فصل سوم

انقباض

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

۱ــ انقباض خطی و حجمی را توضیح دهد.

۲ــ درصد انقباض خشک را محاسبه کند.

۳ــ درصد انقباض پخت را پیدا کند.

۴ــ درصد انقباض کل را محاسبه کند.

۵ــ کاربرد درصد انقباض را در تولید سرامیک‌ها شرح دهد.

۶ــ درصد انقباض حجمی را محاسبه کند.

۱ــ۳ــ انقباض خطی

۱ــ۱ــ۳ــ انقباض تر به خشک: حین خشک شدن، قطعات رسی رطوبت خود را از دست می‌دهند. این رطوبت در واقع آب آزادی است که در بین ذرات رسی قرار گرفته و امکان شکل‌دهی بدنه را فراهم می‌آورد. خارج شدن این رطوبت حین خشک شدن، غالباً با انقباضی همراه است، که به آن انقباض تر به خشک یا انقباض خشک گویند. عموماً قطعاتی که در شروع مرحله خشک شدن از رطوبت بالایی برخوردارند، انقباض خشک زیادی را از خود نشان می‌دهند. ما می‌توانیم مقدار این انقباض را برحسب درصد محاسبه کنیم.

در صورتی که طول قطعه را پیش از خشک شدن L_W و پس از خشک شدن L_D بنامیم، انقباض خشک را می‌توانیم با استفاده از رابطه (۱ــ۳) محاسبه کنیم :

در این رابطه S_D معرف انقباض خشک است.[۱]

رابطه (۱ــ۳)

$$S_D = \frac{L_W - L_D}{L_W} \times ۱۰۰$$

---

۱ ــ W مخفف کلمه‌ی Wet (به معنی تر) D مخفف کلمه‌ی Dried (به معنی خشک شده)، L مخفف کلمه‌ی Length (به معنی طول) و S مخفف کلمه‌ی Shrinkage (به معنی انقباض) است.

مثال ۱: طول یک قطعه رسی در حالت تر ۱۵cm و پس از خشک شدن ۱۳/۵cm است. مقدار انقباض خشک این قطعه را برحسب درصد محاسبه کنید.

حل :

$$S_D = \frac{L_W - L_D}{L_W} \times ۱۰۰$$

$$= \frac{۱۵ - ۱۳/۵}{۱۵} \times ۱۰۰ = ۱۰٪$$

مثال ۲ : در صورتی که قطر دهانه یک قوری پس از خشک شدن ۹/۶cm و مقدار انقباض خشک آن ۴٪ باشد، قطر دهانه‌ی آن را پیش از خشک شدن محاسبه کنید.

حل :

$$S_D = \frac{L_W - L_D}{L_W} \times ۱۰۰ \Rightarrow ۰/۰۴ = \frac{L_W - ۹/۶}{L_W}$$

$$\Rightarrow ۰/۰۴\ L_W - L_W = -۹/۶ \Rightarrow L_W = ۱۰cm$$

توجه: دانش‌آموزان عزیز دقت فرمایند درصورتی که در امتحان کردن جواب مثال‌ها، دقیقاً به عدد فرض مسأله نمی‌رسند، علت این است که جواب مثال‌ها اغلب رُند (گرد) شده است.

مثال ۳ : قطر یک بشقاب چینی در حالت تر ۱۸/۶cm است. اگر میزان انقباض خشک آن ۲٪ باشد قطر بشقاب را پس از خشک شدن برحسب میلی‌متر به‌دست آورید.

