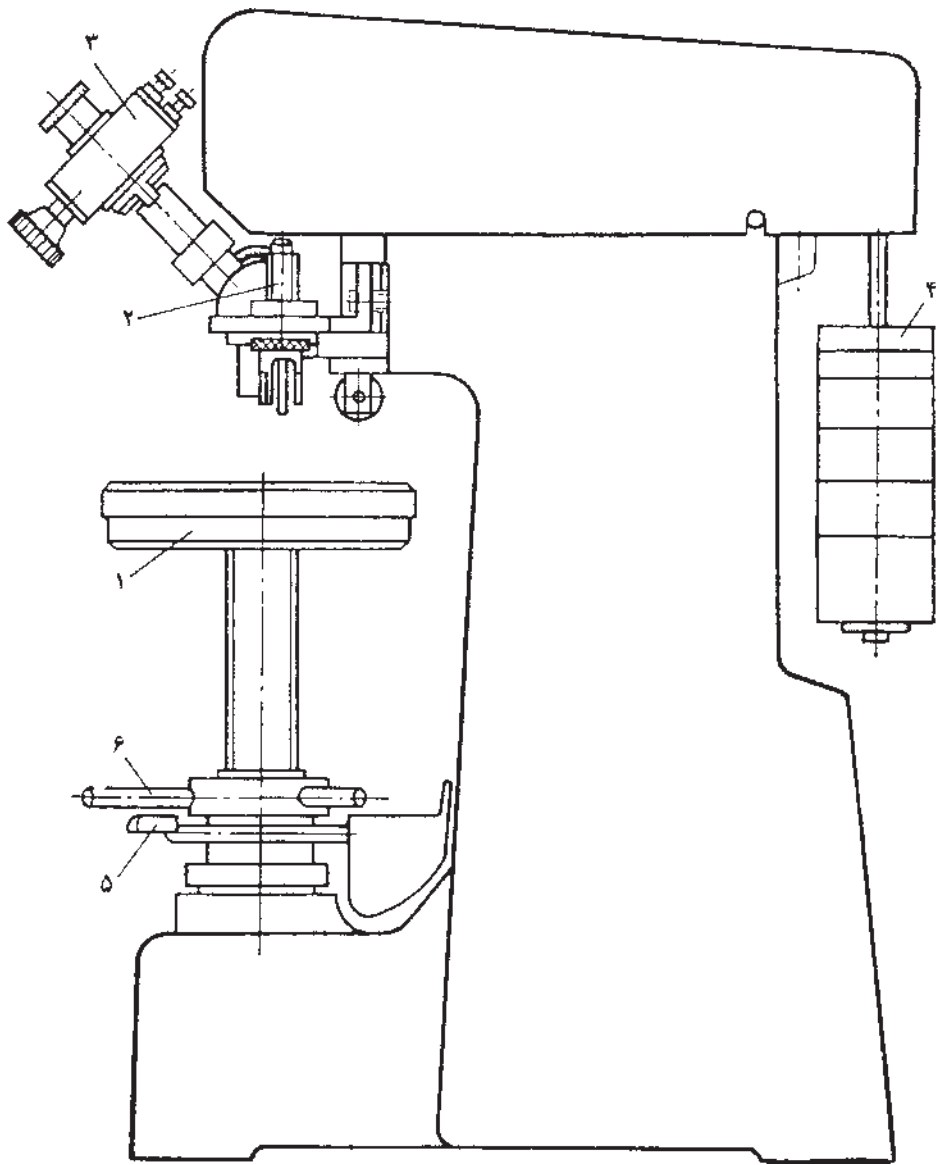
(۲-۲۲)

۵۰۰، ۱۰۰۰ یا ۱۲۰۰ نیوتن باشد.

۲- نمونه‌ی مورد آزمایش

وسایل مورد آزمایش:

۱- دستگاه سختی سنج ویکرز (مجهز به میکروسکوپ



شکل ۲۲-۲- دستگاه سختی سنج ویکرز

۱- صفحه‌ی مقرر نمونه ۲- سنبه و هرم با نوک الماسه ۳- میکروسکوپ ۴- وزنه ۵- پدال یا اهرم شروع کار ۶- گیره‌ی متحرک چرخشی

### نحوه‌ی اجرای آزمایش:

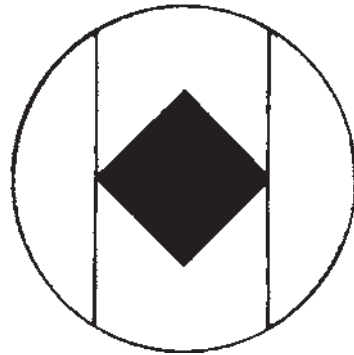
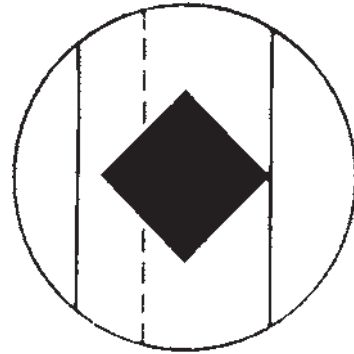
میکروسکوپ میکرومتردار روی دستگاه اندازه‌گیری می‌شود روش اندازه‌گیری بدین صورت است که عدسی میکروسکوپ دارای دو خط نازک (موئی) دقیق و قابل رؤیت است که می‌توان آن‌ها را با چرخاندن پیچ میکرومتر به چپ و راست حرکت داد. ابتدا یکی از خطوط را روی صفر میزان کرده و یک رأس مربع اثر را به آن مماس کرده سپس خط نازک بعدی به رأس مقابل رأس قبلی مماس می‌شود و فاصله بین دو خط موازی از روی

ابتدا دو طرف نمونه مورد آزمایش تراشکاری نموده پولیش می‌کنیم سپس نمونه روی سندان (۱) قرار گیرد در این هنگام با چرخاندن گیره متحرک (۶) سندان و نمونه روی آن را آن قدر بالا می‌آوریم که نمونه با نوک الماس تماس پیدا کند در این حالت بار نهائی P اعمال می‌شود تا نوک الماسه هرم در نمونه فرو رود پس از قطع نیرو و مشاهده سطح اثر قطر مربع اثر (d) توسط

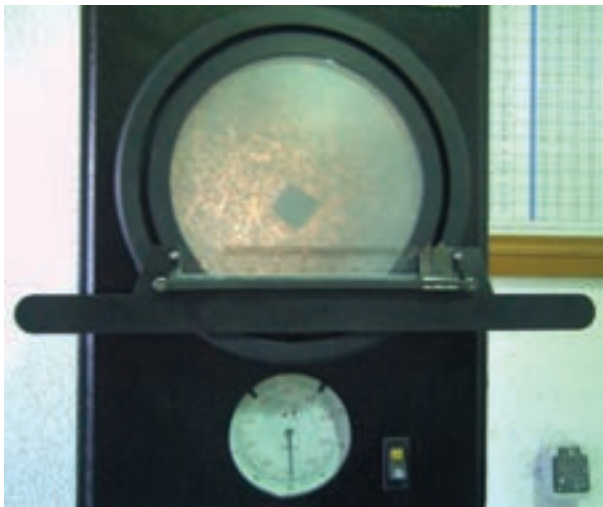


میکرومتر قرائت می‌شود که قطر مورد نظر می‌باشد (شکل ۲۳-۲).  
 قطر به دست آمده را در فرمول VHN قرار داده تا عدد سختی  
 ویکرز به دست آید.

برای دقت در تعیین اندازه‌ی قطر اثر، می‌توانیم قطر دیگر  
 مربع را نیز اندازه بگیریم و میانگین آن را در فرمول تعیین سختی  
 ویکرز منظور کنیم.



شکل ۲۳-۲- اندازه‌گیری قطر مربع اثر در آزمایش سختی ویکرز



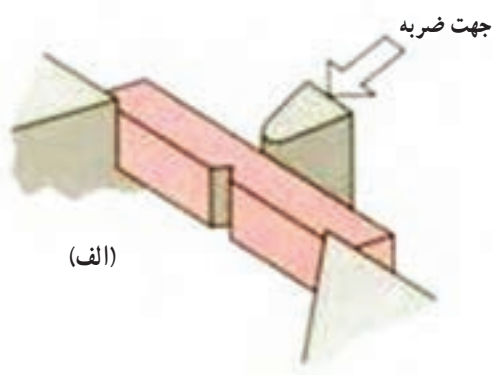
شکل ۲۴-۲- اندازه‌گیری قطر مربع اثر با استفاده از صفحه یا پرده‌ی  
 نمایش (a) ماشین سختی‌سنج اونیورسال الکترونیک (b) اندازه‌گیری با  
 بزرگ کردن روی صفحه

تمرین: سختی چند نمونه فلزی به روش ویکرز را  
 اندازه‌گیری نموده و نتایج را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی  
 ارائه دهید.

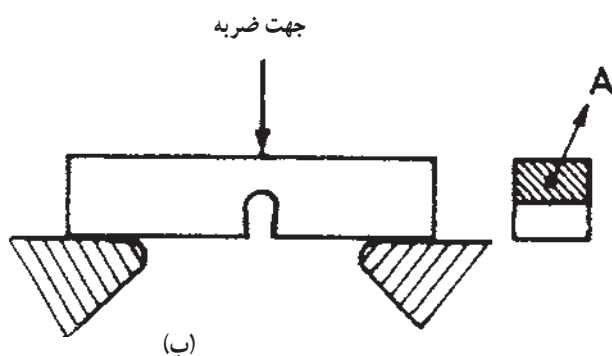
در بعضی از دستگاه‌ها به جای میکروسکوپ از صفحه یا  
 پرده‌ی نمایش<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری قطر مربع اثر استفاده می‌شود.  
 شکل ۲۴-۲ که مجهز به این سیستم است نحوه‌ی عمل را نشان  
 می‌دهد.

این دستگاه یک ماشین اونیورسال الکترونیک آزمایش  
 سختی است و می‌توان آن را با چرخش یک کلید تبدیل به دستگاه  
 سختی‌سنج برینل کرد.

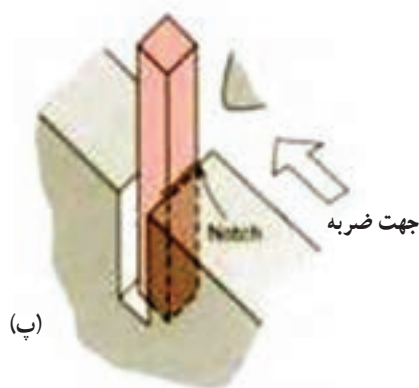
۳-۲- مقاومت در برابر ضربه‌ی فلزات و آلیاژها یکی دیگر از خواص مکانیکی مهم فلزات و آلیاژها مقاومت آن‌ها در مقابل ضربه است که با شکنندگی رابطه‌ای معکوس دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین مقاومت در برابر ضربه وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها روش «شارپی»<sup>۱</sup> و روش «آیزود»<sup>۲</sup> است در روش شارپی، قطعه‌ی نمونه به شکل مکعب مستطیل و با مقطع مربع به ابعاد  $10 \times 10 \times 55$  میلی‌متر بوده و در وسط آن در امتداد عمود بر طول نمونه دو نوع شیار می‌توان تعبیه کرد.



الف) شیار V شکل با زاویه ۴۵ درجه به عمق ۲ میلی‌متر (شکل ۲-۲۵ الف)



ب) شیار U شکل با شعاع ۱ میلی‌متر به عمق ۵ میلی‌متر (شکل ۲-۲۵ ب) ضربه‌ی لازم توسط یک صفحه‌ی مدور سنگین (پاندول) که مجهز به یک تیغه‌ی فولادی است به پشت شیار وارد می‌شود.



در روش آیزود نحوه‌ی عمل مانند روش شارپی است با این تفاوت که شکاف قطعه‌ی نمونه به شکل V بوده و ضربه به یک طرف وارد می‌آید. (شکل ۲-۲۵ پ) سرعت پاندول هنگام برخورد با قطعه‌ی نمونه در روش شارپی ۵/۵ متر بر ثانیه و در روش آیزود ۵/۳ متر بر ثانیه است. سرعت برخورد را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$V = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha_1)}$$

که در آن  $g$  شتاب ثقل زمین  $(9.8 \text{ m/s}^2)$ ،  $V$  سرعت برخورد پاندول با قطعه‌ی نمونه  $(\text{m/s})$ ،  $l$  طول پاندول  $(\text{m})$  و  $\alpha_1$  زاویه‌ی اولیه‌ی پاندول با محور قائم است.

شکل ۲-۲۵- نمونه‌های آزمایش ضربه و جهت ضربه وارد بر آن (الف) شارپی با شیار V شکل (ب) شارپی با شیار U شکل (پ) آیزود

### ۱-۳-۲- آزمایش تعیین میزان مقاومت فلزات،

#### آلیاژها در برابر ضربه

به طور کلی آزمایش های مقاومت آلیاژها در برابر ضربه از اهمیت ویژه ای برخوردارند. زیرا به کمک این آزمایش ها می توان تأثیر عناصر موجود در آلیاژ و هم چنین تأثیر عملیات حرارتی را در واکنش های سختی، سایش و شکنندگی قطعه مورد بررسی قرار داد.

#### وسایل مورد آزمایش:

۱- دستگاه آزمایش مقاومت در برابر ضربه (شکل ۲-۲۶)

۲- نمونه ی استاندارد (شکل ۲-۲۷)

### نحوه ی اجرای آزمایش:

ابتدا نمونه ی استاندارد شارپی مطابق شکل (۲-۲۷) تهیه نموده آن را در دستگاه در جایگاه خود قرار می دهیم سپس ضامن دستگاه را آزاد کرده در نتیجه ضربه لازم توسط پاندول که مجهز به یک تیغه فولادی است به پشت شیار وارد می آید نسبت کار انجام شده (W) برای شکستن نمونه تقسیم بر سطح مقطع اولیه (A) مشخص کننده ی مقاومت در برابر ضربه ی قطعه ی نمونه است.

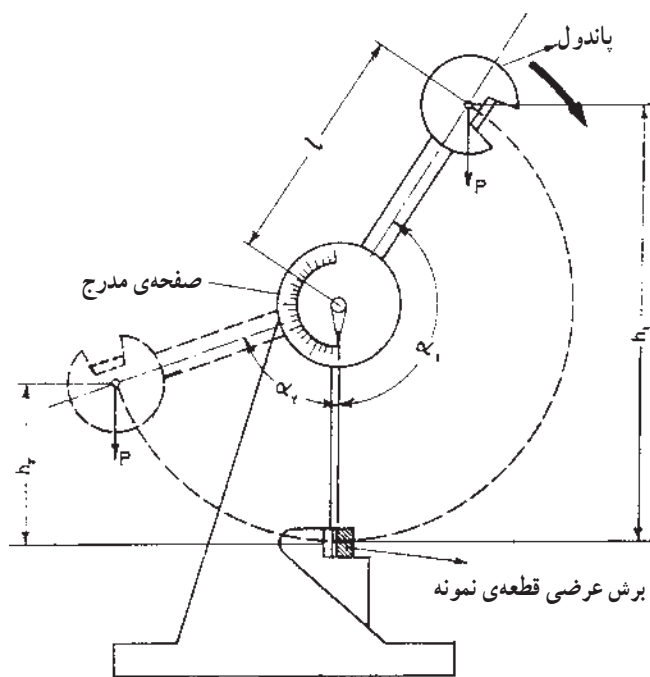
با تعریف اخیر و با توجه به شکل ۲-۲۸ می توان مقاومت

فلز در مقابل ضربه را از رابطه ی زیر محاسبه کرد.

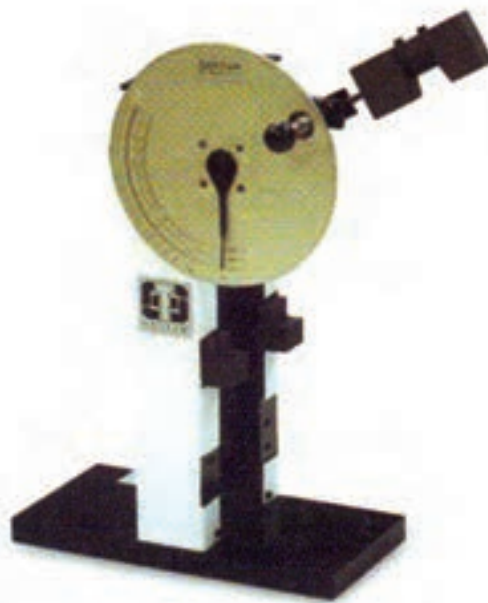
$$a_k = \frac{W}{A} = \frac{P(h_1 - h_2)}{A}$$

چون اندازه گیری زوایای  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  (به کمک صفحه ی مدرج مدرج دستگاه) ساده تر از اندازه گیری ارتفاعات  $h_1$  و  $h_2$  است، به کمک روابط مثلثاتی می توان فرمول فوق را به صورت زیر نوشت:

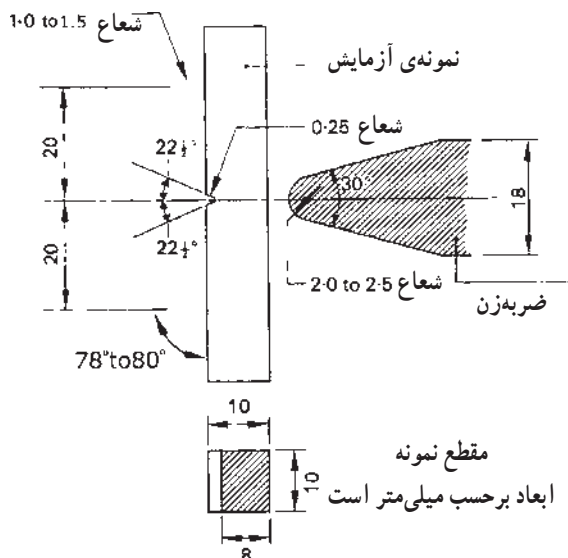
$$a_k = \frac{Pl(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{A}$$



شکل ۲-۲۸- اندازه گیری مقاومت فلزات و آلیاژها در مقابل ضربه



شکل ۲-۲۶- نوعی ماشین آزمایش مقاومت ضربه



شکل ۲-۲۷- نمونه ی آزمایش شارپی

در روابط فوق :

W کار انجام شده برای شکستن قطعه برحسب kgm  
(کیلوگرم متر)،

A سطح مقطع شکستگی در محل شکاف بر حسب  $\text{cm}^2$  ،

P وزن پاندول بر حسب kgf ،

$h_1$  ارتفاع اولیه پاندول بر حسب m ،

$h_2$  ارتفاع پاندول بعد از شکستن قطعه ی نمونه بر حسب

m ،

l طول پاندول بر حسب m ،

$\alpha_1$  زاویه ی اولیه ی پاندول (زاویه ی ضربه) با محور قائم،

$\alpha_2$  زاویه ی پاندول با محور قائم بعد از شکستن قطعه ی

نمونه است. زاویه ی  $\alpha_1$  مقداری ثابت و زاویه ی  $\alpha_2$  از روی صفحه ی مدرج دستگاه تعیین می شود.

با توجه به واحدهای فوق واحد مقاومت به ضربه ( $a_k$ )،

$$\frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2} \text{ خواهد بود.}$$

مثال: یک قطعه ی نمونه با ابعاد استاندارد شده مطابق

شکل ۲۹-۲ مورد آزمایش مقاومت در برابر ضربه قرار می گیرد.

در صورتی که وزن پاندول ۴ کیلوگرم نیرو و طول آن ۹۰ سانتی متر

و زاویه ی اولیه ی پاندول برای رها کردن آن  $135^\circ$  و زاویه ی بعد

از شکستن قطعه ی نمونه  $30^\circ$  باشد مطلوب است.

الف) سطح مقطع اولیه ی نمونه.

ب) مقاومت قطعه ی نمونه در برابر ضربه برحسب

$$\text{kgm/cm}^2$$

ج) سرعت پاندول هنگام برخورد با نمونه بر حسب m/s .

