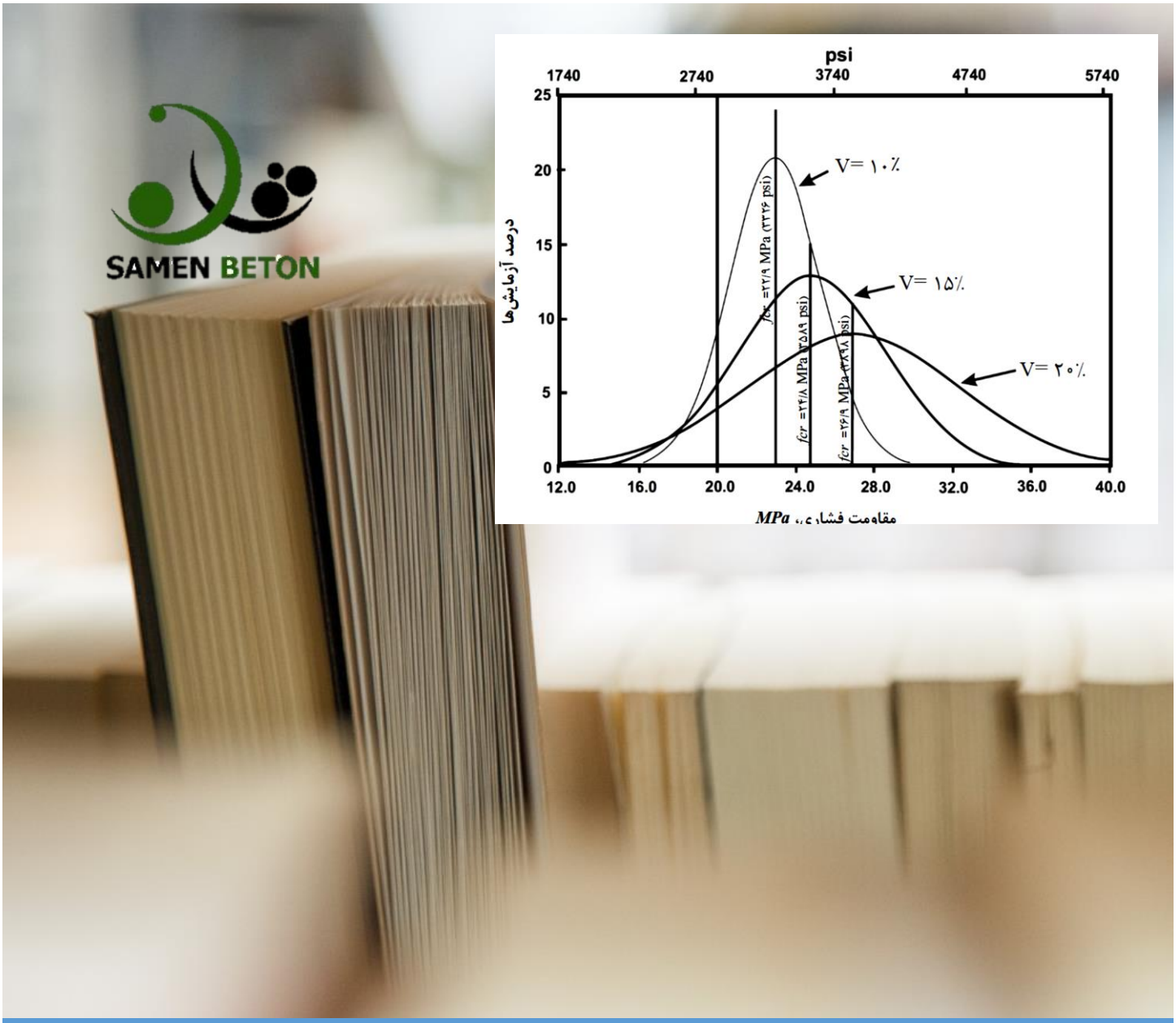


راهنمای ارزیابی از نتایج آزمایش مقاومت بتن

کمیته فنی شرکت ثامن بتن

مهندس جواد چگینی **تابستان ۱۴۰۰** **ACI 214**

SAMEN BETON

راهنمای ارزیابی از
نتایج آزمایش مقاومت بتن

گزارش کمیته ACI 214

کمیته فنی شرکت ثامن بتن

مهندس جواد چگینی

تابستان ۱۴۰۰

۱. ۱ مقدمه

در این راهنما، مقدمه‌ای برای ارزیابی از نتایج آزمایش مقاومت بتن ارائه می‌شود. شیوه‌های توصیف شده برای نتایج آزمایش مقاومت فشاری مورد نیاز توسط ACI 301، ACI 318 و دستور العمل‌ها و مشخصات مشابه قابل اجرا است. مفاهیم آماری توصیف شده برای تحلیل سایر نتایج رایج آزمایش بتن، از جمله مقاومت خمشی، اسلامپ، مقدار هوا، چگالی، مدول‌های الاستیسیته و سایر آزمایش‌های مورد استفاده برای ارزیابی بتن و مواد تشکیل دهنده قابل اجرا است. این راهنما فرض می‌نماید که نتایج آزمایش بتن مطابق با یک توزیع نرمال است.

در اکثر پروژه‌های ساخت و ساز در ایالات متحده و کانادا، نمونه‌برداری روزمره از بتن و ساخت استوانه‌های استاندارد قالب گیری شده ضروری است. این استوانه‌ها معمولاً از نمونه بتنی قالب گیری می‌شوند که از تخلیه یک کامیون یا پیمانه بتن گرفته شده‌اند. آنها پیرو شیوه‌های استاندارد ASTM C31/C31M، قالبگیری و به‌عمل می‌آیند و در صورت نیاز از طریق ASTM C39/C39M آزمایش می‌شوند. اگر بتن، این چنین آماده، عمل‌آوری و آزمایش شده باشد، نتیجهٔ مقاومت فشاری بتن عمل‌آمده، تحت شرایط کنترل شده است، نه مقاومت در محل بتن در عضو یا سازه. با یکپارچه‌سازی شرایط عمل‌آوری و با نشان دادن بتن با خواص ثابت، انتظار می‌رود که این استوانه‌ها مقاومت یکسانی داشته باشند. نتایج این استوانه‌ها برای مقاصد پذیرش بتن استفاده می‌شوند.