حل :

$$۱۸/۶cm = ۱۸۶mm$$

$$S_D = \frac{L_W - L_D}{L_W} \times ۱۰۰ \Rightarrow ۲ = \frac{۱۸۶ - L_D}{۱۸۶} \times ۱۰۰ \Rightarrow ۲ \times ۱۸۶ = ۱۸۶۰۰ - ۱۰۰L_D$$

$$\Rightarrow L_D = ۱۸۲/۲۸mm$$

۲ــ۱ــ۳ــ انقباض پخت (انقباض بین قطعه خشک و قطعه‌ی پخته شده): همان‌طور که می‌دانید بعد از خشک شدن، قطعات سرامیکی در دمای مناسب پخته می‌شوند. حین پخت، بعضی از اجزای آمیز ذوب شده و باعث پر شدن بخشی از خلل و فرج و فضاهای خالی قابل دسترس در داخل بدنه سرامیکی می‌شوند. مقدار این انقباض وابسته به آمیز و منحنی پخت است. محاسبات مربوط به این انقباض که آن را انقباض پخت می‌نامیم، شبیه به محاسباتی است که در قسمت قبلی و در مورد انقباض خشک ذکر شد.

در صورتی که طول قطعه خشک شده را L_D و طول قطعه پخته شده را L_F [1] بنامیم، درصد انقباض پخت، از طریق رابطه (۲ــ۳) محاسبه می‌شود.

$$S_F = \frac{L_D - L_F}{L_D} \times ۱۰۰$$

رابطه (۲ــ۳)

بدیهی است که این انقباض نیز خطی است. به مثال زیر توجه کنید :

مثال ۴ : طول یک مقره چینی در حالت خشک ۶/۵۳cm است. پس از اتمام مرحله‌ی پخت (در دمای $۱۳۰۰^{\circ}C$) طول قطعه ۶/۱۸cm است. میزان انقباض پخت این قطعه را (برحسب درصد) محاسبه کنید.

حل :

$$S_F = \frac{L_D - L_F}{L_D} \times ۱۰۰ \Rightarrow S_F = \frac{۶/۵۳ - ۶/۱۸}{۶/۵۳} \times ۱۰۰$$

$$\Rightarrow S_F = \frac{۰/۳۵}{۶/۵۳} \times ۱۰۰ = ۵/۳۶٪$$

۳ــ۱ــ۳ــ انقباض کل (انقباض بین قطعه تر و قطعه پخته شده): مجموع انقباضی که یک قطعه سرامیکی در بین مراحل شکل دادن و محصول نهایی انجام می‌دهد، شامل انقباض خشک و پخت است. اما توجه داشته باشید که مجموع انقباض‌های پخت و خشک را نمی‌توان برابر با انقباض کل گرفت زیرا مبنای استفاده شده در مورد این دو انقباض یکی نیست. برای فهم بهتر این مسأله، به مثال ۵ توجه کنید.

مثال ۵ : فرض کنید که طول علامت‌گذاری شده بر روی یک نمونه، به‌صورت زیر باشد.

$L_W = ۵۰mm$

$L_D = ۴۶mm$

$L_F = ۴۱mm$

الف ــ میزان انقباض کل را محاسبه کنید.

ب ــ مجموع انقباض‌های خشک و پخت را به‌دست آورده، نتیجه را با انقباض کل مقایسه کنید.

۱ــ F مخفف کلمه Fired (به معنی پخته شده) است.

حل :

الف ــ میزان انقباض کل از رابطه (۳ــ۳) به‌دست می‌آید.

رابطه (۳ــ۳)

$$\boxed{S_t = \frac{L_W - L_F}{L_W} \times ۱۰۰}$$ [۱]

$$\Rightarrow S_t = \frac{۵۰ - ۴۱}{۵۰} \times ۱۰۰ \Rightarrow S_t = \frac{۹}{۵۰} \times ۱۰۰ = ۱۸٪$$

ب ــ حال مجموع انقباض‌های خشک و پخت را نیز محاسبه می‌کنیم.

$$S_D = \frac{L_W - L_D}{L_W} \times ۱۰۰ \Rightarrow S_D = \frac{۵۰ - ۴۶}{۵۰} \times ۱۰۰ \Rightarrow S_D = ۸٪$$

$$S_F = \frac{L_D - L_F}{L_D} \times ۱۰۰ \Rightarrow S_F = \frac{۴۶ - ۴۱}{۴۶} \times ۱۰۰ \Rightarrow S_F = ۱۰/۹٪$$

$$S_D + S_F = ۸ + ۱۰/۹ = ۱۸/۹٪$$

حال نتایج به‌دست آمده را با هم مقایسه می‌کنیم :