حل:

الف) چنانچه در شکل ملاحظه می شود سطح مقطع

قطعه ی نمونه مستطیلی است به ابعاد  $10 \times 8$  میلی متر (سطح

هاشور خورده) بنابراین می توان نوشت :

$$A = 10 \times 8 = 80 \text{ mm}^2 = 0.8 \text{ cm}^2$$

سطح مقطع اولیه ی قطعه ی نمونه

ب) مقاومت در برابر ضربه از فرمول زیر محاسبه می شود.

$$a_k = \frac{P \times l (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{A}$$

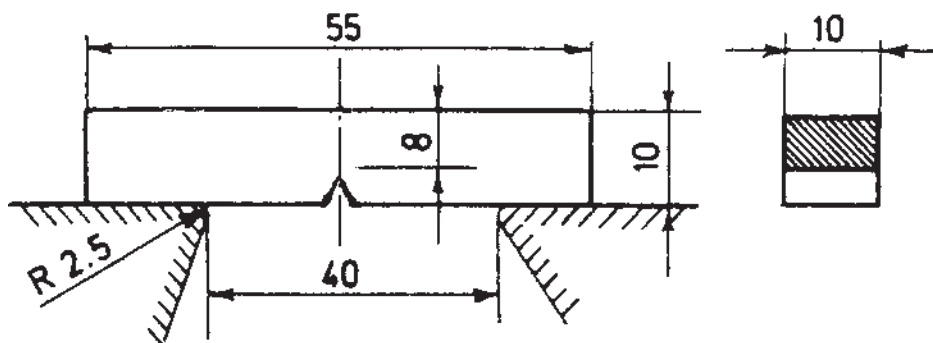
با توجه به مقادیر داده شده در مثال می توان نوشت :

$$P = 4 \text{ kgf}$$

$$l = 90 \text{ cm} = 0.9 \text{ m}$$

$$\cos \alpha_1 = \cos 135^\circ = -\frac{\sqrt{2}}{2} = -0.707$$

$$\cos \alpha_2 = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$$



شکل ۲۹-۲- شکل و اندازه ی یک قطعه نمونه برای آزمایش مقاومت در برابر ضربه

$$a_k = \frac{4 \times 0.9 (0.866 - (-0.707))}{0.8} = 7.08 \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2}$$

با قرار دادن این مقادیر در فرمول فوق مقاومت قطعه ی

نمونه در برابر ضربه تعیین می شود.

مقاومت در برابر ضربه در تحت شرایطی که قطعه مورد استفاده قرار می‌گیرد لازم است.

**توضیح:** واحد مقاومت در مقابل ضربه ( $a_k$ ) را می‌توان با منظور کردن و نام بردن روش آن (شارپی یا آیزود) برحسب (ژول) بیان کرد در این صورت واحد سطح مقطع برابر یک سانتی‌متر مربع است.

### تمرین

مقاومت به ضربه چند نمونه فلزی را به روش شارپی اندازه‌گیری نموده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

ج) سرعت پاندول هنگام برخورد با نمونه نیز از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$V = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha_1)}$$

$$V = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.9(1 + 0.707)} = \sqrt{30.142}$$

$$\approx 5.48 \text{ m/s}$$

باید توجه کرد که مقاومت در برابر ضربه نیز مانند خواص کششی در اثر درجه حرارت تغییر می‌کند. اگر قطعه‌ای در مناطق سردسیر مورد استفاده قرار گیرد از مقاومت کم‌تری در مقابل ضربه برخوردار است. این موضوع با توجه به آن که با افزایش درجه حرارت، مقاومت در مقابل ضربه نیز افزایش می‌یابد (هرچند در تغییرات کوچک درجه حرارت، اندازه‌گیری تفاوت‌های حاصله بسیار ناچیز است) و برعکس، استاندارد کردن آزمایش‌های



## متالوگرافی

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از هنرجو انتظار می‌رود که:

- ۱- با متالوگرافی آشنا شود و روش‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی انجام دهد.
- ۲- آزمایش‌های مربوط به ساختار ماکروسکوپی آلومینیم و آلیاژهای آن را انجام دهد.
- ۳- آزمایش‌های مربوط به ساختار میکروسکوپی آلیاژهای آهنی (فولادها، چدن‌ها) را انجام دهد.

### ۳- متالوگرافی<sup>۱</sup>

به‌خصوص علم فیزیک و اختراع میکروسکوپ‌های جدید مطالب بسیار زیادی در خصوص اندازه و شکل دانه‌های فلزات و آلیاژها و خواص آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر با اختراع میکروسکوپ‌های الکترونی<sup>۲</sup> و دستگاه تفرق اشعه‌ی X<sup>۳</sup> اطلاعات بسیار در رابطه با متالوگرافی به‌دست آمده که کمک شایانی به پیشرفت دانش متالورژی کرده است.

مطالعه بر روی ساختمان فلزات و آلیاژها به دو روش ماکروسکوپی و میکروسکوپی انجام می‌شود.

متالوگرافی عبارت است از مطالعه‌ی ساختمان داخلی فلزات و آلیاژها، حدود ۲۰۰ سال پیش (۱۸۰۰ میلادی) دانشمندان مطالعه‌ی فلزات را در زیر میکروسکوپ آغاز کردند و توانستند ارتباط بین اندازه‌ی دانه‌ها و سختی فلزات را بیابند و به وجود خطوط در ساختمان میکروسکوپی فولادهای سخت شده و خواص آن‌ها پی ببرند.

امروزه روش‌ها و ابزارهای متعددی به منظور ظاهر ساختن ترکیب ساختمان فلزات و آلیاژها وجود دارد. با پیشرفت علوم

### ۱-۳- آزمايش شماره ۱

مطالعه بر روی ساختمان فلزات به روش

ماکروسکوپی<sup>۱</sup>

مطالعه‌ی ماکروسکوپی برای پی بردن به شکل انجماد اندازه‌ی دانه‌ها و هم‌چنین بررسی حفره‌های انقباضی، گازی و ترک‌ها به کار می‌رود. مشاهده در این روش معمولاً با چشم غیر مسلح و یا با عدسی‌هایی با بزرگ‌نمایی کم انجام می‌شود. این عمل پس از انتخاب نمونه و انجام مراحل آماده‌سازی آن و اثر دادن مواد آشکارساز انجام می‌پذیرد.

با مطالعه‌ی ماکروسکوپی قطعات ریخته‌گی می‌توان:

(الف) حفره‌های گازی و انقباضی را تعیین نموده و آن‌ها

را از یکدیگر تشخیص داد.

(ب) شکاف‌ها و محفظه‌های تشکیل شده در اثر شرایط

نامناسب ذوب، ریخته‌گری و انجماد را مشاهده نمود.

(پ) ترک‌های به‌وجود آمده در قطعات آهن‌گری و نورد

شده در حین کار مکانیکی یا عملیات حرارتی را مشخص نمود.

(ت) مک‌های گازی ناشی از جوش کاری را که در محل

جوش به‌وجود می‌آید تعیین نمود.

در این روش ساختار فلزات با بزرگ‌نمایی حداکثر ۱۰

برابر صورت می‌گیرد. این امر موجب می‌شود تا یک مطالعه‌ی

اجمالی بر روی سطح وسیعی از نمونه مورد آزمایش انجام پذیرد

و اغلب نیز اطلاعات اولیه‌ای راجع به کیفیت قطعه، یک

پارچگی فلز و ساختار آن، انجماد، طبیعت و کیفیت عملیات

نهایی (ریخته‌گری، کار مکانیکی، جوش کاری و ...) به دست

می‌آید.

شکل‌های ۱-۳، ۲-۳، ۳-۳ و ۴-۳ ساختار ماکروسکوپی

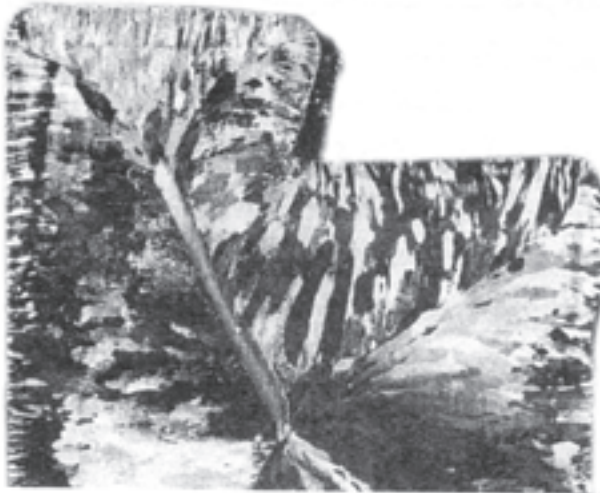
چند نوع آلیاژ آلومینیوم (Al) را نشان می‌دهد.

(الف) ساختار نوعی شمش آلومینیوم: همان‌طور که در

شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود در کناره‌های شمش دانه‌های تیریدی

ریز وجود دارد و دانه‌های ستونی از کنار به طرف وسط کشیده

شده‌اند.



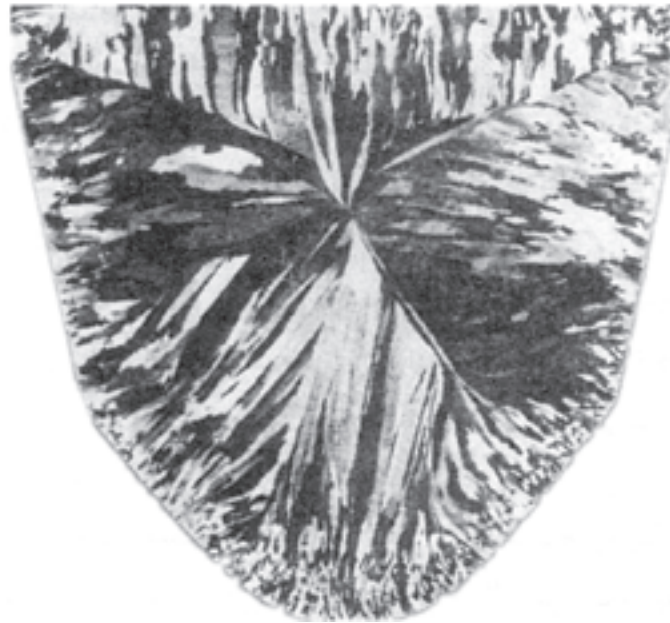
شکل ۱-۳- شمش آلومینیوم بزرگ‌نمایی  $\times 1$  محلول اچ‌تاکر

(ب) شمش آلومینیوم با مواد اصلاح‌کننده: نمونه‌ی همان شمش قبلی است ولی از مواد اصلاح‌کننده استفاده شده است و همان‌طور که در شکل ۲-۳ دیده می‌شود دانه‌های تشکیل شده‌ی آن ظریف‌ترند.



شکل ۲-۳- شمش آلومینیوم بزرگ‌نمایی  $\times 1$  محلول اچ‌تاکر

پ) شمش آلومینیوم: شکل ۳-۳ مربوط به یک نوع شمش آلومینیومی است که بر اثر انتقال حرارت سریع دانه‌های تبریدی به وجود آمده و دانه‌های ستونی نیز بعد از دانه‌های تبریدی به وجود آمده است.



شکل ۳-۳- شمش آلومینیوم بزرگ‌نمایی  $\times 1$  محلول اچ تاگر

برای مشاهده‌ی بهتر بعضی از آلیاژها از نظر دانه‌بندی معمولاً آن‌ها را آنیل می‌کنند.

وسایل مورد نیاز

اره دستی، سوهان خشن و نرم

سنباده از خشن تا ظریف

محلول اچ طبق جدول شماره ۱-۳ متناسب با جنس

نمونه

آب مقطر - الکل - خشک‌کن - شیشه ساعت - انبرک

نمونه‌گیر

نکات ایمنی: رعایت نکات ایمنی لازم و ضروری است

مراحل انجام آزمایش

۱- انتخاب نمونه: نمونه باید از محلی از قطعه انتخاب

شود که معرف و نماینده‌ی کل آن باشند. اندازه‌ی قطعات

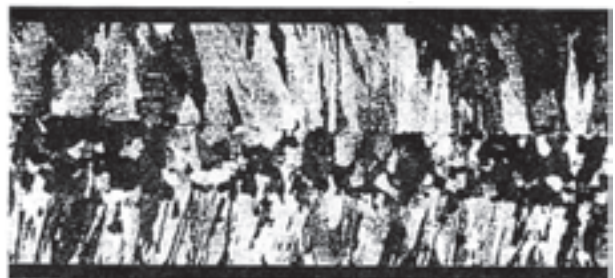
ماکروسکوپی معمولاً بزرگ است و در بعضی مواقع حتی مقاطع

شمش‌ها را در اندازه‌ی واقعی از مقطع، می‌توان برای آزمایش

ت) آلیاژ آلومینیوم: در شکل ۳-۴ در تصویر الف و ب دو

نمونه از یک آلیاژ مشاهده می‌شود. در تصویر الف دانه‌های تبریدی

و ستونی هم‌محور و در تصویر ب همان آلیاژ با مواد اصلاح‌کننده.



الف



ب

شکل ۳-۴

انتخاب کرد.

عمل سنباده کاری از سنباده های زبر شروع شده و به سنباده های ظریف تر ادامه داده می شود. در جابه جایی به سنباده ی ظریف تر، نمونه  $90^\circ$  چرخانده می شود. در هر مرحله باید نمونه و دست با آب کاملاً شسته شود تا براده ای باقی نماند و سپس سنباده کاری بر روی سنباده ی بعدی ادامه یابد.

عمل مداوم ریختن آب بر روی سنباده باعث شستن براده های ایجاد شده و خنک کردن نمونه ها می شود. فشار آب نیز باید مناسب بوده و تمام سطوح سنباده را پوشش دهد عمل سنباده کاری علاوه بر این روش با استفاده از سنباده ی دوار برقی نیز انجام می شود. (شکل ۳-۶) در این روش از یک الکتروموتور و صفحه ی دوار که بر روی آن سنباده چسبیده شده است استفاده می شود.



شکل ۳-۶

۴- آشکار سازی یا اچ کردن: پس از آماده سازی نمونه برای آشکار کردن ساختار آن، نمونه را اچ می کنند.

۲- برش و سوهانکاری: برش نمونه به وسیله اره های دستی یا اره لنگ انجام می گیرد و برای سوهانکاری از سوهان های خشن شروع و به سوهان ظریف ختم می شود.

تذکره: در جریان برش و سوهانکاری باید دقت کافی به عمل آید تا سایش باعث گرم شدن زیاد نمونه نشود.

۳- سنباده کاری: پس از انجام انتخاب نمونه و سوهانکاری نمونه را سنباده کاری می کنند عملیات سنباده کاری معمولاً بر روی یک سری سنباده که بر روی صفحه ی صاف و تخت که دارای شیب مشخصی است انجام می شود و بر روی سنباده ها آب ریخته می شود. بنابراین جنس سنباده باید ضدآب باشد.

سنباده ها معمولاً دارای زبری مشخصی هستند و عدد زبری سنباده روی آن نوشته شده است. این ارقام معمولاً به صورت ۸۰ - ۱۲۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ می باشد که هرچه عدد بزرگ تر باشد نشان دهنده ی نرم تر بودن سنباده است.

در شکل ۳-۵ صفحه ی سنباده، نحوه ی چسباندن سنباده، بر روی صفحه و روش سنباده کاری مشاهده می شود. همان طوری که در این شکل دیده می شود نمونه باید با فشار متوسط دست و از پایین به طرف بالا حرکت داده شود.



شکل ۳-۵

اچ کردن عبارت است از ایجاد خوردگی ضعیف توسط مواد خورنده. مواد اچ و روش اچ کردن برای فلزات و آلیاژهای مختلف متفاوت است. در جدول ۱-۳ انواع محلول‌های اچ و خشک می‌کنند. کاربردشان آمده است. پس از اچ کردن معمولاً نمونه‌ها را با الکل یا آب شسته و خشک می‌کنند.

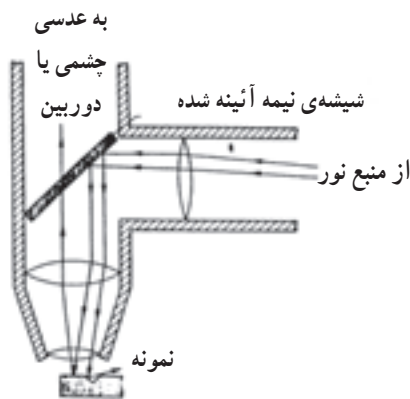
جدول ۱-۳- مواد اچ، ماکروسکوپی و کاربرد آن‌ها

فلز و آلیاژ	محلول خورنده یا ظاهرکننده‌ی اچ	ترکیب	کاربرد
فولاد و چدن	شماره ۱ اسید کلریدریک	۵۰ میلی لیتر اسید کلریدریک ۵۰ میلی لیتر آب	سگرگاسیون (جدایش) تخلخل، ترک‌ها عمق منطقه‌ی سخت
	شماره ۲ نایتال	۵ میلی لیتر اسید نیتریک ۹۵ میلی لیتر الکل اتیلیک	عمق سختی کربوره شده کربن‌گیری شده‌ی ساختمان جوش، منطقه‌ی اثر جوش
مس و آلیاژهای آن	شماره ۳ اسید نیتریک	۱۰ تا ۳۵٪ اسید نیتریک	اندازه‌ی دانه‌ها، تخلخل، انیکلوژن‌ها
	شماره ۴ هیدرواکسید سدیم	۱۰ میلی لیتر HF ۱۵ میلی لیتر HCl ۲۵ میلی لیتر اسید نیتریک ۵۰ میلی لیتر آب	خورنده‌ی عالی برای آلیاژهای یاتاقان و مس
آلومینیوم و آلیاژهای آن	شماره ۵ هیدرواکسید سدیم	۱۵۰ گرم سود و ۹۰ میلی لیتر آب گرم	می‌تواند برای ظاهر کردن ماکروسکوپی به کار رود
	شماره ۶ اچ فلیک	۱۰ میلی لیتر HF ۱۰ میلی لیتر اسید HCl ۹۰ میلی لیتر آب	آزمایش ماکروسکوپی آلیاژهای آلومینیوم ۱۰ تا ۲۰ ثانیه غوطه‌ور کنید و در آب گرم بشوید و سپس در اسید نیتریک غلیظ فرو ببرید.

۵- بررسی ساختار ماکروسکوپی: پس از انجام عملیات اچ کردن ساختار نمونه را با چشم غیرمسلح بررسی نموده و مشاهدات خود را از نمونه بر روی کاغذ رسم کنید. تمرین ۱- چند نمونه آلومینیومی که با سرعت‌های مختلف منجمد شده‌اند را آماده‌سازی نموده و ساختار ماکروسکوپی آن‌ها را بررسی و مقایسه نمایید. تمرین ۲- چند نمونه از آلومینیوم‌های ریخته‌گری شده با مواد جوانه‌زا و بدون مواد جوانه‌زا را آماده‌سازی نموده و ساختار ماکروسکوپی آن‌ها را بررسی و با هم مقایسه نمایید.

## ۲-۳- آزمایش شماره ۲

خواهد شد.  
همان طور که در شکل ۳-۷ مشاهده می‌گردد نور تابیده شده به سطح قطعه پس از برخورد به قسمت فرورفتگی شکسته می‌شود و در همان نقاط محل‌های تیره برای مشاهده‌ی تصویر به وجود می‌آید.



شکل ۳-۷

شکل ۳-۸ اجزای مکانیکی و نوری یک میکروسکوپ متالوگرافی را نشان می‌دهد. قسمت‌های مختلف آن عبارت‌اند از:

- ۱- عدسی جمع‌کننده‌ی نور
- ۲- نگهدارنده‌ی کمی
- ۳- دیافراگم اول
- ۴- فیلتر
- ۵- دیافراگم دوم
- ۶- عدسی متمرکزکننده‌ی نور
- ۷- نمونه‌ی پولیش شده
- ۸- عدسی شیئی
- ۹- منعکس‌کننده
- ۱۰- لوله‌ی همراه با عدسی
- ۱۱- تجزیه‌کننده‌ی چرخان اشعه نور
- ۱۲- عدسی چشمی

برای تنظیم کردن میکروسکوپ و گرفتن تصویر، ابتدا به وسیله‌ی پیچ تنظیم بزرگ نمونه را به عدسی شیئی نزدیک کرده و

مطالعه بر روی ساختار فلزات به روش میکروسکوپی مطالعه‌ی میکروسکوپی به منظور بی‌بردن به شکل، نوع، اندازه‌ی دانه‌ها و فازها و همچنین شکل و نوع پخش پراکندگی بر روی فلزات و آلیاژها صورت می‌گیرد. در بررسی میکروسکوپی معمولاً بزرگ‌نمایی بالا است. در بعضی منابع از ۷۵ تا ۱۵۰۰ برابر نیز گفته شده است.