بیش از چندین دهه است که بتن به عنوان پرمصرف‌ترین مادهٔ ساختمانی شناخته می‌شود. از آنجایی که متغیرهای بیشماری بر عملکرد این ماده تاثیر می‌گذارند، برای دستیابی به یک سازه بتنی با عملکرد مناسب، باید تمامی فرآیندهای طراحی نسبت‌های اختلاط، تولید، تحویل، اجرا و آزمایش بتن، مطابق با دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های معتبر، صورت پذیرند. هر یک از مراحل و فرآیندهای مذکور، شامل متغیرهایی هستند که به نحوی بر عملکرد و در حالت کلی بر نتایج بتن تأثیرگذار هستند. برای رسیدن به هدف نهایی، یعنی رسیدن به یک بتن سازه‌ای با عملکرد یکنواخت و مطلوب، باید تمامی متغیرهایی که باعث تغییرات در نتایج مقاومت می‌شوند را شناسایی کرد و آنها را در درجهٔ قابل قبولی، کنترل نمود.

کتاب حاضر، با عنوان ارزیابی از نتایج آزمایش مقاومت، آخرین ویرایش کمیته ۲۱۴ می‌باشد و به شیوه‌های آماری در ارزیابی نتایج مقاومت به بتن می‌پردازد. شیوه‌های آماری، ابزارهای ارزشمندی را در جهت ارزیابی از نتایج آزمایش مقاومت بتن فراهم می‌کنند. اطلاعات استخراج شده از این شیوه‌ها، برای تعیین معیار طراحی، مشخصات و سایر پارامترهای مورد نیاز برای ارزیابی و اصلاح بتن سازه‌ای، ارزشمند هستند. این راهنما راجع به تغییراتی که در مقاومت بتن رخ می‌دهد، بحث می‌نماید و شیوه‌های آماری مفیدی را در تفسیر این تغییرات با توجه به معیار و آزمایش مشخص شده، ارائه می‌دهد. فصل اول و دوم کتاب، مقدمه و نشانه گذاری می باشد. در فصل سوم، بحثی در پیرامون سرچشمه‌های تغییرپذیری پیمانه به پیمانه دیگر، در تولید بتن آغاز می‌شود، به دنبال آن، سرچشمه‌های تغییرپذیری حدود پیمانه بیان می‌شوند. در فصل چهارم، ابزارهای آماری مورد استفاده برای تحلیل و ارزیابی تغییرپذیری بتن و تعیین تطابق با مشخصات داده شده، ارائه می‌شوند. در فصول پنجم و ششم، مشخصات مبتنی بر آمار بررسی می‌شوند