مجموع انقباض خشک و پخت : $\boxed{S_D + S_F = ۱۸/۹٪}$

$\Rightarrow \quad \boxed{S_t \neq S_D + S_F}$

انقباض کل : $\boxed{S_t = ۱۸٪}$

مشاهده می‌کنیم که درصد انقباض کل با مجموع درصدهای انقباض خشک و پخت مساوی نیست. توجه داشته باشید که در هنگام طراحی قطعات و قالب‌ها حتماً از انقباض کل استفاده کنید.

مثال ۶ : می‌خواهیم قطر نهایی یک نعلبکی از جنس چینی ۹۰mm باشد. در صورتی که میزان انقباض پخت ٪۴/۶۲ و انقباض خشک ٪۳/۱۵ باشد و با در نظر گرفتن این‌که روش شکل دادن به صورت گل پلاستیک است، مطلوب است :

الف ــ قطر نعلبکی پس از خشک شدن

ب ــ قطر قالب اصلی

ج ــ انقباض کل

۱ــ t مخفف کلمه total (به معنی کل) است.

حل :

الف ــ با توجه به اطلاعات موجود، میزان انقباض پخت ٪۴/۶۲ و قطر نهایی ۹۰ میلی‌متر است. پس :

$$S_F = \frac{L_D - L_F}{L_D} \times ۱۰۰ \Rightarrow ۴/۶۲ = \frac{L_D - ۹۰}{L_D} \times ۱۰۰$$

$$\Rightarrow ۴/۶۲L_D = ۱۰۰L_D - ۹۰۰۰ \Rightarrow L_D = ۹۴/۳mm$$ قطر نعلبکی پس از خشک شدن

ب ــ انقباض‌تر به خشک برابر با ٪۳/۱۵ و قطر نعلبکی خشک شده نیز ۹۴/۳mm است. پس :

$$S_D = \frac{L_W - L_D}{L_W} \times ۱۰۰ \Rightarrow S_D = \frac{L_W - ۹۴/۳}{L_W} \times ۱۰۰$$

قطر قالب اصلی (و یا طول قطعه‌ی تر)

$$۳/۱۵ = \frac{L_W - ۹۴/۳}{L_W} \times ۱۰۰ \Rightarrow L_W = ۹۷/۳ \text{ mm}$$

ج ــ حال که طول اولیه و نهایی را محاسبه کرده‌ایم، می‌توانیم با استفاده از تغییر طول کلی، انقباض کل را به‌دست آوریم.

$$\text{تغییر طول کلی} = L_W - L_F = ۹۷/۳ - ۹۰ = ۷/۳mm$$

$$\Rightarrow S_t = \frac{L_W - L_F}{L_W} \times ۱۰۰ \Rightarrow S_t = \frac{۷/۳}{۹۷/۳} \times ۱۰۰ = ۷/۵٪$$

۲ــ۳ــ انقباض حجمی

در صورتی که تخمین دقیق‌تری از انقباض قطعات نیاز باشد، می‌توان به جای تغییرات طولی از تغییرات حجمی سود جست. اما باید توجه داشت که اندازه‌گیری انقباض حجمی معمولاً دشوارتر از انقباض خطی است و زمان بیش‌تری را باید صرف آن کرد. روش محاسبه‌ی درصد انقباض حجمی نیز بر اساس همان اصولی صورت می‌گیرد که تاکنون برای اندازه‌گیری انقباض خطی به‌کار بردیم. معمولاً در کارهای آزمایشگاهی مقدار انقباض حجمی یک ماده سرامیکی را سه برابر انقباض خطی آن در نظر می‌گیرند.