برخی از کاربردهای متالوگرافی از این قرار است.  
الف) تعیین و تشخیص فازهای تعادلی و غیرتعادلی  
ب) تعیین روش تولید و انجام عملیات انجام شده بر روی قطعات

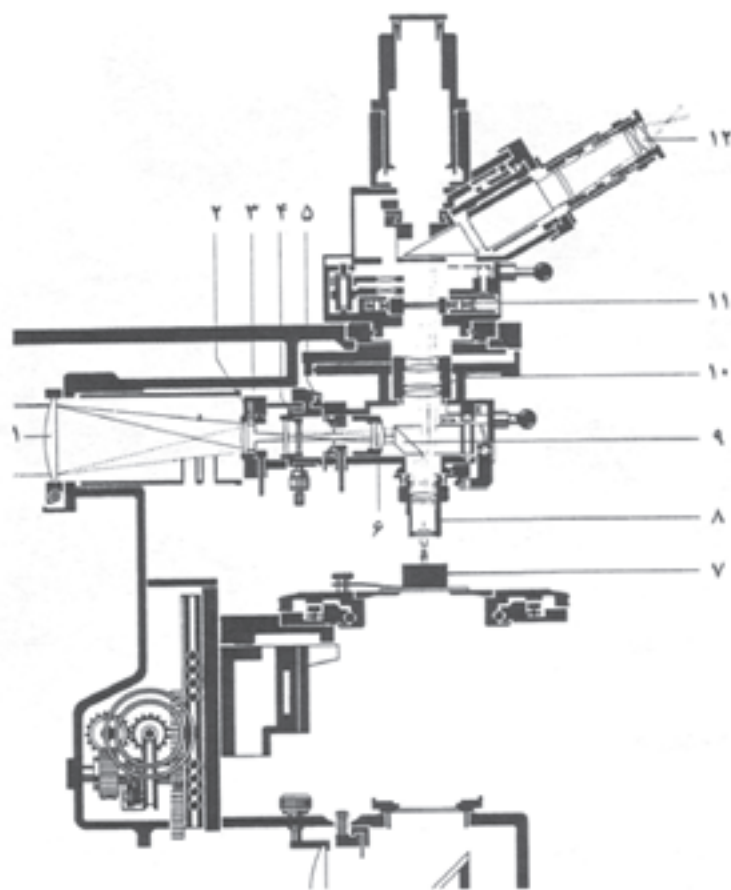
ج) متالوگرافی کمی  
و سایر موارد نیاز:

اره‌دستی، سوهان خشن و نرم، سنباده ضدآب در شماره‌های مختلف، محلول اچ مناسب با جنس نمونه، آب مقطر، الکل، خشک‌کن، دستگاه پولیش ماهوت، پودر اکسیدآلومینیم، انبرک نمونه‌گیر، دسیکاتور، میکروسکوپ متالوگرافی با دوربین مدار بسته، دستگاه مانت، شیشه ساعت

## میکروسکوپ‌های نوری متالوگرافی

اجزا و طرزکار میکروسکوپ نوری متالوگرافی:  
میکروسکوپ نوری متالورژی دارای یک سیستم نوری و یک سیستم روشنایی است.

سیستم نوری شامل عدسی‌های چشمی و عدسی‌های شیئی است. سیستم روشنایی که از یک منبع نوری با شدت بالا ساخته شده است توسط عدسی‌های متراکم‌کننده (جمع‌کننده) و بایک منعکس‌کننده، نور را به سطح قطعه‌ی مورد آزمایش می‌تاباند. همان‌طور که در شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود شعاع‌های نوری توسط یک منعکس‌کننده به سطح قطعه تابانده می‌شود. در صورتی که در قطعه فرورفتگی و برجستگی (محل اچ شده) وجود داشته باشد، شعاع‌های نوری تابیده شده، با بازتابش، یکسان نخواهد بود در نتیجه تصویر از محل فرورفتگی‌ها پدیدار



شکل ۳-۸



سپس با پیچ تنظیم ظریف تر تصویر را ظاهر می نمایند.  
 انواع میکروسکوپ های نوری متالوگرافی:  
 میکروسکوپ های نوری متالوگرافی از نوع انعکاسی می باشند و  
 بر حسب قرار گرفتن نمونه روی میکروسکوپ به دو نوع معکوس  
 و مستقیم تقسیم می شوند.

**الف) نوع مستقیم:** در این نوع نور از قسمت بالا به  
 سطح قطعه تابیده شده و نمونه حتماً باید دارای دو سطح کاملاً  
 موازی باشد (شکل ۳-۹).

شکل ۳-۹- متالوگراف مستقیم

ب) نوع معکوس: در این نوع نمونه به طور معکوس روی میز دستگاه بالای عدسی شیئی قرار می‌گیرد و به موازی بودن دو سطح قطعه‌ی مورد آزمایش نیازی نیست (شکل ۱۰-۳).



شکل ۱۰-۳- متالوگراف معکوس

روشن است خودداری نمایید.  
۶- در هنگام قرار دادن نمونه روی میز میکروسکوپ دقت شود تا نمونه به عدسی شیئی برخورد نکند.  
۷- شدت نور را همیشه در حد مجاز تنظیم نمایید تا عمر لامپ و سیستم برقی دستگاه بیش تر شود.  
۸- هرگز بر روی میز میکروسکوپ و اجزای متحرک آن فشار وارد نیاورید.

رعایت نکات ایمنی هنگام آزمایش ضروریست  
مراحل انجام آزمایش: برای انجام آزمایش میکروسکوپی بدین ترتیب عمل می‌شود:

۱- انتخاب نمونه: انتخاب نمونه‌های متالوگرافی که می‌باید زیر میکروسکوپ قرار بگیرند از اهمیت زیادی برخوردار است، نمونه‌ی انتخاب شده باید نماینده‌ی کامل فلز یا آلیاژ باشد. برای جدا کردن نمونه از قطعه چنانچه فلز یا آلیاژ نرم باشد از اره استفاده می‌شود و برای فلزات و آلیاژهای سخت می‌توان با استفاده از ضربات چکش قطعه را شکست و نمونه‌ی مناسب

برای به دست آوردن بزرگ‌نمایی میکروسکوپ معمولاً عددی که روی عدسی شیئی نوشته شده ضرب در عدد عدسی چشمی می‌شود. به عنوان مثال، اگر بزرگ‌نمایی عدسی شیئی ۲۰ برابر و بزرگ‌نمایی عدسی چشمی ۱۰ برابر باشد بزرگ‌نمایی میکروسکوپ  $20 \times 10 = 200$  برابر خواهد بود.

نکاتی که در هنگام استفاده از میکروسکوپ متالورژی باید رعایت نمود:

۱- میکروسکوپ وسیله‌ای بسیار گران‌قیمت و باارزش است و در حفظ و نگهداری آن باید دقت کافی داشته باشید.  
۲- قطعه‌ی مورد آزمایش حتماً باید خشک و عاری از الکل، رطوبت و چربی باشد.  
۳- میز میکروسکوپ باید محکم باشد تا در هنگام کار ارتعاش نداشته باشد.  
۴- لامپ میکروسکوپ را به هیچ‌وجه با دست لمس نکنید و برای تمیز کردن آن از وسایل مجاز استفاده نمایید.  
۵- از ضربه زدن و جابه‌جا کردن میکروسکوپ وقتی که



نمونه‌های کوچک و با شکل‌های مشخص را به راحتی در دست گرفت و عملیات بعدی را روی آن‌ها انجام داد. برای نمونه قالبی تهیه می‌کنند و نمونه را در داخل آن قالب سوار می‌کنند. این عمل را مانت کردن می‌گویند. روش کار به این ترتیب است که نمونه را در کف یک قالب استوانه‌ای با ارتفاع و قطر مشخص قرار داده و سپس مواد مصنوعی مانند باکلیت و یا رزین‌های اپوکسی داخل قالب و روی آن نمونه می‌ریزند و پس از مدتی مواد سخت شده و نمونه را در داخل خود می‌گیرند. سپس نمونه را همراه با مواد از قالب خارج می‌نمایند. حال نمونه برای انجام عملیات بعدی به راحتی قابل استفاده است. (شکل ۱۲-۳)



شکل ۱۲-۳

شکل ۱۲-۳ یک نمونه‌ی متالوگرافی را که با مواد مصنوعی مونتاژ شده است نشان می‌دهد.  
**۳- سنباده‌کاری:** پس از انجام مراحل انتخاب نمونه و مانت کردن نمونه را مطابق روش ماکروسکوپی سنباده‌کاری می‌کنند.

**۴- پولیش کردن (صیقل کاری):** حساس‌ترین و مهم‌ترین مراحل آماده‌سازی برای آزمایش متالوگرافی، پولیش کردن است. عمل پولیش کردن توسط دستگاه پولیش انجام

برای متالوگرافی را از آن انتخاب نمود، در جریان برش یا سنگ زدن نمونه، باید دقت کافی به عمل آید تا سایش باعث گرم شدن زیاد نمونه نشود. چون گرم شدن بیش از حد باعث تغییر ساختار متالوگرافی و خواص متالورژیکی آن می‌شود. در انتخاب نمونه باید دقت شود تا نمونه تمام مشخصات قطعه‌ی مادر را داشته باشد. مثلاً برای یک ورق که نورد شده و در قسمت‌های مختلف دارای خواص متفاوت است باید از چند قسمت نمونه‌برداری شود. در بررسی عیوب متالورژیکی در ریخته‌گری نمونه باید از محل عیب انتخاب شود. دستگاه‌هایی نیز برای جدا کردن نمونه از قطعه وجود دارد که به آن‌ها کاتر<sup>۱</sup> می‌گویند.

شکل ۱۱-۳ یک نوع کاتر را که برای بریدن نمونه مناسب است نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۳- دستگاه کاتر (برش)

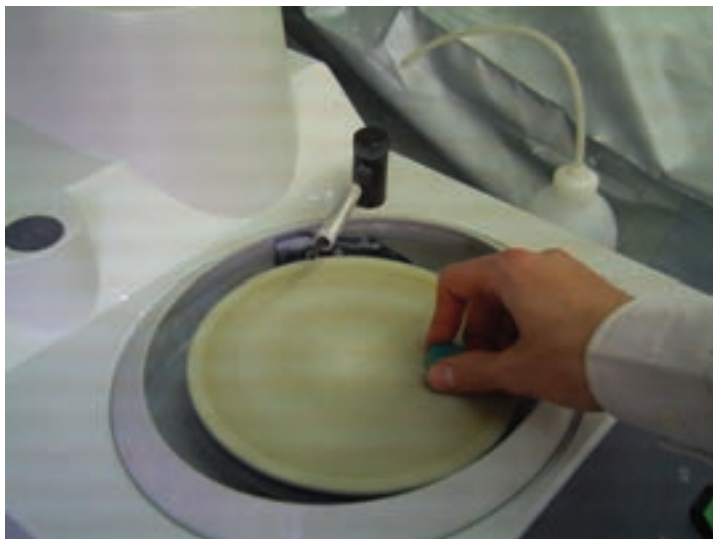
اندازه‌ی نمونه‌ها معمولاً ۱۵×۱۰×۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

**۲- مونتاژ کردن (مانت کردن):** برای آن که بتوان

۱ - Cutter

مخلوط کرد و همراه با آب بر روی صفحه‌ی پولیش ریخت. فشار قطعه بر روی صفحه‌ی پولیش باید مناسب باشد. اگر فشار زیاد باشد، صفحه‌ی پولیش باعث خط انداختن روی قطعه می‌گردد.

شکل ۱۳-۳ الف یک دستگاه پولیش را نشان می‌دهد. در حین پولیش کردن، قطعه در مسیری به صورت 8 (8 لاتین) روی صفحه‌ی پولیش، در خلاف جهت صفحه‌گردان حرکت داده می‌شود در ضمن، مدت زمان پولیش کردن معمولاً به جنس نمونه، نوع مواد ساینده و سرعت دوران حرکت دستگاه پولیش بستگی دارد (شکل ۱۳-۳ ب).



شکل ۱۳-۳ ب

می‌شود این دستگاه دارای یک صفحه صاف و گرد می‌باشد که توسط الکتروموتور به چرخش درمی‌آید روی صفحه‌ی گردان از پارچه‌ی ماهوت پوشیده می‌شود. عمل پولیش با مواد ساینده مثل پودر اکسید آلومینیوم (کوراندوم) و یا اکسید منیزیم در اندازه‌ی بسیار ظریف، یعنی همراه با پاشیدن آب انجام می‌شود. تعداد دور صفحه‌ی دوار معمولاً بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ دور بر دقیقه است.

در هنگام پولیش کردن حتماً آب باید از بالا و به مقدار مناسب به وسط صفحه‌ی پولیش ریخته شود تا براده‌های ایجاد شده را با خود ببرد. پودر ساینده را باید با مقدار مناسبی آب



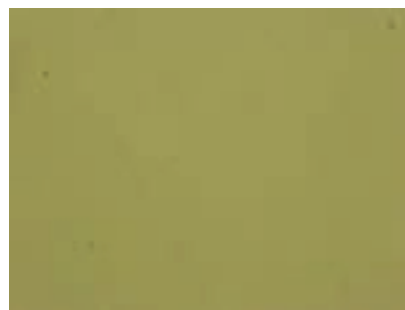
شکل ۱۳-۳ الف

اکثر چدن‌های دارای گرافیت، مثل چدن خاکستری مالیبیل و داکتیل را پس از پولیش کردن مورد مطالعه‌ی متالوگرافی قرار می‌دهند.

علاوه بر پولیش کردن با استفاده از مواد ساینده، روش‌های دیگری نیز برای این کار وجود دارد که از آن جمله می‌توان از روش الکتروپولیش نام برد.

در روش الکتروپولیش که روز به روز بر اهمیت آن افزوده می‌شود از جریان الکتروسیسته و محلول‌های الکترولیت استفاده می‌شود. مکانیزم کار بدین شکل است، برجستگی‌هایی که بر روی

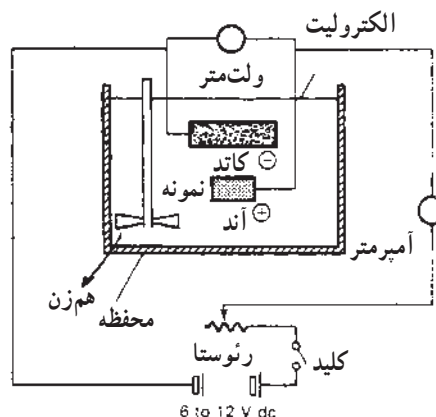
پس از عمل پولیش قطعات باید به صورت آینه و عاری از هرگونه خطوط و فرورفتگی باشند (شکل ۱۴-۳).



شکل ۱۴-۳

سطح قطعه وجود دارند به وسیله‌ی جریان الکتریسیته همراه با محلول الکترولیت خورده می‌شوند (شکل ۱۵-۳).

مزایای الکتروپولیش نسبت به دستگاه‌های ساینده به شرح زیر است:



شکل ۱۵-۳- دستگاه الکتروپولیش

- ۱- تسریع در پولیش نمونه‌ها
  - ۲- یک‌نواختی و صافی سطوح
  - ۳- امکان استفاده از انواع نمونه‌ها
  - ۴- اچ کردن (حک‌کاری): در مورد اکثر فلزات و آلیاژها پس از پولیش کردن در زیر میکروسکوپ نوری متالورژی تصویری مشاهده نمی‌شود. چون زاویه‌ی تابش نور با زاویه‌ی بازتابش برابر است تصویری تشکیل نخواهد شد.
  - ۵- به وسیله‌ی مواد خورنده‌ی فلزات، نظیر اسیدها با غلظت‌های مختلف (محلول اچ) خوردگی روی سطح فلزات ایجاد می‌کنند، این خوردگی ضعیف باعث شکست نور شده و در نتیجه تصویر پدید می‌آید.
- برای اچ کردن معمولاً از مواد خاصی با درصد معینی استفاده می‌شود این مواد در جدول ۲-۳ آمده است.

در این روش عواملی نظیر شدت جریان الکتریسیته، ولتاژ، زمان، درجه حرارت محلول الکترولیت و نوع محلول بر روی پولیش کردن مؤثرند.

جدول ۲-۳- مواد اچ و موارد کاربرد آن‌ها

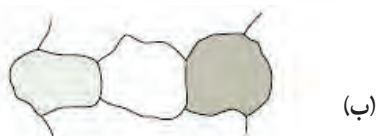
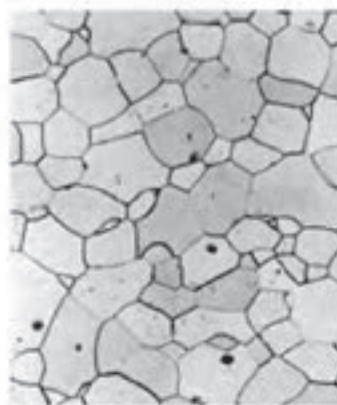
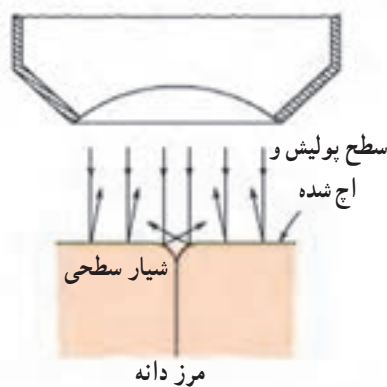
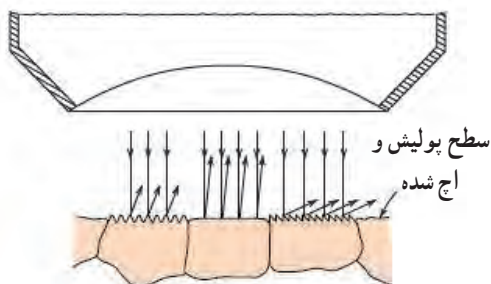
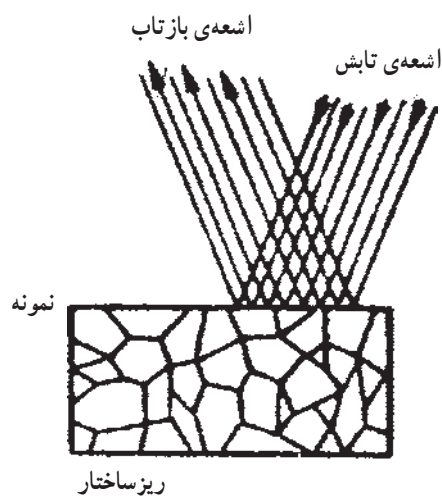
فلزها	اچ کننده	ترکیب	کاربرد
فولاد و چدن	نایتال	۵٪ اسید نیتریک ۹۵-۹۹٪ متیل الکل	فولادها و چدن‌ها پرلیت را تیره می‌کند و مرز دانه‌ها را نشان می‌دهد.
	پیکرال	۴ گرم اسید پیکریک، ۱۰۰ میلی‌گرم متیل الکل	در فولادها چدن‌ها پرلیت را تیره و مرز دانه‌ها را نشان می‌دهد در فولادهای عملیات حرارتی شده نیز کاربرد دارد.
	کلورفریک	۵ گرم $FeCl_3$ ۵۰ میلی‌لیتر HCl ۱۰ میلی‌لیتر آب	برای نشان دادن سماتیت در فولادها و چدن‌ها زمان ۱۰ تا ۶۰ دقیقه
مس و آلیاژهای آن	هیدرواکسید آمونیم و پیروکسید هیدروژن	۵/۰ $NH_4OH$ (وزن مخصوص ۸۸/۰) ۵/۰ آب، ۲۵٪ $H_2O_2$ ۳٪	محلول اچ برای اکثر آلیاژهای مس
	اسید کرومیک	محلول رقیق شده اسید کلریدریک $Cr_2O_3$	مس - برنز - برنج و نقره نیکلی
آلومینیوم و آلیاژهای آن	اسید فلوریدریک	۵/۰ میلی‌لیتر HF ۹۹/۵ میلی‌لیتر آب	ظاهرکننده‌ی عمومی برای آلیاژهای Al
	هیدروکسید سدیم	۱۵ گرم سود ۹۰ میلی‌گرم آب	محلول اچ میکرو و ماکرو برای آلیاژهای آلومینیوم

همان طوری که مشاهده می‌شود برای هر آلیاژ یک نوع محلول خاص پیشنهاد گردیده است شکل ۱۶-۳ مقایسه‌ای است اجمالی از انواع نمونه‌ها و همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌ی الف که هنوز اچ نشده است نور تابیده شده با همان زاویه‌ی تابش منعکس می‌گردد در نتیجه تصویری از ساختار زمینه تشکیل نمی‌شود.