تغییر در نتایج آزمایش مقاومت اجتناب ناپذیر است. تغییرات در مقاومت اندازه‌گیری‌شده بتن از دو منبع سرچشمه می‌گیرد:

- تغییرات پیمانه به پیمانه دیگر که ممکن است ناشی از ایجاد تغییر در اجزای تشکیل دهنده یا نسبت‌های اجزای تشکیل دهنده، نسبت آب به مواد سیمانی *(w/cm)*، مخلوط کردن، انتقال دادن، ریختن، نمونه برداری از پیمانه، متراکم نمودن و عمل‌آوری باشد؛
- تغییرات حدود پیمانه که به تغییرات حدود آزمایش نیز نامیده می‌شود، در درجهٔ اول بخاطر تفاوت در نمونه برداری از نمونه پیمانه، آماده‌سازی آزمونه، عمل‌آوری و شیوه‌های آزمایش است.

همانطور که از طریق ASTM C94/C94M، مشخص شده است، در یک مخلوط‌کن پیمانه، بین قسمت جلو و پشت مخلوط‌کن، تفاوت‌هایی وجود دارد. به همین دلیل، برای تهیه نمونه‌های ترکیبی از قسمت‌های مرکزی بارها، تکنیک‌های سطح ۱ میدانی ACI آموزش داده می‌شوند.

در خصوص مقاومت فشاری بتن، از یک سری آزمایش‌ها می‌تواند نتایجی حاصل شود. وقتی تعداد کافی از آزمایش‌ها مطابق با شیوه‌های استاندارد و روشهای آزمایش صورت پذیرد، ویژگی‌های مقاومت بتن را می‌تواند به‌طور دقیقی برآورد نمود.

در هنگام ارزیابی از نتایج مقاومت بتن، روش های آماری، ابزار ارزشمندی فراهم می‌کنند. همچنین اطلاعات استخراج‌شده از آنها نیز، برای تصحیح و پالایش معیار طراحی و مشخصات بتن ارزشمند است. این راهنما راجع به تغییرات مقاومت بتن بحث می‌نماید و برای تفسیر آنها، با توجه به معیارهای پذیرش و آزمایش‌های مشخص شده، شیوه‌های آماری مفیدی ارائه می‌دهد.

برای معتبر بودن شیوه‌های آماری توصیف شده در این راهنما، داده‌ها باید از نمونه‌های بدست آمده از یک طرح نمونه برداری تصادفی استخراج شوند. نمونه برداری تصادفی زمانی است که بتن با هر حجمی برای انتخاب شدن، از شانس انتخاب یکسان برخوردار باشد. برای اطمینان از چنین شرایطی، انتخاب باید با استفاده از یک مکانیزم هدف مشخص، مانند جدول اعداد تصادفی باشد. وقتی پیمانه‌های نمونه بر اساس قضاوت نمونه‌بردار انتخاب شوند، احتمال این‌که انحرافاتی حاصل شود و تحلیل را بی‌اعتبار می‌سازد، وجود دارد. Natrella (۱۹۶۳)، Box و همکاران (۲۰۰۵) و ASTM D 3665 در رابطه با نیاز به نمونه برداری تصادفی بحث نموده اند و جدول مختصر و مفیدی از اعداد تصادفی تهیه کرده اند.

۱. ۲ خلاصه

این راهنما با بحثی در پیرامون منابع تغییر پذیری در تولید بتن در فصل ۳ آغاز می‌شود، به دنبال آن منابع تغییرپذیری حدود پیمانه ارائه می‌شوند. در فصل ۴ ابزارهای آماری مورد استفاده برای تحلیل و ارزیابی تغییرپذیری بتن و تعیین تطابق با مشخصات داده شده، ارائه می‌شوند. در فصول ۵ و ۶ مشخصات مبتنی بر آمار بررسی می‌شوند.