برای فهم بهتر و دقیق‌تر این موضوع، مکعبی از جنس یک ماده سرامیکی را در نظر می‌گیریم که طول ضلع آن در حالت اولیه a باشد. در صورتی که پس از اتمام فرایند مورد نظر، تغییر طولی برابر a' در اضلاع مکعب داشته باشیم، می‌توانیم درصد انقباض خطی را به شکل زیر بنویسیم.

$$\text{درصد انقباض خطی} = \frac{a'}{a} \times ۱۰۰$$

حال برای یافتن انقباض حجمی چنین عمل می‌کنیم :

$$\begin{cases} \text{حجم اولیه قطعه} = a^۳ \\ \Rightarrow \text{درصد انقباض حجمی} = \dfrac{a^۳ - (a-a')^۳}{a^۳} \times ۱۰۰ \\ \text{حجم نهایی قطعه} = (a-a')^۳ \end{cases}$$

$$\Rightarrow \text{درصد انقباض حجمی} = \frac{a^۳ - (a^۳ - ۳a'a^۲ + ۳a'^۲a - a'^۳)}{a^۳} \times ۱۰۰$$

$$= \frac{۳a'a^۲ - ۳a'^۲a + a'^۳}{a^۳} \times ۱۰۰$$

$$= \left[\frac{۳a'}{a} - ۳\left(\frac{a'}{a}\right)^۲ + \left(\frac{a'}{a}\right)^۳ \right] \times ۱۰۰$$

با توجه به این‌که a' از نظر مقدار به مراتب کوچک‌تر از a است، پس $\frac{a'}{a}$ از نظر مقدار کوچک‌تر از عدد ۱ است، بنابراین مقادیر $\left(\frac{a'}{a}\right)^۲$ و $\left(\frac{a'}{a}\right)^۳$ نیز بسیار کوچک هستند و می‌توان به‌طور تقریبی در مقابل $\frac{a'}{a}$ از آن‌ها صرف نظر کرد. در نتیجه عبارت قبل را می‌توان به‌صورت ساده‌تری نوشت :

$$\boxed{\text{درصد انقباض خطی} \times ۳ \simeq \text{درصد انقباض حجمی}} \Rightarrow \text{درصد انقباض حجمی} \simeq \frac{۳a'}{a} \times ۱۰۰$$

در صورتی که نخواهیم انقباض حجمی را با استفاده از انقباض خطی محاسبه کنیم، می‌توانیم حجم قطعه را به‌صورت دیگری اندازه‌گیری کنیم که البته این چنین اندازه‌گیری به‌ویژه در مورد اشکال

نامنظم هندسی و یا قطعات نسبتاً حجیم و یا قطعات خام، مشکلاتی را دربر دارد. در فصل بعد، با روش اندازه‌گیری حجم قطعات نامنظم هندسی آشنا خواهید شد.

تمرین

۱ ــ به منظور اندازه‌گیری انقباض یک نمونه از جنس چینی استخوانی، بر روی یک قسمت آن طولی به اندازه‌ی 5cm را علامت‌گذاری می‌کنیم، بعد از خشک شدن نمونه، طول علامت‌گذاری شده به ۴/۸۰ cm و بعد از پختن به ۴/۳۵ cm کاهش می‌یابد.

الف ــ درصد انقباض خشک ب ــ درصد انقباض پخت

ج ــ درصد انقباض کل را محاسبه کنید.

۲ــ طول یک قطعه سرامیکی پخته شده ۹/۲ cm است. در صورتی‌که مقدار انقباض خشک ٪۵/۶ باشد و مقدار انقباض پخت آن برابر با ٪۸/۵ باشد، الف ــ طول قطعه در حالت تر ب ــ طول قطعه در حالت خشک ج ــ درصد انقباض کل را محاسبه کنید.

۳ــ ابعاد یک آجر نسوز بعد از خروج از قالب دستگاه پرس ۹/۴mm×۳/۸mm×۴/۲mm است. در صورتی که انقباض حجمی کلی این آجر ٪۲۱/۵ باشد، مطلوب است: الف ــ حجم آجر قبل از پخت ب ــ ابعاد تقریبی آجر پخته شده.

۴ــ با استفاده از رابطه‌های انقباض خشک، پخت و کل اثبات کنید آیا مجموع انقباض خشک و پخت برابر با انقباض کل می‌باشد؟