در نمونه‌ی ب و پ بعضی از نقاط توسط محلول اچ خورده شده‌اند، در نتیجه در آن نقاط انکسار نور به وجود آمده و تصویر تشکیل شده است.

مواد اچ و ترکیب آن‌ها و موارد کاربرد آن‌ها در جدول ۲-۳ آمده است.

عمل کردن دارای زمان مشخصی است که بستگی به غلظت مواد شیمیایی، درصد عناصر آلیاژ نمونه، دمای قطعه کار و محلول دارد.



شکل ۱۶-۳

## نکات ایمنی در تهیهی مواد اچ:

- ۱- مواد اچ معمولاً انواع اسیدها هستند و عمل تهیهی آنها باید در زیر هود صورت گیرد.
- ۲- در هنگام تهیهی این مواد حتماً از دستکش پلاستیکی استفاده کنید.
- ۳- در تهیهی مواد اچ، برای آلیاژهای آلومینیوم که از اسید فلوریدریک (HF) استفاده می‌شود، از به کار بردن ظرف‌های شیشه‌ای جداً خودداری کنید.
- ۴- همواره مقدار کمی از مواد اچ را استفاده کنید. برای این منظور می‌توانید مقداری از آن را در ظرفی کوچک (مثل شیشه ساعت) بریزید.
- ۵- نمونه‌ها را پس از اچ کردن سریعاً با الکل و یا مواد

شوینده‌ی مناسب بشوید و خشک کنید.

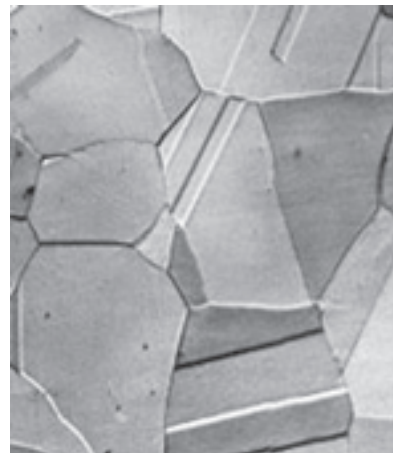
- ۶- در هنگام رقیق کردن اسیدها به وسیله‌ی آب و یا مخلوط کردن اسیدها با یکدیگر نکات ایمنی را رعایت نمایید.
  - ۷- همیشه مواد اچ را به مقدار کمی تهیه نمایید، چون بعضی از مواد اچ به مرور زمان خاصیت خود را از دست می‌دهند.
- تمرین ۱: چند نمونه فولادی را انتخاب کرده و مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها را تا مرحله پایان اچ ادامه دهید ساختار در مبحث بعد مورد مطالعه قرار گیرد.
- تمرین ۲: چند نمونه مختلف چدن را انتخاب کرده و مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها را تا مرحله پایان اچ ادامه دهید. ساختار در مبحث بعد مورد مطالعه قرار گیرد.

### ۳-۳- آزمایش شماره ۳- بررسی ساختار

متالوگرافی فولادها: فولادها آلیاژهای آهن و کربن اند که میزان کربن در آنها از  $2/06 - 2/02$  درصد متفاوت است. فولادها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از فولادهای ساده‌ی کربنی و فولادهای آلیاژی. در فولادهای ساده‌ی کربنی عنصر آلیاژی اصلی کربن است و مقدار جزئی عناصر دیگر نیز همراه دارد.

ساختار زمینه‌ها در فولادها عبارتند از:

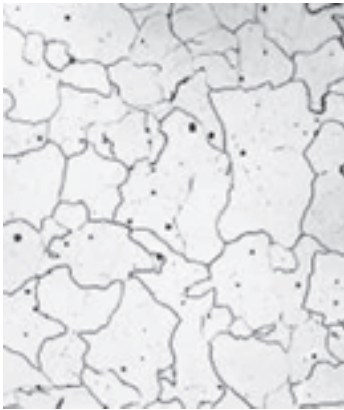
۱- آستنیت: آستنیت محلول جامد آهن و کربن است که دارای ساختمان مکعبی (F.C.C) می‌باشد و در جریان سرد شدن و انجماد به وجود می‌آید (شکل ۳-۱۷).



شکل ۳-۱۷

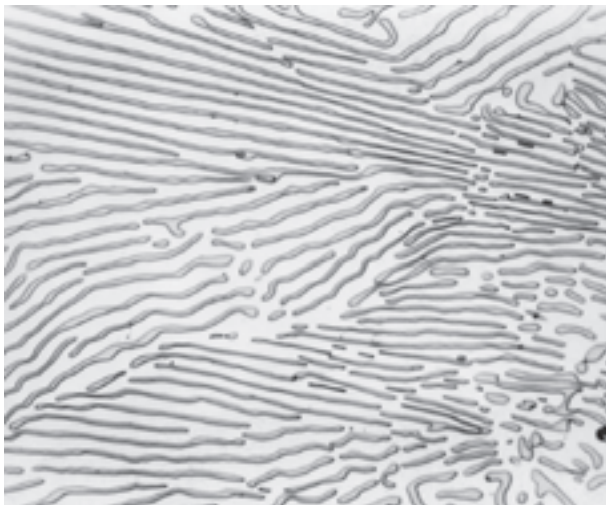
این فاز در ادامه سرد شدن ناپایدار شده و به فریت و پرلیت و یا مخلوطی از آنها تجزیه می‌گردد منطقه پایدار آستنیت از  $723$  درجه سانتی‌گراد به بالا می‌باشد لذا در دمای محیط در شرایط تعادلی در فولادهای ساده کربنی قابل مشاهده نیست.

۲- فریت: محلول جامد کربن در آهن با شبکه کریستالی (B.C.C) می‌باشد که حداکثر مقدار کربن  $2/02$  درصد در  $723$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد و در دمای محیط این فاز پایدار است و در زیر میکروسکوپ به رنگ سفید مشاهده می‌گردد (شکل ۳-۱۸).



شکل ۳-۱۸

۳- سمانتیت: در صورتی که درصد کربن در فولادها و یا آلیاژهای آهن - کربن بیش از حد حلالیت آن در آستنیت یا فریت باشد فازی به نام کاربید آهن یا سمانتیت  $Fe_3O$  به وجود می‌آید. ۴- پرلیت: ترکیبی از لایه‌های متناوب فریت و سمانتیت می‌باشد که در اثر واکنش یوتکتوئید از آستنیت به وجود می‌آید که در زیر میکروسکوپ به صورت اثر انگشت است (شکل ۳-۱۹).

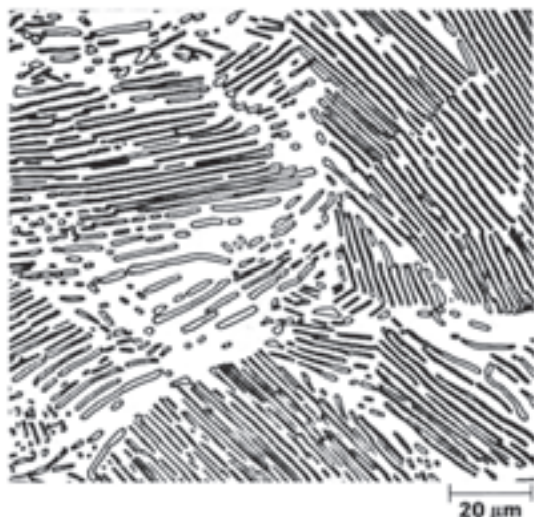


شکل ۳-۱۹

فولادهای ساده کربنی از نقطه نظر متالوگرافی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) فولادهایی که بین  $0/77 - 2/02$  درصد کربن دارند

شکل ۲۲-۳ فولاد هیپریوتکتوئید را نشان می‌دهد که شامل پرلیت به رنگ تیره اثر انگشت و سمانتیت به رنگ سفید دیده می‌شود لازم به ذکر است که این نمونه با محلول اچ نایتال، اچ شده است.



شکل ۲۲-۳ پرلیت و سمانتیت  $\times 250$

#### مواد و وسایل مورد نیاز:

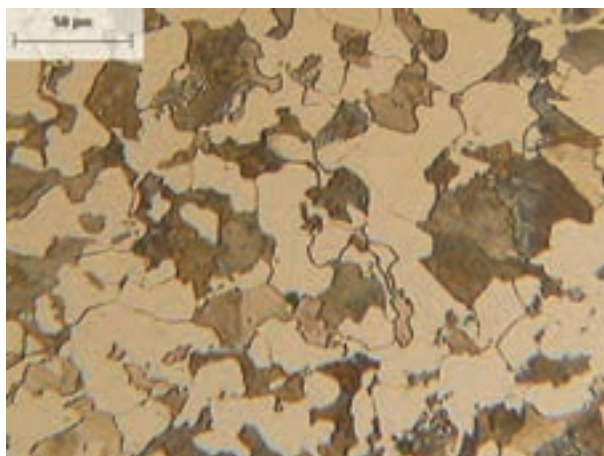
نمونه فولاد کم کربن مثل فولاد ساختمانی و میان کربن مثل  $CK_{45}$  و  $MS_6$ ، ابزار و وسایل مانند آزمایش قبل

#### مراحل انجام آزمایش

نمونه‌ها را پس از انتخاب با رعایت نکات ایمنی جهت متالوگرافی آماده‌سازی نمایید و ساختار آن‌ها را زیر میکروسکوپ مشاهده نموده و فازهای مختلف را (فريت، پرلیت، سمانتیت) شناسایی کنید.

تمرین: چند نمونه فولادی هیپریوتکتوئید، یوتکتوئید، هیپریوتکتوئید را متالوگرافی نموده مشاهدات خود را بر روی کاغذ رسم نموده و فازها را مشخص کنید.

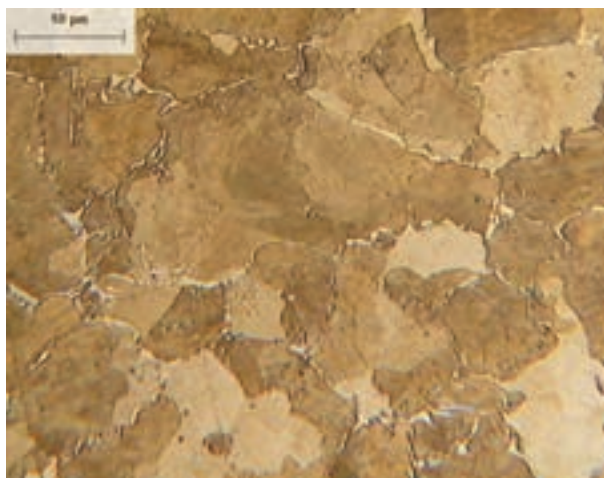
به نام فولادهای هیپریوتکتوئید معروف می‌باشند و ساختار متالوگرافی آن‌ها شامل فريت و پرلیت می‌باشد. شکل ۲۰-۳ قسمت‌های سفید رنگ فريت و قسمت‌های تیره پرلیت می‌باشند.



شکل ۲۰-۳ فولاد کم کربن  $\times 250$  محلول اچ نایتال

ب) فولادهایی که  $0.77\%$  درصد کربن دارند به نام فولادهای یوتکتوئیدی معروف بوده و ساختار آن‌ها کاملاً پرلیتی است. شکل ۲۱-۳ ساختار پرلیت که به صورت اثر انگشت دیده می‌شود.

پ) فولادهایی که از  $0.2-0.77\%$  درصد کربن دارند دارای ساختار میکروسکوپی پرلیت و سمانتیت هستند.



شکل ۲۱-۳ ساختار فولاد یوتکتوئیدی شامل پرلیت  $\times 550$

### ۴-۳- آزمایش شماره ۴

بررسی ساختار میکروسکوپی چدن‌های سفید

آلیاژهای آهن و کربن که بیش از ۲ درصد کربن دارند.

چدن نامیده می‌شوند.

درصد بالای کربن و وجود عناصر آلیاژی دیگر مثل

سیلیسیم باعث به وجود آمدن گرافیت در ساختار نهایی می‌شود.

گرافیت حالتی از کربن است که پایدارتر از سمانتیت

است.

در فولادها، گرافیت به ندرت تشکیل می‌شود و نمودار

تعادلی آهن - سمانتیت جهت مطالعه مناسب‌تر است.

در چدن‌ها، تشکیل گرافیت و سمانتیت بستگی به سرعت

سرد کردن و ترکیب شیمیایی آن دارد.

اگر سرعت سرد شدن در حین انجماد و پس از آن زیاد

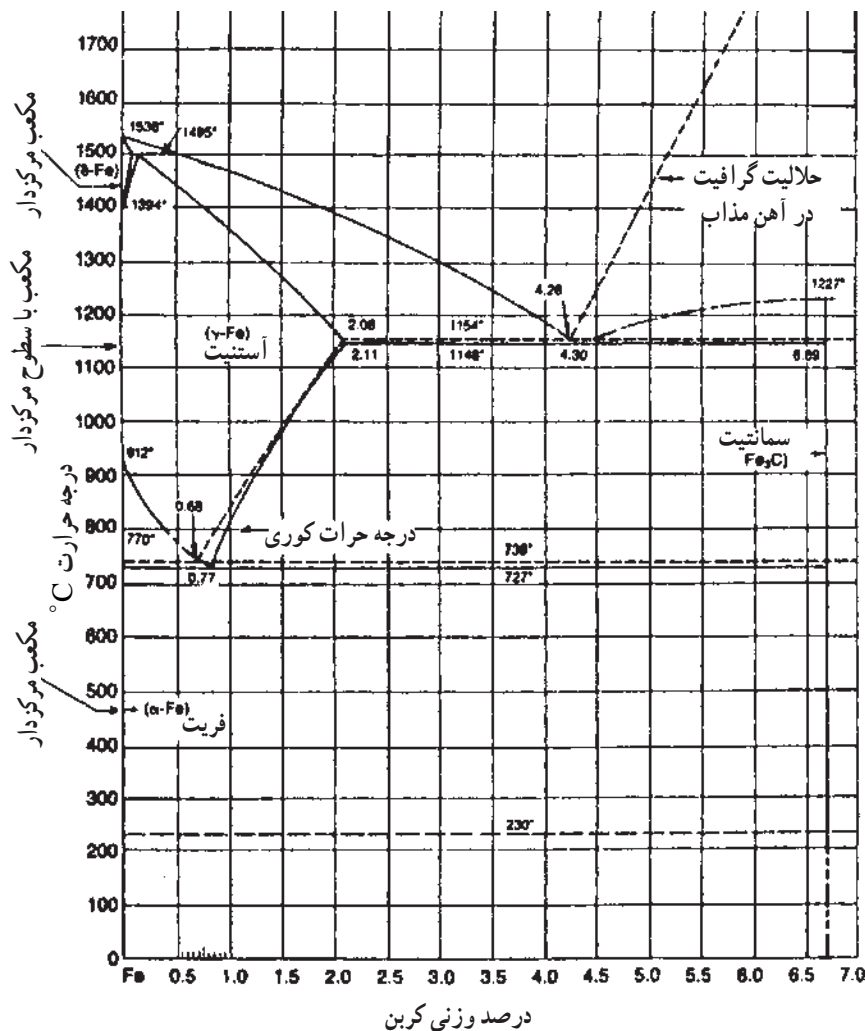
باشد، سمانتیت به وجود می‌آید ولی اگر درصد کربن و سیلیسیم

بالا و سرعت سرد شدن آهسته باشد، گرافیت به وجود می‌آید. به

همین علت دو نمودار تعادلی آهن - سمانتیت و آهن - گرافیت

در بررسی ساختار میکروسکوپی مورد استفاده قرار می‌گیرد

(شکل ۲۳-۳). که معمولاً این دو نمودار بر هم منطبق شده‌اند.



شکل ۲۳-۳- نمودار تعادلی آهن - کربن: خطوط ممتد مربوط به نمودار آهن - سمانتیت خطوط منقطع مربوط به نمودار آهن - گرافیت می‌باشد.



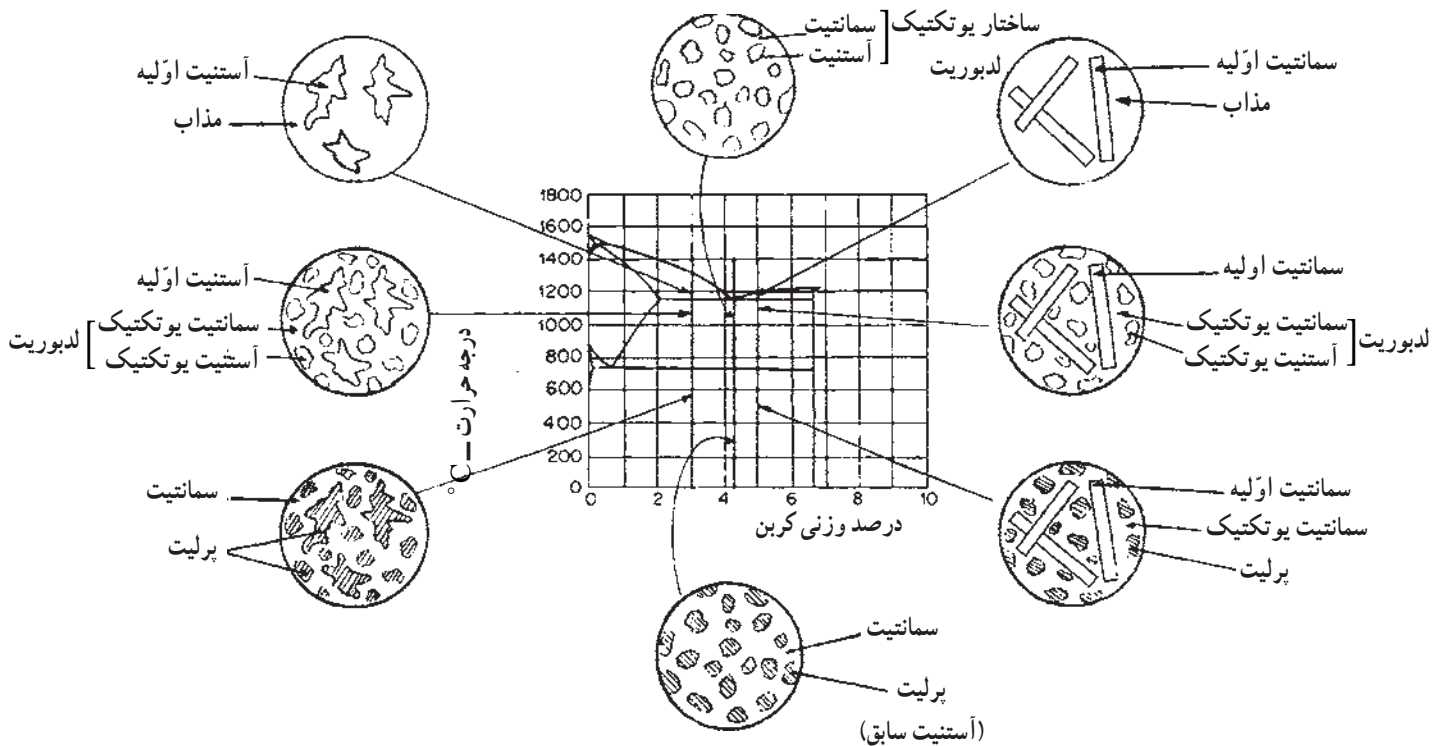
انجماد آلیاژهای هیپووتکتیک با جدا شدن فاز اولیه آستنیت به صورت دندریتی آغاز می‌شود. با کاهش دما تا دمای یوتکتیک، مذاب باقی مانده در تحول یوتکتیکی منجمد می‌شود. در آلیاژهای هایپووتکتیک، سمانتیت اولیه به صورت فاز درشت با گوشه‌های تیز از مذاب جدا می‌شود و در  $1147^{\circ}\text{C}$  مذاب باقی مانده در اثر فرایند یوتکتیکی به لدبوریت تبدیل می‌شود.