۲. ۱ نشانه‌گذاری

d_2 = عاملی برای محاسبه انحراف استاندارد حدود پیمانه از میانگین دامنه (جدول ۱.۴).

$f_{c'}$ = مقاومت فشاری مشخصه بتن، MPa (psi).

$f_{cr'}$ = میانگین مقاومت فشاری لازم بتن (برای اطمینان از اینکه بیش از نسبت مجاز آزمایش‌ها، زیر مقاومت فشاری مشخصه نخواهند بود) مورد استفاده به عنوان مبنایی برای انتخاب نسبت‌های بتن، MPa (psi).

M = میانهٔ یک توزیع که نیمی از مقادیر بالا و نیمی از مقادیر پایین آن است.

n = تعداد آزمایش‌ها در یک سابقه.

R = دامنه حدود پیمانه.

$\bar{R}$ = دامنه متوسط.

$\bar{R}_m$ = دامنه میانگین حداکثر، مورد استفاده در برخی نمودارهای کنترل.

s = انحراف استاندارد نمونه، برآوردی از انحراف استاندارد جمعیت، همچنین به اصطلاح $S_{overall}$ نامیده می‌شود.

$\overline{s}$ = میانگین آماری انحراف استاندارد یا انحراف استاندارد «ادغامی».

s_1 = انحراف استاندارد نمونه حدود پیمانه، $S_{within-batch}$ نیز نامیده می‌شود.

s_2 = انحراف استاندارد نمونه پیمانه به پیمانه دیگر، $S_{producer}$ نیز نامیده می‌شود.

V = ضریب تغییرات، ضریب پراکندگی نیز نامیده می‌شود.

V_1 = ضریب تغییرات حدود پیمانه.

$\overline{X}$ = میانگین نتایج آزمایش مقاومت، همچنین، متوسط نیز نامیده می‌شود.

X_1 = نتیجه یک آزمایش مقاومت.

z = ضریب ثابت برای انحراف استاندارد s که به تعداد آزمایش‌هایی که پیش‌بینی می‌شود به زیر $f_{c'}$ قرار گیرد، بستگی دارد (جدول ۳.۵).

μ = متوسط جمعیت.

σ = انحراف استاندارد جمعیت.

σ_1 = انحراف استاندارد جمعیت حدود پیمانه.

σ_2 = انحراف استاندارد جمعیت پیمانه به پیمانه دیگر.

فصل اول

تغییرات در مقاومت فشاری

کلیات

تغییرات در مقاومت آزمونه‌های آزمایش بتن را می‌توان از دو منبعی که اساساً متفاوت هستند، جستجو نمود:

۱. تغییرپذیری در مقاومت ایجاد شدهٔ از مخلوط بتن، فرایند تولید؛ برخی از علل آن تحت تغییرات پیمانه به پیمانه دیگر در جدول ۱.۳ به‌طور مفصل راجع به آن توضیح داده شده است.

۲. تغییرپذیری در سنجش مقاومت که از روند و شیوه‌های آزمایش حاصل می‌شود، در ستون تغییرات حدود پیمانه در جدول ۱.۳، تشریح شده است.

تغییر در ویژگی‌های اندازه گیری شده، ممکن است به دلایل تصادفی یا قابل تعیین (استناد پذیر) به عامل تغییر وابسته باشد. برای هر فرایندی، تغییر تصادفی طبیعی است؛ در یک روند ثابت، فقط تغییرپذیری تصادفی نشان داده خواهد شد. دلایل قابل تعیین نشانگر تغییرات سیستماتیک هستند که بطور نوعی با یک تغییر در ویژگی‌های بنیادین آماری، مثل

متوسط، انحراف استاندارد، ضریب تغییرات یا سایر پارامترهای آماری مرتبط اند. انحراف استاندارد، رایج‌ترین شاخص مورد استفاده برای بیان پراکنش داده‌های پیرامون متوسط است. با وجود این، وقتی تغییرپذیری در داده‌های بین دو مجموعه از نتایج با مقاومت‌های متوسط مشخصاً مختلف را مقایسه می‌کنیم، می‌بینیم استفاده از ضریب تغییرات اغلب آموزنده تر است.

۳. ۲ تأثیر تغییرات پیمانه به پیمانه دیگر بر مقاومت بتن

در یک مجموعه مواد خام معین، مقاومت بتن تا حد زیادی تحت تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm) است. کنترل کردن w/cm برای تولید بتن با مقاومت پایدار، از اصول مهم اولیه است. چون مقدار مواد سیمانی را با ثابت نگهداشتن نسبت w/cm که عمدتاً شامل کنترل دقیق مقدار کل آب مصرفی است، می‌توان به دقت اندازه گیری نمود (۱۹۹۶، Neville).

تغییرات مقاومت اغلب ناشی از تغییر مقدار هوا می‌باشد. مقدار هوای وارد شده هم بر نیاز به آب مورد نیاز و هم بر مقاومت تأثیرگذار است. بین مقاومت و مقدار هوا، یک رابطه معکوس وجود دارد (۲۰۰۲، Kosmatka و همکاران). مقدار هوای یک مخلوط بتن مشخص بسته به تغییرات در مواد تشکیل‌دهنده، مدت زمان آمیختن و شرایط محیطی محل می‌تواند تغییر کند. برای اینکه کنترل بتن به خوبی صورت پذیرد، معمولاً مقدار هوای وارد شده، دقیقاً در محل ساخت و ساز نظارت می‌شود.

درجه حرارت بتن تازه بر میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به قوام مناسب و مقدار هوای وارد شده، تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، درجه حرارت بتن در ۲۴ ساعت اول عمل‌آوری می‌تواند تا حد زیادی بر مقاومت‌های سن-ثـانویهٔ بتن تأثیرگذار باشد. استوانه‌های بتنی که مطابق با استاندارد ASTM C39/C39M عمل‌آوری نمی‌شوند (نسبت به اوقاتی که در آن باید رویدادهای خاصی رخ دهند و محدوده درجه حرارت قابل قبول باشد و نیاز به پیشگیری از آسیب و از دست رفتن رطوبت باشد)، الزاماً مقاومت بالقوه بتن را منعکس نخواهند کرد.

استفاده نابجا از مواد افزودنی می‌تواند منجر به کاهش مقاومت بتن شود. عملکرد شناخته شده مواد افزودنی در درجه حرارت‌های عادی ممکن است در درجه حرارت‌های بشدت پایین یا بـالا، متفاوت باشد. عملکرد یک ماده افزودنی وقتی به تنهایی مورد استفاده قرار گیرد ممکن است در صورت ترکیب با ماده افزودنی دیگر متفاوت باشد.

شیوه‌های ساخت و ساز بخاطر مخلوط کردن ناکافی، تراکم نامناسب، تأخیر در بتن‌ریزی، عمل‌آوری نامناسب و حفاظت ناکافی در سنین اولیه می‌تواند منجر به ایجاد تغییرات در **مقاومت درجا** شود. این تفاوت‌ها، در ساخت و ذخیره نمودن آزمونه‌ها تحت

شرایط استاندارد (ASTM C31/C31M) منعکس نخواهد شد، بلکه با استفاده از روش‌های غیرمخرب آزمودن یا آزمودن مقاومت مغزه‌ها، برآوردهای مقاومت منعکس می‌شود.