پس از انجماد چدن سفید، در ادامه سرد شدن در  $723^{\circ}\text{C}$  آستنیت موجود در ساختار در اثر تحول یوتکتوئیدی به پرلیت تبدیل می‌شود. در نتیجه ساختار میکروسکوپی نهایی شامل پرلیت و سمانتیت است. (شکل ۲۴-۳).

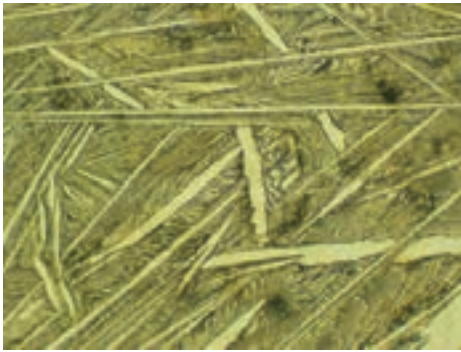
— بررسی نمونه تعادلی آهن — سمانتیت: در سرعت سرد شدن زیاد در حین انجماد، سمانتیت به وجود می‌آید و ساختار نهایی چدن مجموعه‌ای شامل فریت و سمانتیت است. به علت وجود فاز سفیدرنگ سمانتیت در مقطع شکست، به آن‌ها چدن سفید گفته می‌شود.

چدن‌های سفید بسیار ترد و شکننده بوده و قابلیت ماشین کاری ندارند. اما مقاومت به سایش عالی دارند.

— انجماد آلیاژهای یوتکتیک: انجماد آلیاژهای یوتکتیک در دمای  $1147^{\circ}\text{C}$  و از مذاب با ترکیب  $4/3$  درصد کربن فرایند تبدیل مذاب سمانتیت + آستنیت صورت می‌گیرد. ساختمان میکروسکوپی حاصل لدبوریت نامیده می‌شود که به شکل میله‌ای است.



شکل ۲۴-۳- نمودار شبکه‌ی تعادلی آهن — سمانتیت و نمایش شماتیک چگونگی انجماد، سرد شدن و ساختارهای میکروسکوپی حاصل مربوط به چدن‌های یوتکتیک، هیپووتکتیک و هایپروکتکتیک



شکل ۲۶-۳- ساختار میکروسکوپی چدن سفید هایپریوتکتیک

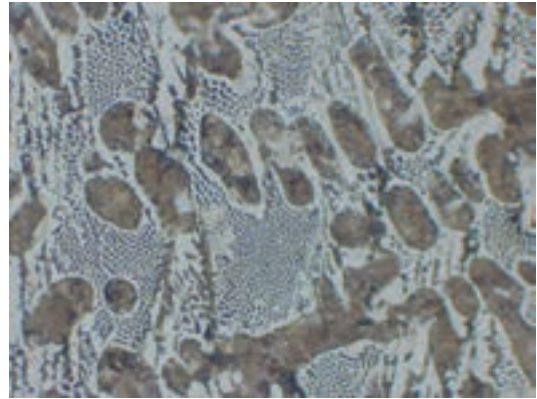
### مواد و وسایل مورد نیاز:

چند نمونه چدن سفید (هایپریوتکتیک، یوتکتیک، هایپریوتکتیک)، ابزار و وسایل مطابق آزمایش ۲  
مراحل انجام آزمایش:

نمونه‌ها را پس از انتخاب با ضربه شکسته و سپس با رعایت نکات ایمنی جهت متالوگرافی آماده‌سازی کنید و ساختار میکروسکوپی آن‌ها را مشاهده نموده و فازهای مختلف را شناسایی کنید.

تمرین: چند نمونه چدن سفید را متالوگرافی نموده مشاهدات خود را بر روی کاغذ رسم کنید و فازها را مشخص کنید.

شکل ۲۵-۳ ساختار میکروسکوپی چدن سفید هایپریوتکتیک را نشان می‌دهد. در این شکل مناطق تیره درشت آستنیت اولیه می‌باشد که در تحول یوتکتوئید به پرلیت تبدیل شده است. ساختار زمینه یوتکتیک لدبوریته است.



شکل ۲۵-۳- چدن هایپریوتکتیک نایتال  $\times 100$

شکل ۲۶-۳ ساختار میکروسکوپی چدن سفید هایپریوتکتیک را نشان می‌دهد در این شکل سمانتیت اولیه (نواحی سفید رنگ و طویل) همراه با یوتکتیک لدبوریته کاملاً مشخص است.

### ۵-۳- آزمایش شماره ۵

بررسی ساختار میکروسکوپی چدن‌های خاکستری

- بررسی نمونه تعادلی آهن - گرافیت،

در چدن‌هایی که گرافیت به وجود می‌آید به علت وجود گرافیت در مقطع شکست رنگ آن خاکستری است بنابر این به چدن خاکستری موسوم اند.

چدن‌های خاکستری قابلیت ماشین کاری، جذب ارتعاش و شوک‌های حرارتی را دارند.

- انجماد آلیاژهای یوتکتیک در دمای  $1153^{\circ}\text{C}$  و ترکیب

$4/3$  درصد کربن با فرآیند تبدیل

مذاب  $\leftarrow$  آستنیت (جامد) + گرافیت جامد

صورت می‌گیرد.

ساختار انجمادی شامل ورقه‌های سیاه گرافیت و زمینه

آستنیت است.

- انجماد آلیاژهای هیپو یوتکتیک با جدا شدن دندریت‌های

آستنیت اولیه از مذاب شروع می‌شود. در دمای یوتکتیک، مذاب باقی مانده در فرآیند تبدیل یوتکتیکی، منجمد می‌شود.

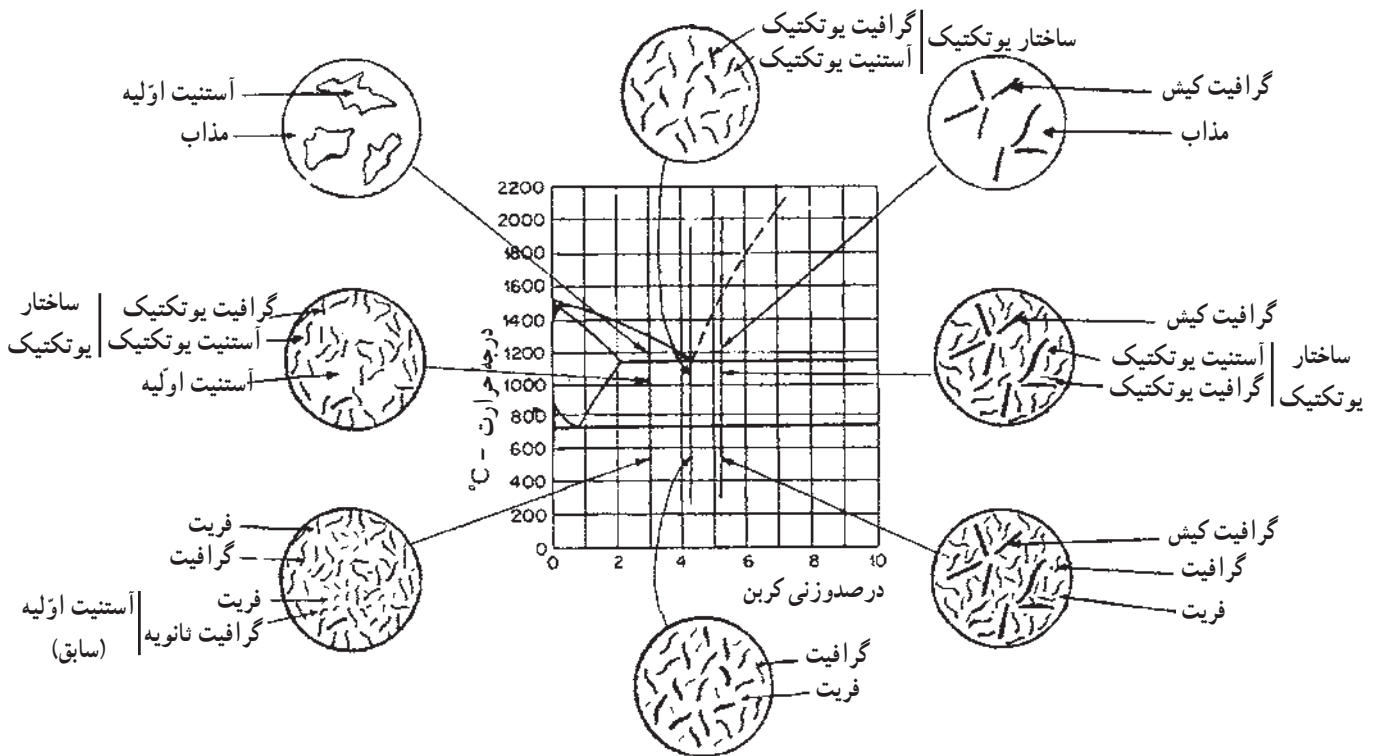
در آلیاژهای هیپرو یوتکتیک، انجماد با رسوب لایه‌های نسبتاً ضخیم و بزرگ گرافیت، موسوم به گرافیت کیش شروع می‌شود.

در دمای  $1153^{\circ}\text{C}$  مذاب باقی مانده، به مجموعه آستنیت و گرافیت یوتکتیکی تبدیل می‌شود.

پس از انجماد چدن خاکستری، در ادامه سرد شدن در  $723^{\circ}\text{C}$  در اثر فرآیند تبدیل یوتکتوئیدی آستنیت به فریت - پرلیت و گرافیت تبدیل می‌شود.

در نتیجه ساختار نهایی شامل فریت و گرافیت و یا فریت - پرلیت و گرافیت است.

شکل ۲۷-۳ ساختارهای مختلف چدن خاکستری را با توجه به نمودار تعادلی آهن - گرافیت نشان می‌دهد.

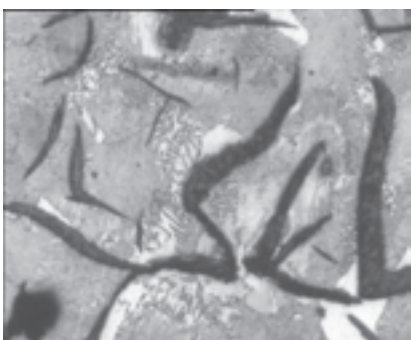


شکل ۲۷-۳- نمودار تعادلی آهن - گرافیت و نمایش شماتیک نحوه‌ی انجماد، سرد شدن و تغییر ساختار میکروسکوپی آلیاژهای یوتکتیک، هیپو یوتکتیک‌ها و هایپرو یوتکتیک

و در شکل ۳-۳۰ (ب) ساختار چدن خاکستری با زمینه فریتی - پرلیتی مشاهده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۳۰

### مواد و وسایل مورد نیاز:

نمونه‌هایی از چدن خاکستری (هیپوئوتکتیک و هایپروئوتکتیک)، ابزار و وسایل مطابق آزمایش ۲  
 مراحل انجام آزمایش

نمونه‌ها را پس از انتخاب و بریدن با رعایت نکات ایمنی جهت متالوگرافی آماده سازی کنید و در دو مرحله مطابق ذیل عمل نمایید.

**مرحله اول:** نمونه آماده شده را قبل از اچ در زیر میکروسکوپ قرار دهید و شکل گرافیت را مشاهده نمایید.  
**مرحله دوم:** نمونه‌ها را پس از پولیش مجدد، اچ نموده و ساختار میکروسکوپی آن‌ها را مشاهده نموده و ساختار زمینه را شناسایی کنید.

**تمرین:** چند نمونه چدن خاکستری را متالوگرافی نموده مشاهدات خود را قبل و بعد از اچ روی کاغذ رسم نمایید و فازها (گرافیت و زمینه) را مشخص کنید.

شکل ۳-۲۸ ساختار میکروسکوپی چدن خاکستری هیپوئوتکتیک را نشان می‌دهد. در این شکل آرایش لایه‌های گرافیت در زمینه قبل از اچ دیده می‌شود.



شکل ۳-۲۸

شکل ۳-۲۹ ساختار میکروسکوپی چدن خاکستری هایپروئوتکتیک را نشان می‌دهد. در این شکل علاوه بر گرافیت یوتکتیکی، گرافیت کیش در زمینه قبل از اچ دیده می‌شود.



گرافیت یوتکتیکی کیش

شکل ۳-۲۹

در چدن‌های خاکستری پس از مطالعه‌ی گرافیت از نظر نوع، اندازه، نحوه‌ی پخش و پراکندگی و شکل که معمولاً به صورت پولیش شده (as-polish) انجام می‌شود برای مطالعه بر روی زمینه‌ی فلزی در چدن‌ها آن‌ها را با محلول مناسب اچ می‌کنند. ساختار زمینه در چدن‌ها شبیه فولادهاست، یعنی یا به صورت فریتی، پرلیتی و یا به صورت مخلوطی از چند نوع فاز است. نمونه‌های چدن خاکستری به شکل ۳-۳۰ می‌باشند. در شکل ۳-۳۰ (الف) ساختار یک چدن خاکستری با زمینه‌ی کاملاً پرلیتی مشاهده می‌شود.

## ۳-۶- آزمایش شماره ۶

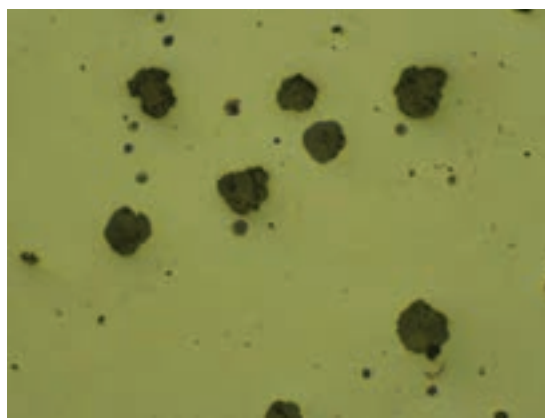
بررسی ساختار میکروسکوپی چدن‌های داکتیل (نشکن)

چدن‌های داکتیل: در چدن‌های داکتیل گرافیت به صورت

کروی شکل وجود دارد. این چدن طی فرایندی در عملیات ذوب و ریخته‌گری به وجود می‌آید. بدین صورت که پس از آماده شدن چدن مذاب مقداری منیزیم (به صورت فروسیلیکو منیزیم یا فرونیکل منیزیم) به آن اضافه می‌شود که این امر باعث تبدیل گرافیت از شکل ورقه‌ای به صورت کروی می‌گردد. گرافیت کروی در چدن باعث افزایش خواص مکانیکی به خصوص افزایش قابل ملاحظه‌ی چکش‌خواری می‌گردد. نحوه‌ی توزیع و شکل گرافیت‌ها در چدن‌های داکتیل نیز اثر مستقیم در خواص مکانیکی آن‌ها دارد (شکل ۳-۳۱).

همان‌طور که در شکل ۳-۳۱ مشاهده می‌شود گرافیت‌ها

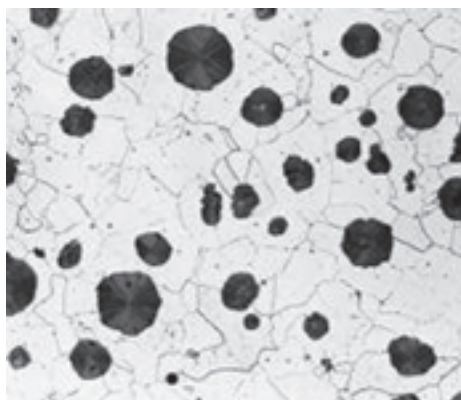
به صورت کروی شکل هستند.



شکل ۳-۳۱

در شکل ۳-۳۲ چدن داکتیل با زمینه‌ی کاملاً فریتی

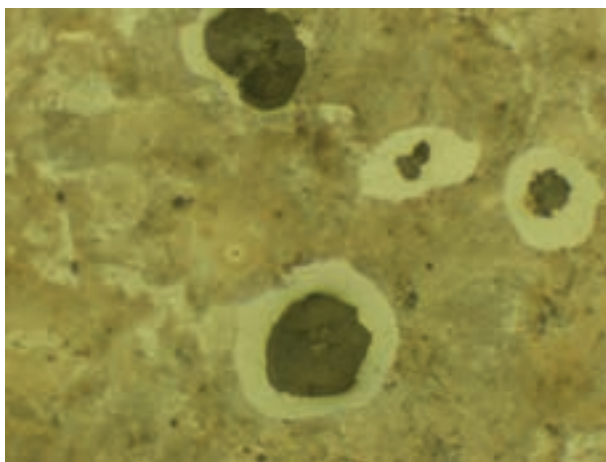
مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۳۲- چدن داکتیل با زمینه فریتی  $\times 100$

در شکل ۳-۳۳ چدن داکتیل با زمینه‌ی فریتی - پرلیتی

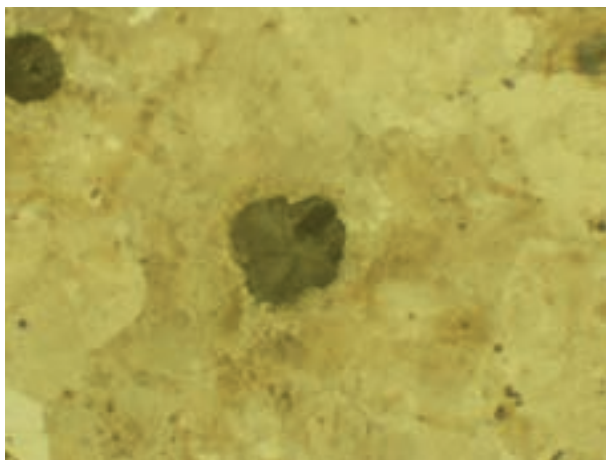
می‌باشد که فریت اطراف گرافیت‌ها را گرفته و به ساختمان چشم‌گاو می‌شود معروف است.



شکل ۳-۳۳- چدن داکتیل با زمینه فریت و پرلیت

در شکل ۳-۳۴ چدن داکتیل با زمینه کاملاً پرلیتی مشاهده

می‌شود.



شکل ۳-۳۴

نکته‌ی مهم: در انواع چدن‌هایی که دارای گرافیت هستند

نظیر چدن خاکستری - مالیل و داکتیل در مرحله‌ی اول متالوگرافی، که مطالعه بر روی گرافیت‌هاست، نمونه‌ها به صورت پولیش شده در زیر میکروسکوپ قرار می‌گیرند، یعنی برای مشاهده‌ی گرافیت‌ها نیازی به اچ کردن نیست.

## مواد و وسایل مورد نیاز

نمونه‌هایی از چدن داکتیل (نشکن) بازمینه فریت، پرلیت و  
یا فریت و پرلیت

ابزار و وسایل مطابق آزمایش ۲

مراحل انجام آزمایش:

نمونه‌ها را پس از انتخاب و بریدن با رعایت نکات ایمنی  
جهت متالوگرافی آماده‌سازی کنید و در دو مرحله مطابق ذیل  
عمل نمایید.

**مرحله اول:** نمونه آماده شده را قبل از اچ در زیر

میکروسکوپ قرار دهید و شکل گرافیت را مشاهده نمایید.

**مرحله دوم:** نمونه‌ها را پس از پولیش مجدد، اچ نموده و

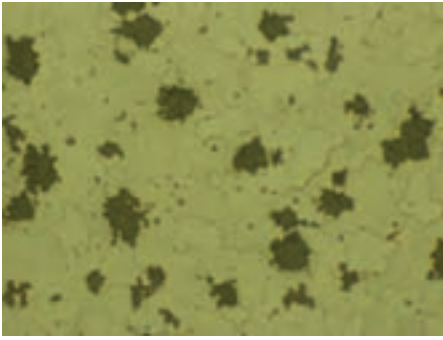
ساختار میکروسکوپی آن‌ها را مشاهده نمائید و ساختار زمینه را  
شناسایی کنید.