جدول ۱.۳ منابع اصلی تغییر مقاومت

تغییرات پیمانه به پیمانه دیگر	تغییرات حدود پیمانه
تغییرات در مشخصات و نسبت‌های عناصر بتن: سنگدانه‌ها؛ مواد سیمانی، از جمله پوزولان‌ها؛ مواد افزودنی. **تغییرات در w/cm به علت:** کنترل ضعیف آب **تغییر در شرایط رطوبت انبار ذخیره سنگدانه:** سنجش‌های رطوبت متغیر در سنگدانه؛ باز آب زدن. **تغییرات در مخلوط‌کردن، انتقال دادن و نمونه‌برداری:** سرعت و زمان مخلوط کردن؛ فاصله بین پلانت و بتن ریزی شرایط جاده؛ کا ستی در بد ست آوردن نمونه نماینده از پیمانه. **تغییرات در بتن ریزی و تراکم:** ناورو، پمپ و ارابه حمل بتن؛ ارتعاش داخلی یا خارجی؛ اپراتورهای مختلف. **تغییرات در درجه حرارت بتن و عمل‌آوری*:** فصل بتن ریزی؛ رطوبت محیط؛ سرعت باد.	**نمونه برداری نامناسب از نمونه پیمانه.** **تغییرات ناشی از تکنیک‌های ساخت:** شرایط غیر استاندارد؛ ابزارهای نادرست؛ کیفیت ضعیف قالب‌ها، قالب‌های آسیب‌دیده یا کج شده؛ قالب‌گیری و تراکم غیرا ستاندارد؛ ر سیدگی نامناسب نمونه‌های آزمایش تازه. **تفاوت ها در عمل‌آوری:** تأخیر در آغاز عمل‌آوری اولیه؛ تغییر دمایی؛ کنترل رطوبت متغیر؛ عمل‌آوری اولیه غیراستاندارد؛ تأخیر در آوردن استوانه‌ها به آزمایشگاه؛ رسیدگی نامناسب استوانه‌ها در حمل و نقل؛ عمل‌آوری نامناسب نهایی. **تغییرات در آزمودن نمونه:** آزمایش‌کننده فاقد صلاحیت فنی؛ آماده‌سازی سطح آزمونه‌ها؛ تجهیزات آزمایش غیردقیق یا کالیبره نشده؛ نرخ بارگذاری غیراستاندارد؛ حفظ ضعیف سابقه آزمایشات.

۳.۳ تأثیر تغییرات حدود پیمانه بر مقاومت بتن

آزمودن برای تعیین انطباق با مشخصات پیمان باید مطابق با روش‌های مشخص شده در اسناد پیمان، مانند ASTM C31/C31M و ASTM C39/C39M صورت گیرد. وقتی آزمونه‌ها تحت شرایط استاندارد آماده شدن و عمل آمدن می‌باشند، آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن در جهت پذیرش ارزیابی می‌شود و نه برای مقاومت درجا. هدف از انجام چنین آزمایش‌هایی تعیین مقاومت درجای سازه نیست، بلکه هدف از آن، حصول اطمینان از بتن تحویل شده و ریخته شده، همگام با بتن مشخص شده است. انحرافات در نمونه برداری میدانی، آماده‌سازی آزمونه، عمل‌آوری و شیوه‌های آزمودن ممکن است در نتایج آزمایش منجر به مقاومت پایین‌تری شود. نمونه برداری میدانی، ساخت، عمل‌آوری، رسیدگی و آزمودن آزمونه‌ها باید توسط تکنسین‌های مجاز ACI یا توسط پرسنل آموزش دیده و مجاز معادل با آن، انجام پذیرد. می‌بایست مفادی برای حفظ شرایط عمل‌آوری مشخص شده، ایجاد شود. تا زمانی که مقاومت کافی در استوانه حاصل می‌شود، برای جلوگیری از آسیب، نباید آزمونه‌های بتنی که در حال سخت شدن و کسب مقاومت هستند، به‌هم برخورد کنند (ASTM C31/C31M).

استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی دقیق، به‌طور مناسب کالیبره شده و شیوه‌های مناسب برای آماده سازی نمونه، یک امر ضروری است. نتایج آزمایش با تغییرپذیری اندک، الزاماً نشان گر نتایج دقیق آزمایشات نیست. یک خطای سیستماتیک و عملی روزمره ممکن است منجر به ایجاد نتایج منحرف امّا یکنواخت شود. تجهیزات و روندهای آزمایشگاهی می‌بایست به‌صورت دوره‌ای کالیبره شده و بررسی شوند. پرسنل آزمایش باید تکنسین‌های آموزش دیدهٔ مجاز ACI یا معادل آن باشند و آنها به‌طور روزمره مورد بررسی قرار گیرند.

فصل دوم

تحلیل داده‌های مقامت

کلیات

برای نشان دادن دقیق تغییر مقاومت بتن و استفادهٔ مجاز از شیوه‌های آماری مناسب در جهت تفسیر نتایج آزمایش به تعداد کافی آزمایش نیاز است. شیوه‌های آماری در جهت تعیین کیفیت و مقاومت بالقوه بتن و بیان نتایج در مفید ترین شکل، یک مبنای دقیق را فراهم می‌سازند.