**تمرین:** چند نمونه چدن داکتیل را متالوگرافی نموده،

مشاهدات خود را قبل و بعد از اچ روی کاغذ رسم نمائید و فازها  
(گرافیت و زمینه) را مشخص کنید.

## ۷-۳- آزمایش شماره ۷

بررسی ساختار میکروسکوپی چدن های مالیل  
چدن های مالیل (چکش خوار): در این چدن ها گرافیت به صورت برفکی شکل وجود دارد. این چدن ها طی یک سری فرایند عملیات حرارتی بر روی چدن های سفید به وجود می آیند. بدین صورت که ابتدا چدن را به صورت چدن سفید ریخته گری نموده و سپس طی یک عملیات حرارتی در دمای بالا و زمان نسبتاً طولانی باعث تجزیه ی سمانتیت شده و در نتیجه گرافیت به وجود می آید. این نوع گرافیت به صورت گلوله های برف بوده و به همین دلیل به گرافیت برفکی نیز معروف است. چدن های مالیل دارای خواص مکانیکی بهتری نسبت به چدن های خاکستری هستند. شکل ۳-۳۵ چدن مالیل را قبل از اچ نشان می دهد.



شکل ۳-۳۶- چدن مالیل با زمینه کاملاً فریتی  $\times 100$

### مواد و وسایل مورد نیاز

نمونه هایی از چدن مالیل، ابزار و وسایل مطابق آزمایش

شماره ۲

### مراحل انجام آزمایش:

نمونه ها را پس از انتخاب و بریدن با رعایت نکات ایمنی جهت متالوگرافی آماده سازی کنید و در دو مرحله مطابق ذیل عمل نمایید.

**مرحله اول:** نمونه آماده شده را قبل از اچ در زیر

میکروسکوپ قرار دهید و شکل گرافیت را مشاهده نمایید.

**مرحله دوم:** نمونه ها را پس از پولیش مجدد، اچ نموده و

ساختار میکروسکوپی آن ها را مشاهده نموده و ساختار زمینه را شناسایی کنید.

### تمرین ۱

چند نمونه از اتصالات آب نظیر زانویی، سه راهی از جنس

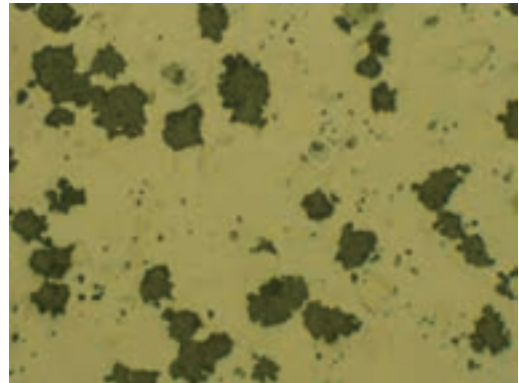
چدن مالیل را متالوگرافی نموده، مشاهدات خود را قبل و بعد از اچ

روی کاغذ رسم نمایید و فازها (گرافیت و زمینه) را مشخص کنید.

### تمرین ۲

نمونه ای از جنس چدن نامشخص انتخاب نموده پس از

متالوگرافی نوع چدن را مشخص کنید.



شکل ۳-۳۵- چدن مالیل فقط گرافیت ها نشان داده شده اند.

همان طور که در شکل ۳-۳۶ مشاهده می گردد پس از اچ

گرافیت به صورت گلوله های برف به رنگ سیاه دیده می شود و

مرز دانه های فریت نیز مشاهده می گردد.

### عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها

هدف‌های رفتاری؛ در پایان این فصل از هنرجو انتظار می‌رود که:

- ۱- با عملیات حرارتی آشنا شود و تجهیزات و روش‌های مختلف آن را شناسایی نماید.
- ۲- روش‌های مختلف عملیات حرارتی روی فولادها و چدن‌ها را انجام دهد.
- ۳- تأثیر عملیات حرارتی در ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی فولادها و چدن‌ها را بررسی کند.

#### ۴- عملیات حرارتی<sup>۱</sup>

برای مدت زمانی مشخص و سپس سرد کردن با سرعت معین و کنترل شده در محیط‌های خنک‌کننده اطلاق می‌گردد. بنابراین در عملیات حرارتی علاوه بر اهمیت عوامل دما و زمان سرعت گرم کردن و سرد کردن نیز مهم خواهد بود.

در عملیات حرارتی معمولاً از نمودارهای تعادلی استفاده می‌شود. این نمودارها موقعیت‌هایی را که مواد در حالت تعادل تمایل به رسیدن به آن‌ها را دارند بر حسب تغییرات دما و عناصر آلیاژی مشخص می‌کنند اما حالت یا موقعیت نهایی موردنظر در عملیات حرارتی می‌تواند موقعیتی تعادلی یا غیرتعادلی باشد. عملیات حرارتی به منظور دستیابی به ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی موردنظر بر روی فلزات و آلیاژهای آن‌ها انجام می‌شود. فرآیندهای عملیات حرارتی مطابق اهداف صنعتی موردنظر نامگذاری شده‌اند مانند عملیات حرارتی به منظور سخت کردن، نرم کردن، همگن سازی، تنش زدایی و غیره

تا قبل از قرن نوزدهم علم سخت کردن فلزات در پرده‌ای از ابهام و اسرار قرار داشت و سخت کردن فلزات به خصوص فولادها نتیجه‌ی تجربه‌های شخصی آهنگران و فلزکاران بود. به همین دلیل ساخت ابزارهای برنده مانند شمشیر، چاقو و غیره که عمده‌ترین ابزارها برای سخت کردن بود به روش‌های مختلف انجام می‌گرفت.

اما از قرن نوزدهم به بعد با استفاده از میکروسکوپ‌های مختلف (نوری، الکترونی و ...) و آنالیزکننده با اشعه‌ی ایکس، از نظر علمی پیشرفت‌های وسیعی در عملیات حرارتی انجام شد و مطالعات دقیقی در زمینه‌ی طبیعت، مکانیزم و چگونگی تغییر حالت فلزات انجام گردید؛ به طوری که امروزه عملیات حرارتی، خود بخشی از تولید بوده و تصور تولید اجزای ماشین‌آلات بدون عملیات حرارتی امکان‌پذیر نیست.

عملیات حرارتی عموماً به فرآیندی شامل عملیات، گرم کردن تا دمای معینی پایین‌تر از دمای ذوب و نگهداری در آن دما



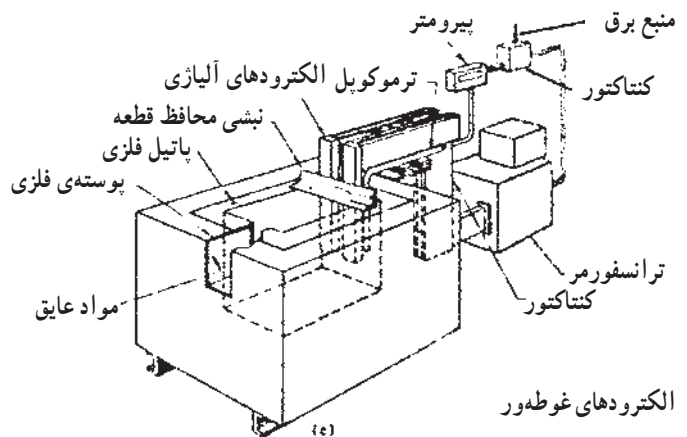
نمک مورد استفاده خنثی می‌باشد. استفاده از این نوع کوره‌ها بهترین راه برای جلوگیری از تغییر ترکیب شیمیایی فولاد می‌باشد. شکل ۴-۱ چند نمونه از کوره‌های حمام نمک و جدول ۴-۱ مشخصات تعدادی از نمک‌های خنثی مورد استفاده در حمام‌های نمک عملیات حرارتی را نشان می‌دهد.

## ۴-۱- ابزار و تجهیزات مورد نیاز در عملیات حرارتی

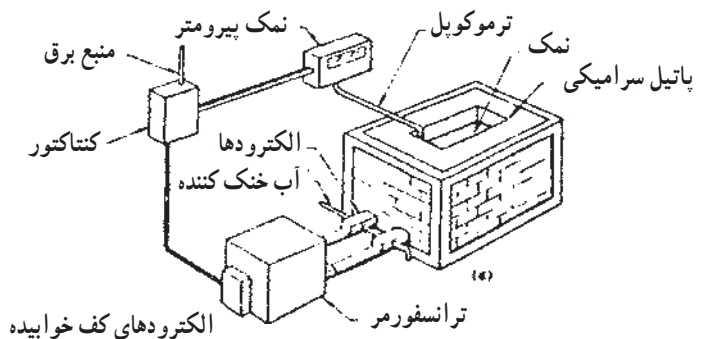
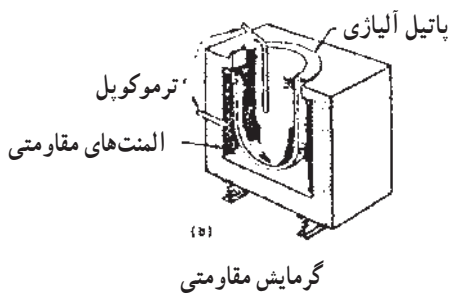
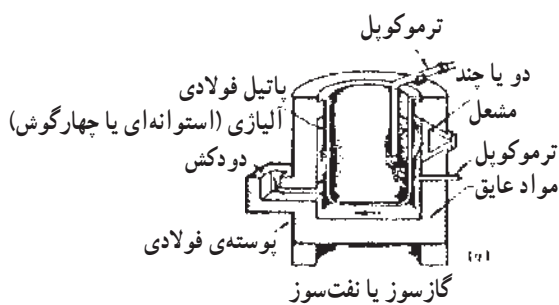
### ۴-۱-۱- کوره‌ها

— کوره‌های حمام نمک: چون زمان لازم برای آستنیته کردن قطعات در حمام‌های نمک نسبتاً کوتاه بوده و به علاوه

### گرمایش از داخل



### گرمایش از بیرون



شکل ۴-۱- انواع کوره‌های حمام نمک

جدول ۱-۴- مشخصات نمک‌های خنثی مورد استفاده در حمام‌های نمک عملیات حرارتی

ردیف	نوع نمک	فرمول شیمیایی	درصد وزنی	درجه حرارت ذوب-°C	درجه حرارت کار-°C
۱	کلرید سدیم کربنات سدیم	NaCl Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	۵۰ ۵۰	۵۶۵	۵۹۰-۹۰۰
۲	کلرید سدیم کلرید کلسیم	NaCl CaCl <sub>2</sub>	۵۰ ۵۰	۵۹۰	۶۳۰-۸۵۰
۳	کلرید سدیم کلرید باریم	NaCl BaCl <sub>2</sub>	۲۰ ۸۰	۶۳۵	۶۷۵-۱۰۶۰
۴	کلرید سدیم کلرید پتاسیم	NaCl KCl	۴۵ ۵۵	۶۶۰	۶۷۵-۹۰۰
۵	نیترات پتاسیم نیترات سدیم	KNO <sub>3</sub> NaNO <sub>3</sub>	۵۵ ۴۵	۱۵۳	۱۷۰-۵۰۰
۶	کربنات سدیم	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	۱۰۰	۳۲۲	۳۵۰-۷۰۰
۷	کربنات پتاسیم	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	۱۰۰	۳۶۰	۴۰۰-۶۵۰
۸	کربنات سدیم کربنات پتاسیم	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	۳۷ ۶۳	۱۵۹	۱۸۰-۳۵۰

— کوره‌های الکتریکی: شکل ۲-۴ نمونه‌هایی از کوره مختلف وجود دارند.  
را نشان می‌دهد. این کوره‌ها الکتریکی هستند و در اندازه‌های



(الف)



(ب)



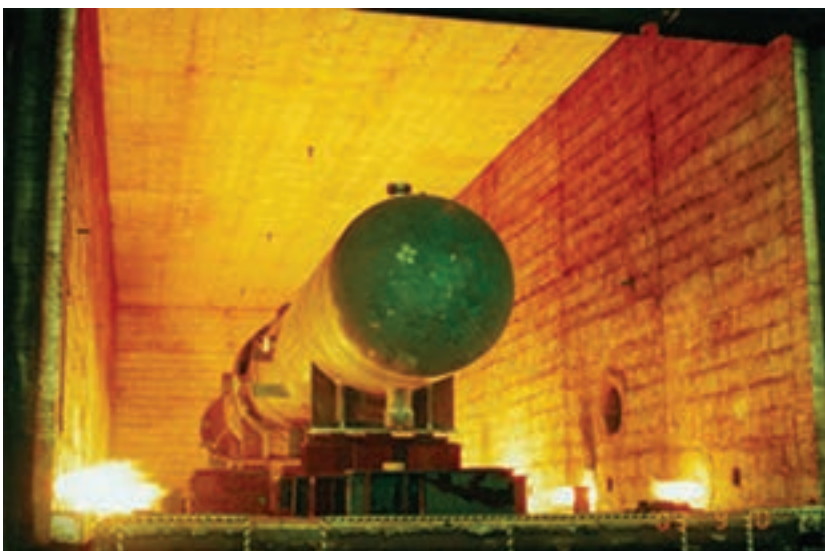
(ب)

شکل ۲-۴

— کوره‌های شعله‌ای (سوخت مایع یا گاز): در این نوع کوره‌ها محفظه‌ی گرمایی و قطعاتی که باید عملیات حرارتی شوند توسط شعله گرم می‌شوند. این کوره‌ها در اندازه‌ها و انواع مختلف وجود دارند. در شکل ۳-۴ دو نوع کوره‌ی شعله‌ای دیده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۴- کوره‌ی مداوم غلتکی

— کوره‌های خلأ: گرم کردن قطعات در کوره‌های خلأ این کوره‌ها که هوای محفظه‌ی حرارتی آن‌ها تا حد خلأ تخلیه می‌شود اساساً برای عملیات حرارتی پیشرفته و موارد خاص که روش جدیدی است که در کارهای متالورژیکی توسعه یافته است.

نیاز به حفظ ترکیب شیمیایی می باشد به کار می روند.

شکل ۴-۴- یک نوع کوره ی خلأ را نشان می دهد.

— کوره ها با اتمسفرهای کنترل شده: استفاده از این

نوع اتمسفرها که از گازهای محافظ تشکیل شده اند هم از نظر اقتصادی و هم از جنبه ی کاربردی یکی از بهترین روش ها برای عملیات حرارتی ابزارها و قطعات گران قیمت می باشد. این موضوع مخصوصاً در سخت کردن قطعات در مقیاس تولید انبوه صادق است.

### ۲-۱-۴- محیط های خنک کننده

در عملیات حرارتی جهت سرد کردن با سرعت کنترل شده، قطعات را در محیط های خنک کننده مختلف قرار می دهند. مهم ترین این محیط ها به ترتیب شدت خنک کنندگی عبارت اند از:

— آب: آب قدیمی ترین محیط سرد کننده است. بیشترین قدرت سرد کنندگی آب در درجه حرارت بین  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $40^{\circ}\text{C}$  می باشد. با اضافه کردن  $10\%$  درصد کلرید سدیم (نمک طعام) و یا بی کربنات دو سود (جوش شیرین) به آب قدرت سرد کنندگی آن به نحو قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. مهم ترین نکته ی منفی در رابطه با آب سرعت یا قدرت سرد کنندگی زیاد آن در محدوده ی حرارتی تشکیل ساختارهای غیرتعادلی می باشد.

— روغن: روغن در مقایسه با آب محیط سرد کننده ی بسیار ملایم تری می باشد. به همین دلیل استفاده از آن به عنوان محیط سخت کننده برای فولادهای کم آلیاژ تا آلیاژ متوسط محدود به قطعات با مقطع کوچک می شود. البته با ایجاد تلاطم یا گرم کردن از  $40^{\circ}\text{C}$  درجه الی  $80^{\circ}\text{C}$  قدرت سرد کنندگی روغن افزایش می یابد.

— محلول آب و روغن: با مخلوط کردن آب و روغن (محلول در آب) به نسبت های مختلف، امکان تهیه ی محیط های سرد کننده با قدرت های سرد کنندگی مختلف وجود دارد.

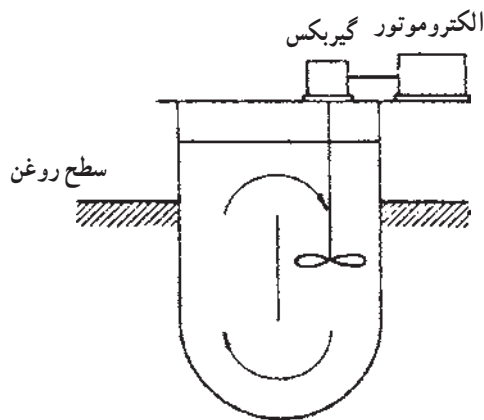


محفظه المنت های گرافیتی حرارتی

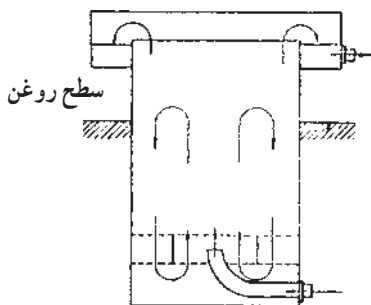
شکل ۴-۴- کوره ی خلأ

— آب با اضافات مخصوص: با اضافه کردن بعضی

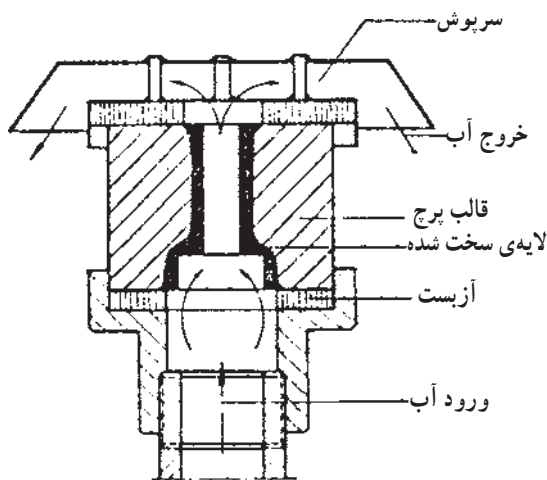
مواد به آب امکان تهیه ی محیط کوئنچ کننده با خواص مطلوب وجود دارد. به عنوان مثال از موادی با نام تجاری Aquaquench-A می توان نام برد.



شکل ۵-۴- مخزن کوننج کننده مجهز به هم زن



شکل ۶-۴- مخزن کوننج کننده مجهز به پمپ



شکل ۷-۴- چگونگی کوننج کردن قالب پرچ سرد توسط فواره

ملايم تر باشد احتمال تاب برداشتن و يا تغيير شكل قطعه و در ضمن سرد شدن کمتر خواهد بود.

— هوا: مقاطع نازک از فولادهای کم آلیاژ و هم چنین مقاطع نسبتاً ضخیم از فولادهای پرآلیاژ را، با استفاده از هوای فشرده و یا هوای آرام، به نحو موفقیت آمیزی می توان سخت کرد. از مزایای این روش قابل اغماض بودن تغییر شکل و تاب برداشتن احتمالی قطعه می شود و از جمله معایب عمده ی این روش احتمال اکسیده شدن سطوح قطعه می باشد.

— حمام های نمک: معمول ترین حمام نمک که به عنوان محیط سردکننده از آن استفاده می شود شامل تقریباً نسبت های مساوی از نیتريت سدیم ( $\text{NaNO}_2$ ) و نیترات پتاسیم ( $\text{K}_2\text{NO}_3$ ) است. درجه حرارت کار برای این حمام بین  $160^\circ\text{C}$  تا  $500^\circ\text{C}$  می باشد. این نوع حمام ها معمولاً محیط های سردکننده ی مناسبی برای سخت کردن فولادهایی هستند که در عین برخورداري از سختی پذیری نسبتاً خوب زیاد هم حجیم نباشند.