۲.۴ توابع آماری

نتیجه یک آزمایش مقاومت، میانگین مقاومت همهٔ آزمونه‌های هم‌سن، ساخته شده از یک نمونهٔ اخذ شده از یک پیمانه بتن است. یک آزمایش مقاومت نمی‌تواند تنها بر اساس یک استوانه باشد. ACI 318 بیان می‌کند که یک «آزمایش مقاومت باید میانگین مقاومت حداقل دو استوانه ۱۵۰×۳۰۰ mm (۶×۱۲ in) یا سه استوانه ۱۰۰×۲۰۰ mm (۴×۸ in) از پیمانهٔ یکسان بتن و آزمایش شده در سن یکسان باشد».

در این راهنما، فرض بر این است که نتیجهٔ آزمایش بتن، پیرو یک توزیع نرمال می‌باشد. شکل ۱.۴، «منحنی زنگی شکل» که مشخصه‌ای از توزیع نرمال است را نشان می‌دهد. توزیع نرمال به‌صورت کامل به لحاظ ریاضی با دو پارامتر آماری تعریف می‌شود: متوسط جمعیت μ و انحراف استاندارد σ.

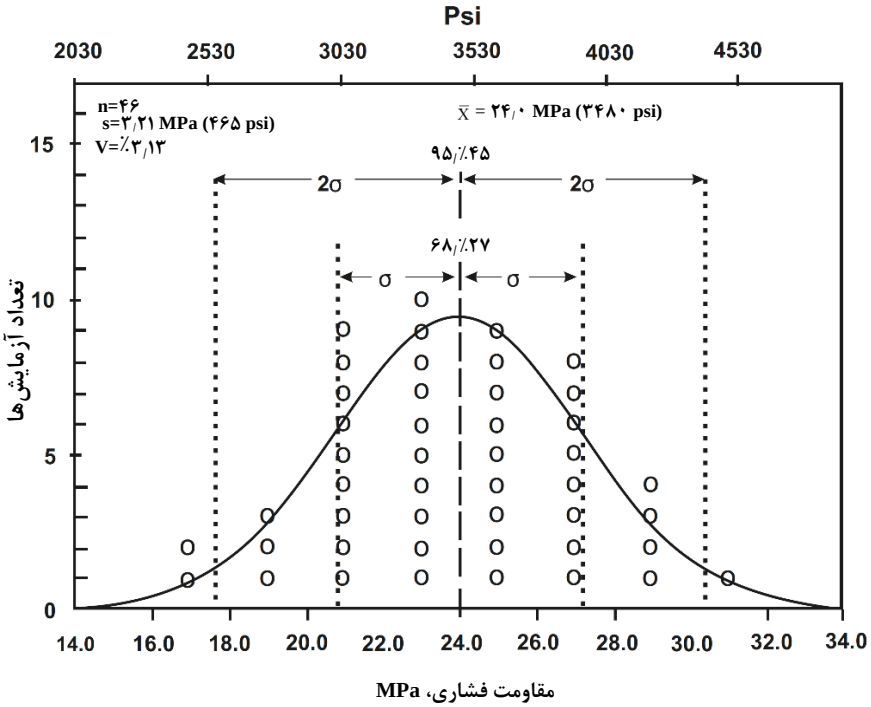
یک مشخصهٔ توزیع نرمال، (عموماً) آن است که ٪۶۸٫۲۷ داده‌ها در محدودهٔ ۱ انحراف استاندارد از میانگین است و ٪۹۵٫۴۵ از داده‌ها، در محدودهٔ ۲ انحراف استاندارد از میانگین است. یادداشت‌های روی نمودار نشان دهندهٔ تعداد نمونه‌ها n؛ انحراف استاندارد نمونه s، که تخمینی از σ می‌باشد؛ ضریب تغییرات V؛ و متوسط نمونه $\bar{X}$ است که μ را برآورد می‌کند. همچنین

بر روی نمودار، یک هیستوگرام از نتایج اندازه‌گیری شده آزمایش است که به نسبت دامنه‌های مقاومت مرتب شده است. هر نقطه نشانگر یک آزمایش است که نشان می‌دهد این مجموعه از داده‌ها، به‌طور طبیعی توزیع می‌شوند. رسم نمودن هیستوگرام‌ها، یکی از ساده ترین روش‌ها برای بررسی نرمال بودن داده‌ها است.