— مشخصات محیط های خنک کننده: نتایج حاصل از سرد کردن فولادها در یک محیط خنک کننده ی مشخص بستگی به درجه حرارت و میزان تلاطم محیط دارد.

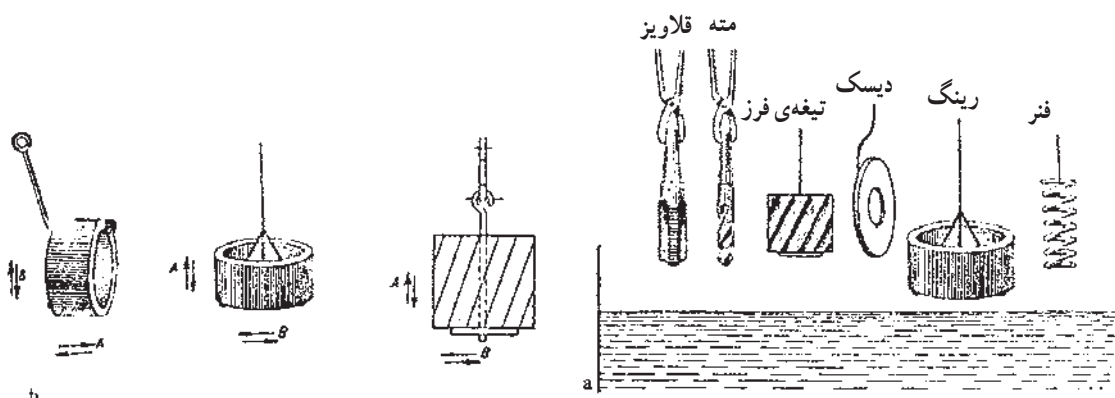
— کنترل درجه حرارت: بهترین درجه حرارت برای آب  $20^\circ\text{C}$  الی  $40^\circ\text{C}$  و روغن  $50^\circ\text{C}$  الی  $80^\circ\text{C}$  می باشد. درجه حرارت حمام باید مرتباً کنترل شده و سعی شود که حتماً در محدوده های حرارتی فوق نگه داشته شود.

— به هم زدن محیط — ایجاد تلاطم در محیط: برای سخت کردن قطعات حجیم، ایجاد تلاطم در محیط سردکننده به کمک حرکت دادن قطعات در آن معمولاً امکان پذیر نیست. برای ایجاد تلاطم در مخازن آب و روغن معمولاً از پروانه ای مطابق شکل ۴-۵ و یا پمپ شکل ۴-۶ استفاده می کنند. در موردی که هدف سخت کردن سطوح داخل حفره ها و یا سوراخ های تعبیه شده در داخل ابزارها یا قطعات فولادی می باشد از سیستمی مشابه با شکل ۴-۷ می توان استفاده کرد.

به عنوان مثال برای سخت کردن فولادهای ساده ی کربنی عملاً همیشه از آب استفاده می شود. هرچه فولاد آلیاژی تر باشد به محیط خنک کننده ی ملايم تری نیاز دارد. همچنین هرچه محیط

– قطعات نازک و تخت نظیر دیسک‌ها و تیغه‌های دیسکی باید همواره از طرف لبه، وارد مخزن کوئنچ کننده شوند.  
 – قطعات استوانه‌ای شکل نازک باید به نحوی وارد محیط سردکننده شوند که محور طولی آن‌ها عمود بر سطح مایع باشد.  
 – قطعاتی که دارای سطح مقعر باشند، نباید از طرف مقعر وارد حمام سردکننده شوند والا لایه‌ای از بخار در ناحیه‌ی فوق تشکیل شده و از سخت شدن آن جلوگیری می‌کند. شکل ۸-۴ نحوه‌ی صحیح وارد شدن و حرکت دادن را نشان می‌دهد.

روش‌های صحیح وارد کردن قطعات در محیط‌های خنک‌کننده: به‌طور کلی هنگام وارد کردن قطعات یا ابزارهای گرم در یک مایع سردکننده اصول زیر باید رعایت شود.  
 – قطعات تشکیل شده از مقاطع ضخیم و نازک، باید ابتدا از طرف مقطع ضخیم وارد حمام کوئنچ کننده شوند.  
 – قطعات طویل و نازک نظیر، سر مته‌ها، قلاویزها، برقوها و فنرها باید منحصراً به‌طور عمودی وارد محیط سرد کننده شوند.



شکل ۸-۴-۱: نحوه‌ی وارد کردن صحیح برخی از ابزارها و قطعات مختلف در مخزن کوئنچ کننده: b: نشان دادن نحوه‌ی صحیح و غلط برای حرکت دادن برخی از ابزارها و قطعات صنعتی در مخزن کوئنچ کننده. A: صحیح B: غلط

### ۳-۱-۴- انبر

جهت قرار دادن یا خارج کردن قطعات در داخل کوره عملیات حرارتی یا محیط خنک‌کننده از انبر استفاده می‌شود. شکل ۹-۴ انواع انبرها را نشان می‌دهد. جنس آن‌ها از فولاد و اندازه آن متناسب با ابعاد قطعه و کوره انتخاب می‌شود.



(ب)



(پ)



(الف)

شکل ۹-۴

#### ۴-۱-۴- ظرف محتوی مواد خنک کننده

حجم ظرف باید متناسب با تعداد و اندازه قطعات مورد نظر انتخاب گردد. به طوری که هنگام وارد کردن قطعه یا قطعات داغ به داخل آن دمای مایع خنک کننده تغییرات زیادی نداشته باشد.

مهم ترین این نکات عبارت اند از :

- ۱- هنگامی که کوره گرم است از نگاه کردن مستقیم به آن خودداری کنید و در صورت نیاز از عینک مناسب استفاده نمایید.
- ۲- از ابزارهای مناسب و مطمئن جهت حمل قطعات داغ استفاده کنید.
- ۳- از قرار دادن قطعات ابزارهای مرطوب و روغنی به داخل کوره خودداری کنید.
- ۴- از وسایل مناسب نسوز استفاده کنید. (شکل ۱۰-۴)
- ۵- طرز صحیح استفاده از کوره ها را رعایت نمایید.

#### ۴-۲- نکات ایمنی در عملیات حرارتی

در عملیات حرارتی به دلیل کار در دماهای بالا و قطعات گرم توجه به نکات ایمنی از اهمیت زیادی برخوردار است.



(پ)



(الف)



(ت)



(ب)

شکل ۱۰-۴



### ۳-۴- عملیات حرارتی فولادها

فولادها بیشترین کاربرد را در صنعت و فن آوری دارند. کاربرد وسیع فولادها ناشی از خواص کاملاً متنوع آنهاست که به کمک تغییر درصد کربن و یا تغییر درصد عناصر آلیاژی و یا تغییر نوع عملیات حرارتی امکان پذیر است.

#### ۱-۳-۴- عملیات حرارتی برای تشکیل

ساختارهای تعادلی: در این فصل روش های مختلف عملیات حرارتی که منجر به تشکیل ساختارهای تعادلی می شوند، بررسی خواهد شد.

این ساختارها که تماماً شامل فریت و سمانتیت ولی با توزیع های متفاوت اند، اکثراً به کمک حرارت دادن فولاد در دمای نسبتاً بالا و برای مدت زمان نسبتاً طولانی و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق به دست می آید.

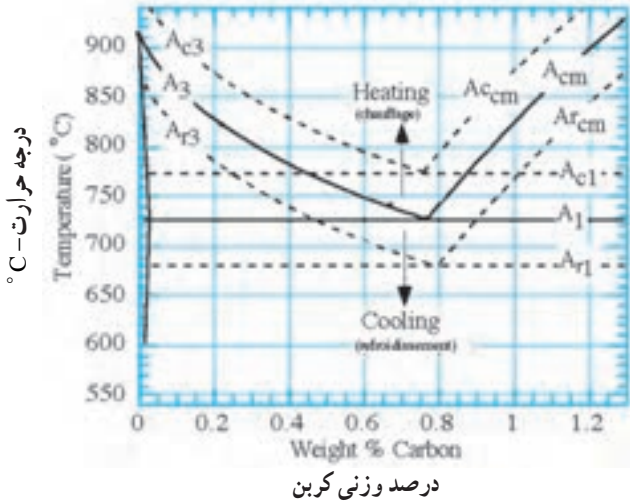
از جمله خواص مورد نظر در این عملیات عبارت اند از: بهبود انعطاف پذیری، کاهش تنش های داخلی و باقی مانده از عملیات قبل، بهبود قابلیت ماشین کاری و ایجاد یکخواختی در ساختار.

عملیات حرارتی مورد نظر در چهارچوب نمودار تعادلی آهن - کربن تشریح می شود.

#### ۲-۳-۴- دماهای بحرانی: درجه حرارت های

استحاله، اغلب به دماهای بحرانی موسوم اند و عبارت اند از دماهایی که در آنها تغییراتی در انتقال حرارت و یا حجم نمونه، در اثر گرم یا سرد کردن، ملاحظه می شود.

دماهای بحرانی که در نمودار تعادلی Fe-C وجود دارند و از نظر عملیات حرارتی دارای اهمیت هستند عبارت اند از:  $A_1$ ، فصل مشترک منطقه ی دوفازی فریت - سمانتیت و یکی از مناطق دوفازی فریت - آستنیت و یا سمانتیت - آستنیت؛  $A_3$ ، فصل مشترک منطقه ی دوفازی فریت - آستنیت و منطقه ی تک فازی آستنیت؛  $A_{cm}$ ، که فصل مشترک بین منطقه ی دوفازی سمانتیت - آستنیت و منطقه ی تک فازی آستنیت می باشد (شکل ۴-۱۱).



شکل ۴-۱۱- دماهای بحرانی برای حالت تعادل

دماهای بحرانی در گرم کردن با  $A_c$  و در سرد کردن با  $A_r$  و در حالت تعادل با  $A_e$  نشان داده می شود.

فولادهای ساده ی کربنی را گاهی برحسب درصد کربن، به صورت زیر تقسیم بندی می کنند.

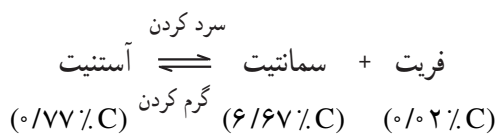
فولادهای کم کربن تا حداکثر ۰/۲۵ درصد کربن

فولادهای با کربن متوسط از ۰/۲۵ تا ۰/۵۵ درصد کربن

فولادهای پرکربن بیش تر از ۰/۵۵ درصد کربن

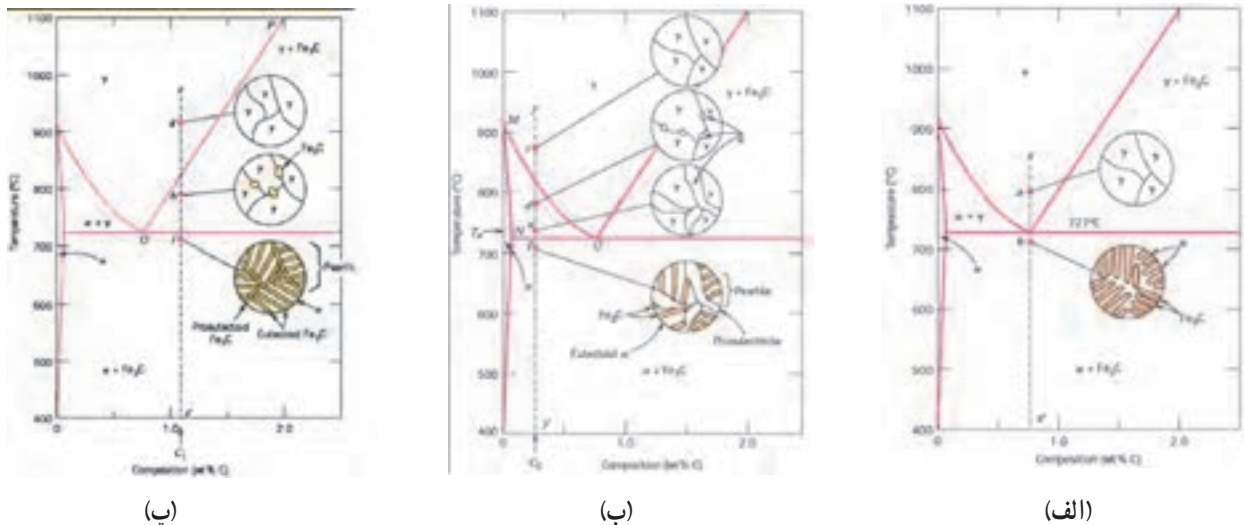
### ۴-۴- دگرگونی یوتکتوئیدی

شکل ۴-۱۲ الف قسمتی از نمودار Fe-C را با مقیاس بزرگ تر در نقطه یوتکتوئید نشان می دهد. در این شکل ناحیه ی مربوط به استحاله آستنیت و ساختارهای میکروسکوپی حاصل، در اثر آهسته سرد کردن آن به طور شماتیکی نشان داده شده است. در این نمودار استحاله ی یوتکتوئیدی را می توان به صورت زیر نوشت:

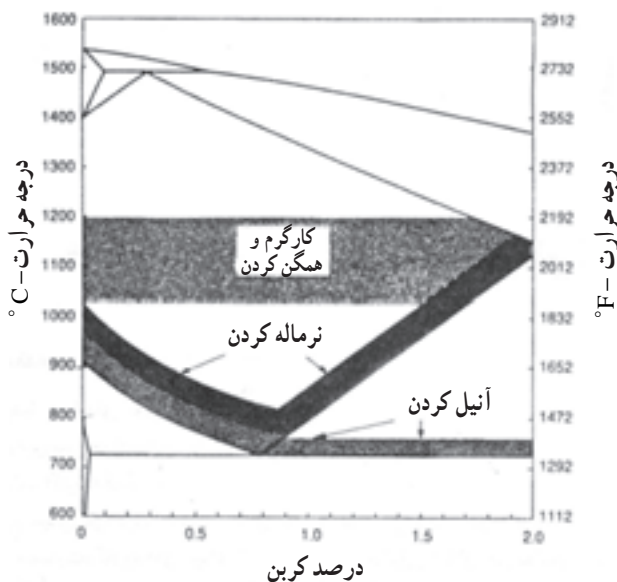


فازهای ذکر شده در بالا دارای ترکیب شیمیایی ثابت هستند.

استحاله در دمای ثابت  $T = 727^{\circ}\text{C}$  انجام می‌گیرد. شکل ۴-۱۲ ب نشان می‌دهد که در فولادهایی که کربن آن‌ها کمتر از یوتکتویدی باشد (هیپو یوتکتوید) در بین خطوط  $A_1$ ،  $A_2$  فریت تشکیل می‌شود. آن‌ها کربن بیش از یوتکتوید است (هایپو یوتکتوید) در بین خطوط  $A_1$ ،  $A_{cm}$  سمانتیت تشکیل می‌شود و به ترتیب به فریت پرویوتکتوید و سمانتیت پرویوتکتوید موسوم است. (شکل ۴-۱۲-ب).



شکل ۴-۱۲

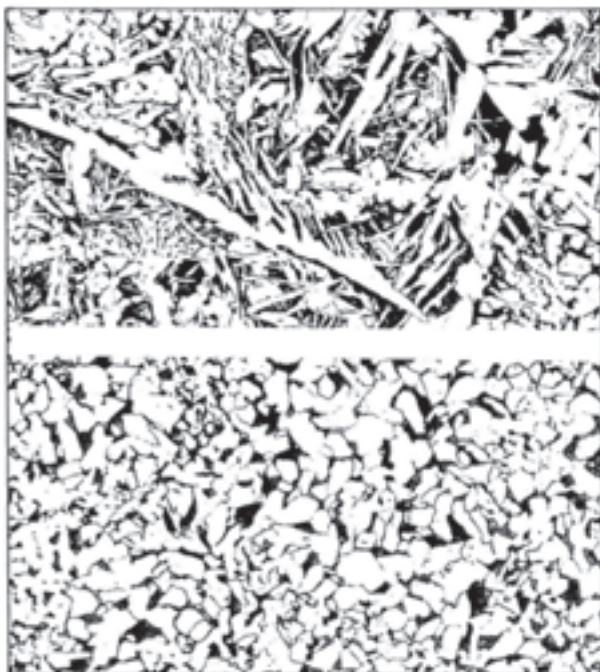


شکل ۴-۱۳ ناحیه‌ای از نمودار تعادلی آهن-کربن همراه با مناطق حرارتی مربوط به کارگرم، همگن کردن، نرماله کردن و آنیل کردن

#### ۴-۵-۱ روش‌های معروف عملیات حرارتی فولادها

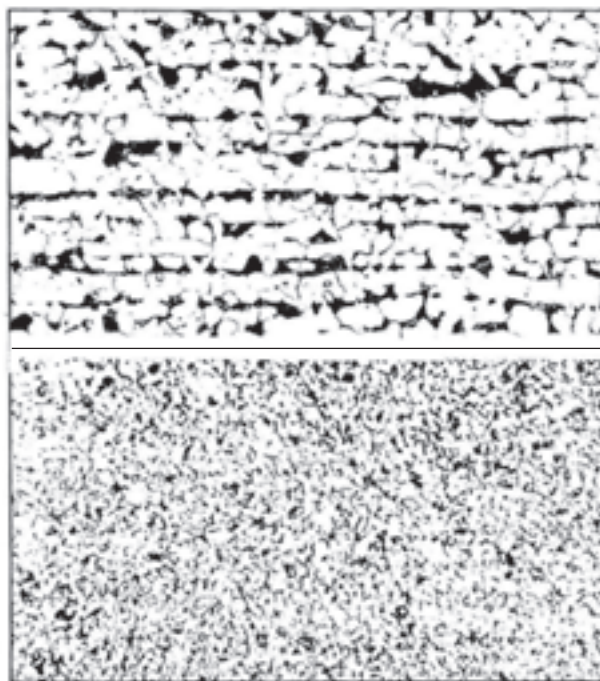
۴-۵-۱-۱ همگن کردن: قطعات ریخته شده دارای جدایش موضعی و ترکیب شیمیایی غیر یک نواختی هستند که باعث افت خواص مکانیکی فولاد از جمله قابلیت کار گرم و یا سرد و هم چنین کاهش کیفیت و کارایی عملیات حرارتی می‌شود. از این رو، ساختمان و ترکیب شیمیایی فولادهای ریخته شده باید به کمک عملیات حرارتی مناسب یک نواخت شود. برای این منظور طبق شکل ۴-۱۳ قطعات مورد نظر را در دمای نسبتاً بالا  $1200^{\circ}\text{C}$  -  $1000^{\circ}\text{C}$  برای مدت زمان نسبتاً طولانی تا  $5^{\circ}$  ساعت (این زمان بستگی به ابعاد و ترکیب شیمیایی قطعه دارد) حرارت داده و سپس آن‌ها را به آهستگی تا دمای اتاق سرد می‌کنند.

این عملیات به عملیات همگن کردن (یک نواخت کردن) موسوم است، بنابراین پس از پایان عملیات، غیر یک نواختی ساختمان میکروسکوپی و ترکیب شیمیایی فولاد از بین می‌رود.



Steel casting 0.25% C, as cast (upper) normalized (lower)

شکل ۱۴-۴ الف - ساختار میکروسکوپی فولاد ریخته‌گری شده با ۰/۲۵٪ کربن  
شکل بالا بعد از ریخته‌گری و شکل پایین نرماله شده را نشان می‌دهد.



Sheet 0.25% C, as rolled (upper), normalized (lower)

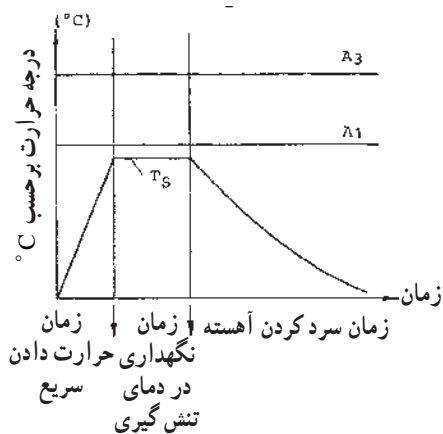
شکل ۱۴-۴ ب - ساختار ورق فولادی کارگرم شده با ۰/۲۵٪ کربن

۲-۵-۴ - آنیل کامل<sup>۱</sup>: آنیل کامل عبارت است از حرارت دادن فولاد در منطقه‌ی حرارتی نشان داده شده در شکل ۱۳-۴ و سپس سرد کردن آهسته، معمولاً در کوره، تا این که آستنیت کاملاً تجزیه شود تحت شرایط فوق سرعت شدن در حدود ۲۰/۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بر ثانیه می‌باشد. هم‌چنان که از شکل ۱۳-۴ مشخص است، دامنه‌ی حرارتی آستنیت کردن برای آنیل کامل، تابع درصد کربن فولاد می‌باشد. بدین صورت که برای فولادهای هیپوآکتوئید، حدود  $5^{\circ}\text{C}$  بالای خط  $A_3$  و برای فولادهای هایپروآکتوئید حدود  $5^{\circ}\text{C}$  بالای خط  $A_1$  می‌باشد.

۳-۵-۴ - نرماله کردن<sup>۲</sup>: نرماله کردن یکی دیگر از انواع روش‌های عملیات حرارتی است که ساختمان میکروسکوپی حاصل از آن همانند آنیل شامل پرلیت، مخلوطی از پرلیت و فریت و یا مخلوطی از پرلیت و سمانتیت می‌باشد. با این حال تفاوت‌های مهمی بین نرماله کردن و آنیل کردن وجود دارد. در نرماله کردن درجه حرارت آستنیت کردن برای فولادهای هیپوآکتوئید کمی بالاتر از دامنه‌ی حرارتی مربوط به آنیل کردن است. در حالی که برای فولادهای هایپروآکتوئید از دامنه‌ی حرارتی در حدود  $5^{\circ}\text{C}$  بالای  $A_{cm}$  استفاده می‌شود. (شکل ۱۳-۴) در نرماله کردن، قطعات پس از آستنیت شدن در هوا سرد می‌شود. تحت شرایط فوق سرعت سرد شدن در حدود  $1^{\circ}\text{C}$  تا  $1^{\circ}\text{C}$  بر ثانیه می‌باشد.

در نرماله کردن، ساختمان آستنیت و هم‌چنین توزیع عناصر آلیاژی، از یک نواختی بیشتری برخوردار است. یکی دیگر از اهداف مهم نرماله کردن عبارت است از ریز کردن دانه‌های درشتی که اغلب به هنگام کار گرم در درجه حرارت بالا و یا در ضمن ریخته‌گری و انجماد به وجود آمده است (شکل ۱۴-۴). آهنگ سرد شدن قطعه با تغییر ابعاد قطعه تغییر می‌کند. هرچه قطعه حجیم‌تر باشد، آهنگ سرد شدن قطعه کمتر است و مرکز قطعه به زمان بیشتری برای سرد شدن نیاز دارد. عملیات نرماله کردن ممکن است در قطعات خیلی بزرگ

و خیلی کوچک منجر به ایجاد تنش شود.



شکل ۱۵-۴- آنیل تنش گیری

#### ۴-۵-۵- سخت کردن (آب دادن)<sup>۲</sup>: با این عملیات

حرارتی سختی و استحکام سایشی مواد افزایش می‌یابد. ابزارهای براده‌برداری و ابزارهایی که نیاز به تحمل بارهای سایش دارند توسط این روش سخت می‌شوند. در این روش قطعات را حدود  $50^{\circ}\text{C}$  بالای خط  $A_1$ ،  $A_3$  حرارت می‌دهند. (شکل ۱۳-۴). سپس به مدت زمان کافی در این دما نگهداری کرده و سپس در یک محیط سردکننده‌ی مناسب کوئنچ می‌کنند.

دمای سخت کاری به نوع فولاد و نیز شکل و ابعاد قطعه کار بستگی دارد. برای قطعات نازک و پیچیده حد پایین و برای قطعات بزرگ و ساده حد بالای دمای سخت کاری، که توسط تولیدکنندگان توصیه می‌شود، اعمال می‌گردد.

#### ۴-۵-۴- تنش گیری<sup>۱</sup>: برخی از عملیات حرارتی و یا

مکانیکی، در قطعات، ایجاد تنش‌های داخلی می‌کند که می‌تواند مخرب بوده و بر عملکرد قطعات مزبور تأثیر نامطلوب گذارد. تنش‌های داخلی حاصل، ممکن است منجر به تاب برداشتن، ترک خوردن و یا انهدام قطعات در تنش‌هایی به مراتب کمتر از سطح تنش طراحی شده برای آنها شود، از جمله منابع تنش‌های داخلی عبارت‌اند از:

الف) غیریک‌نواخت سرد شدن نقاط مختلف در ضمن کاهش دما از منطقه‌ی آستنیت.

ب) ماشین کاری و کار سرد

ج) جوش کاری

برای حذف یا کاهش تنش‌های باقی مانده از عملیات قبلی، قطعات مورد نظر را برای زمان مشخص در دمایی زیر درجه حرارت بحرانی  $A_1$  حرارت می‌دهند.

زمان حرارت بستگی به ابعاد قطعه و درجه حرارت تنش گیری دارد. هرچه درجه حرارت تنش گیری بالاتر انتخاب شود زمان لازم برای انجام کامل عملیات کمتر است. معمولاً حرارت دادن یا سرد کردن برای رفع تنش باید خیلی آهسته انجام گیرد (شکل ۱۵-۴).

## ۶-۴- آزمایش ۱- بررسی تأثیر محیط‌های خنک کننده در سختی فولاد

مواد و ابزار و وسایل لازم:

- کوره الکتریکی، انبر، وان آب، وان روغن دستگاه سختی سنج را کول C، قطعه فولاد کربن متوسط

### مراحل انجام آزمایش

چهار قطعه فولادی کربن متوسط به ضخامت حدود یک سانتی متر را از یک جنس به اندازه‌ی مساوی تهیه نمایید و بر روی هر کدام به ترتیب از شماره‌ی ۱ تا ۴ نشانه گذاری کنید به طوری که هر عدد نشان دهنده‌ی یک نوع محیط خنک کننده باشد. با رعایت نکات ایمنی در عملیات حرارتی کوره را روشن کرده و دمای لازم برای فولاد را تنظیم کنید (با توجه به درصد

کربن ۳° تا ۵° درجه سانتی گراد بالای دمای  $A_3$ ). نمونه‌ها را در کوره قرار داده و به مدت ۲۰ دقیقه در کوره نگه دارید. ۳ عدد از قطعه‌ی حرارت دیده را از کوره با انبر خارج کرده و یکی را در آب یکی را در روغن و دیگری را در هوا کوئنچ کنید. نمونه‌ی چهارم را داخل کوره نگه داشته و کوره را خاموش کنید تا قطعه به آرامی سرد شود. یک طرف همه‌ی نمونه‌ها را سمباده زده و سختی آن‌ها را اندازه بگیرید و نتایج را در جدول زیر نوشته و مورد بحث قرار دهید.

محیط کوئنچ	آب	روغن	هوا	کوره
سختی				

- نمودار سختی - درصد کربن را تکمیل کنید.  
 - نتایج را از لحاظ تأثیر افزایش درصد کربن در سختی مورد بحث و بررسی قرار دهید.

نوع فولاد	کم کربن	متوسط کربن	پر کربن
سختی			



## ۷-۴- آزمایش ۲ - بررسی اثر نوع فولاد در میزان سختی در شرایط یکسان سخت کردن

مواد و ابزار و وسایل لازم

کوره‌ی الکتریکی، انبر، وان آب، دستگاه سختی سنج

راکول C، نمونه‌ها

### مراحل انجام آزمایش

با رعایت نکات ایمنی سه نوع فولاد کم کربن، کربن متوسط

و پر کربن را بریده و از ۱ تا ۳ شماره گذاری نمایید.

- کوره را تا دمای مناسب گرم کنید.

- هریک از نمونه‌ها را به مدت ۲۰ دقیقه در دمای مورد نظر

قرار دهید.

- نمونه‌ها را با انبر از کوره درآورده در آب کوئنچ کنید.

- یک سمت نمونه‌ها را سنباده زده و سختی نمونه‌ها را

اندازه بگیرید.

- نتایج را در جدول بنویسید.

## ۸-۴- آزمایش ۳- بررسی اثر دمای برگشت در سختی فولاد

۸-۴-۱- بازگشت دادن - تمپر کردن: به علت تنش‌های داخلی ایجاد شده در ضمن کوئنچ کردن تقریباً تمامی قطعات سخت شده نسبتاً ترد و شکننده‌اند در این صورت فولادها به ندرت پس از کوئنچ شدن و در شرایط کاملاً سخت شده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

معمولاً فولاد پس از کوئنچ شدن و قبل از مورد استفاده قرار گرفتن باید تمپر شود. تمپر کردن، که به آن بازپخت کردن یا بازگشت دادن نیز گفته می‌شود، عبارت است از حرارت دادن فولاد سخت شده تا دمایی زیر درجه حرارت  $A_1$ ، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق در هوا. درجه حرارت و زمان حرارت دادن بستگی به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر دارد. در اثر تمپر کردن تنش‌های داخلی کاهش یافته و یا حذف می‌شوند و بنابراین شکنندگی کم می‌شود. در عوض سختی و استحکام قطعه‌ی سخت شده تا حدودی کاهش خواهد یافت.

### مواد و ابزار و وسایل لازم

کوره‌ی الکتریکی، انبر، وان آب، دستگاه سختی سنج

راکول C، نمونه فولاد کربن متوسط

### مراحل انجام آزمایش

با رعایت نکات ایمنی

- تعداد سه نمونه را ابتدا سخت کاری کرده و سپس سختی آن‌ها را اندازه بگیرید.

- یک نمونه را در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت نگه دارید و سپس در هوای اتاق سرد کنید.

- عملیات برگشت را برای نمونه‌ی دوم در  $500^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت انجام دهید.

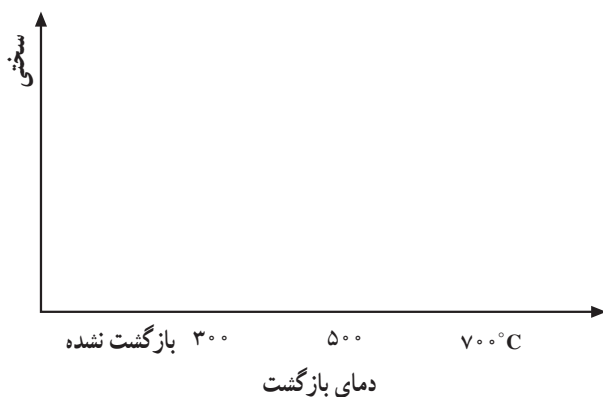
- عملیات برگشت را برای نمونه سوم در  $700^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت انجام دهید.

- نمونه‌ها را با راکول C سختی سنجی کرده و نتایج را در جدول بنویسید.

- نمودار سختی - دمای بازگشت را کامل کنید.

- نتایج را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهید.

دمای برگشت دادن	برگشت نشده	۳۰۰	۵۰۰	۷۰۰
سختی				



۹-۴- آزمایش ۴- بررسی اثر محیط‌های خنک‌کننده در خواص کششی فولاد

مواد و ابزار و وسایل لازم

کوره الکتریکی، انبر، وان آب، وان روغن، دستگاه کشش،

نمونه‌های استاندارد،

مراحل انجام آزمایش

با رعایت نکات ایمنی

- از یک فولاد ساده کربنی چهار نمونه استاندارد

جهت آزمایش کشش مطابق دستگاه موجود در آزمایشگاه

تهیه کنید.

- دمای کوره را متناسب با درصد کربن قطعات تنظیم

کنید.

- نمونه‌ها را به مدت ۲۰ دقیقه در کوره قرار دهید.

- سه نمونه را از کوره خارج کرده در محیط‌های آب،

روغن، هوا سرد کنید.

- نمونه چهارم را از کوره خارج نکنید و بگذارید در

کوره خاموش، سرد شود.

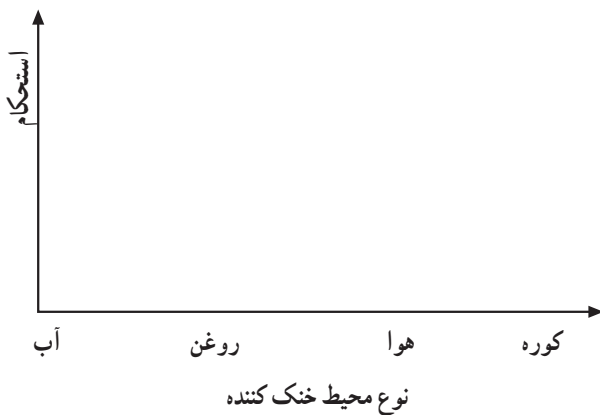
- نمونه‌ها را پس از سرد شدن تحت آزمایش کشش قرار دهید.

- نتایج را در جدول بنویسید.

- نمودار استحکام - نوع محیط خنک‌کننده را تکمیل کنید.

- نتایج را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهید.

نوع خنک‌کننده	آب	روغن	هوا	کوره
استحکام کشش				





## ۱-۴- عملیات حرارتی چدن‌ها

در میان آلیاژهای صنعتی، چدن‌ها متنوع‌ترین خواص مکانیکی را با ارزان‌ترین قیمت دارا می‌باشند. استفاده‌ی کامل از دامنه‌ی وسیع خواص مزبور مستلزم بررسی دقیق اثرات و نتایج حاصل از اعمال روش‌های مختلف عملیات حرارتی بر روی ساختمان و خواص چدن‌ها می‌باشد. از جمله اهداف عملیات حرارتی چدن‌ها عبارت‌اند از:

۱- برطرف کردن تنش‌های داخلی

۲- بهبود قابلیت ماشین‌کاری

۳- افزایش انعطاف‌پذیری و تافنس ضربه

۴- افزایش استحکام و مقاومت به سایش

۵- به عنوان یک مرحله از عملیات فرآیند تولید، مثلاً

برای تهیه‌ی چدن چکش‌خوار

روش‌های مختلف عملیات حرارتی چدن‌ها و فولادها، هم‌چنین واژه‌های استفاده شده در مورد آن‌ها بسیار شبیه به یکدیگرند، با این حال، پنج اختلاف اساسی و مهم بین آن‌ها به شرح زیر وجود دارد:

۱- در فولادها، درصد کربن مهم‌ترین پارامتر تعیین‌کننده‌ی درجه حرارت سخت کردن است، درحالی‌که در چدن‌ها، سیلیسیم عنصر اصلی تعیین‌کننده‌ی محدوده‌ی حرارتی فوق‌می‌باشد. سیلیسیم محدوده‌ی حرارتی بحرانی چدن‌ها را در مقایسه با فولادهای پرکربن افزایش می‌دهد. از این رو، به منظور آستنیت شدن کامل، درجه حرارت سخت کردن چدن‌ها باید نسبتاً بالا بوده و با توجه به درصد کربن زمینه و درصد سیلیسیم انتخاب شود.

۲- چدن‌ها اغلب حاوی مقدار قابل ملاحظه‌ای منگنز و عناصر آلیاژی دیگر می‌باشند. در نتیجه از سختی‌پذیری بالایی برخوردارند، به نحوی که اغلب به جای کوئنچ کردن در آب، آن‌ها را در روغن و یا هوا سرد می‌کنند.

۳- قطعات ریختگی اغلب دارای اشکال پیچیده‌ای بوده که می‌تواند سبب ایجاد مشکلاتی در عملیات حرارتی آن‌ها شود. برخلاف مقاطع نازک و قسمت‌های خارجی که سریع گرم می‌شوند، مقاطع ضخیم و قسمت‌های داخلی به راحتی گرم نمی‌شوند، از این رو سرعت گرم کردن و زمان نگه‌داری در درجه حرارت سخت کردن باید به نحوی تنظیم شود که مناسب با شکل پیچیده‌ی قطعه باشد.

۴- هم‌چنین در ضمن سریع سرد کردن، شکل پیچیده‌ی قطعه می‌تواند منجر به خسارت دیدن آن شود. بدین صورت که تنش‌های داخلی زیادی در قطعه به وجود آید و یا این که حتی قطعه بشکند. به منظور حذف تنش‌های داخلی و احتمال ترک خوردن، بلافاصله پس از کوئنچ کردن باید عملیات حرارتی تمپر کردن بر روی قطعه انجام گیرد.

۵- در موقع عملیات حرارتی در کوره‌های الکتریکی با اتمسفر خنثی نظیر نیتروژن، اکثر قطعات چدنی قادرند اتمسفر محافظ موردنیاز برای خود را تولید کنند. با این حال در کوره‌های شعله‌ای، قطعات چدنی به راحتی اکسید و یا دکربوره می‌شوند. قطعات چدنی که به شدت اکسید شده باشند می‌توانند مسئله آفرین باشند، زیرا اکسید تشکیل شده بر روی چدن معمولاً بسیار چسبنده بوده و موجب سایش و خسارت دیدن ابزارهای برش خواهد شد.

## ۱۱-۴- آزمایش ۵- بررسی اثر محیط خنک کننده در سختی چدن

مواد و ابزار و وسایل لازم

کوره‌ی الکتریکی، دستگاه سختی سنج، انبر، وان آب، وان روغن، نمونه چدن خاکستری یا داکتیل

مراحل انجام آزمایش

با رعایت نکات ایمنی

- سه نمونه از چدن را به ضخامت حدود یک سانتی متر انتخاب کرده از شماره ۱ تا ۳ شماره گذاری کنید.

- سختی یکی از آن‌ها را قبل از عملیات حرارتی اندازه بگیرید.

- دمای کوره را روی  $950^{\circ}\text{C}$  -  $900^{\circ}\text{C}$  تنظیم کنید.

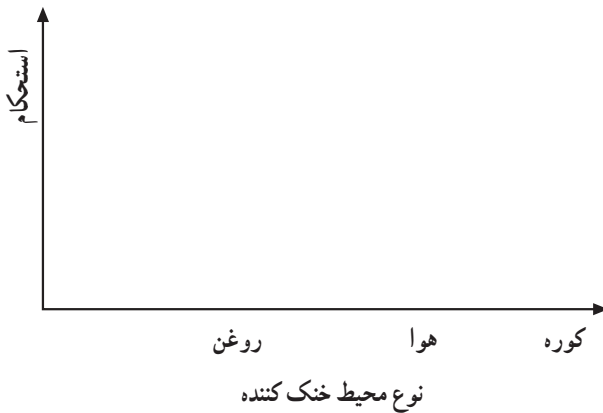
- هر ۳ نمونه را به مدت ۲۰ دقیقه در کوره قرار دهید.

- ۲ نمونه را از کوره خارج کرده به ترتیب در روغن و هوا سرد کنید.

- نمونه سوم را در کوره خاموش، سرد کنید.

- سختی نمونه‌ها را با سختی سنجی به دست آورید.
- نتایج را در جدول بنویسید.
- نمودار را تکمیل کنید.
- نتایج را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهید.

محیط	روغن	هوا	کوره	نمونه بدون عملیات
سختی				



## فهرست منابع

- ۱- اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها، محمدعلی گل‌عذار.
- ۲- کاربرد و عملیات حرارتی فولادها، ای. کامنیچنی، ترجمه‌ی مسعودرضا شکری
- ۳- ASM Handbook, Metallography and Microstructures, 5<sup>th</sup>. ed., vol.9, 1985.
- ۴- Krauss, G., Principles of Heat Treatment of Steel, American Society for Metals, 1980.
- ۵- Higgins, R.A. Engineering Metallurgy, Holder and Stoughton 5<sup>th</sup> ed., Part 1&11. 1983.
- ۶- Gulyaev, A., Physical Metallurgy, Mir Publisher, Moscow, vol, 1&11. 1980
- ۷- Thelning, K.E., Steel and its Heat Treatment-Bofors Handbook, Butterworths, 1981.
- ۸- Metals Handbook, Heat Treating, American Society for Metals, 9<sup>th</sup> ed., vol. 4, 1981.
- ۹- Baily, A.R., Samuels, L.E., Foundry Metallography, Metallurgical Services, Laboratories Services, Betchwarth, England, 1980.
- ۱۰- Walton, Charles F., Ed., Opar, Timothy J., Co-Ed., Iron Castings Handbook, Iron Casting Society, Inc., 1981.