به هنگام ارزیـابی از آزمایش‌های مقاومت بتن، همیشه نمی‌توان توزیع را نرمال فرض نمود. در اکثر موارد وقتی مقاومت بتن بیش از ۷۰MPa (۱۰۰۰۰ psi) نباشد، توزیع نرمال مناسب است (Cook، ۱۹۸۲). با وجود این، Cook (۱۹۸۹) بعد تر گزارش نمود که وقتی عامل محدود کننده، مقاومت سنگدانه است، برای بتن پر مقاومت ممکن است **توزیع چوله داری** نتیجه دهد. وقتی داده‌ها در حول میانگین متقارن نباشند، امّا به چپ یا راست متمرکز باشند، گفته می‌شود که توزیع، چوله است. وقتی یک منحنی توزیع بیش از حد قله دار یا مسطح است، گفته می‌شود کشیدگی وجود دارد. داده‌هایی که چولگی یا کشیدگی را نشان می‌دهند، به‌صورت نرمال توزیع نمی‌شوند و در هر تحلیلی، فرض نمودن یک توزیع نرمال ممکن است بسیار گمراه کننده شود. برای ارزیابی آماری از بتن‌های پر مقاومت، می‌بایست به کشیدگی و چولگی توجه شود. Cook (۱۹۸۹) معادلات ساده شده‌ای را در جهت محاسبه چولگی و کشیدگی نسبی برای یک مجموعه دادهٔ خاص، ارائه نمود. بحث و بررسی بیشتر، در پیرامون این موضوعات، فراتر از محدودهٔ این سند است؛ خوانندگان علاقمند باید به مراجع آماری رجوع نمایند.

زمانی از یک مخلوط، کنترل رضایت‌بخشی بتن وجود دارد که با ساخت هیستوگرام نتایج آزمایش، مقادیر آزمایش مقاومت گرایش به انباشتگی نزدیک به مقدار میانگین و ظاهری بلند و باریک داشته باشند. وقتی تغییر در نتایج مقاومت افزایش یابد، پهن شدن داده‌ها نیز افزایش می‌یابد و منحنی توزیع نرمال به شکلی مسطح‌تر و عریض‌تر تغییر می‌یابد (شکل ۲.۴). همانطور که در بخش‌های ۱.۲.۴ و ۲.۲.۴ نشان داده شده است، به هنگام اعمال آزمایش‌های مقاومت بتن، می‌توان این پارامترهای آماری را محاسبه نمود.

زمانی از یک مخلوط، کنترل رضایت‌بخشی بتن وجود دارد که با ساخت هیستوگرام نتایج آزمایش، مقادیر آزمایش مقاومت گرایش به انباشتگی نزدیک به مقدار میانگین و ظاهری بلند و باریک داشته باشند. وقتی تغییر در نتایج مقاومت افزایش یابد، پهن شدن داده‌ها نیز افزایش می‌یابد و منحنی توزیع نرمال به شکلی مسطح‌تر و عریض‌تر تغییر می‌یابد (شکل ۲.۴). همانطور که در بخش‌های ۱.۲.۴ و ۲.۲.۴ نشان داده شده است، به هنگام اعمال آزمایش‌های مقاومت بتن، می‌توان این پارامترهای آماری را محاسبه نمود.



شکل ۴,۱ توزیع فراوانی از داده‌های مقاومت، متناظر با فرض توزیع نرمال.

۴. ۱.۲ متوسط $\bar{X}$ ؛

میانگین نتایج آزمایش مقاومت $\bar{X}$ ، با استفاده از معادله (۴-۱) محاسبه می‌شود.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} = \frac{1}{n}\sum X_i = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + X_3 + \ldots + X_n) \qquad (۴-۱)$$

در این معادله X_i ، i امین نتیجه آزمایش مقاومت است، یعنی میانگین حداقل دو استوانه ۱۵۰×۳۰۰ mm (۶×۱۲ in) یا سه استوانه ۱۰۰×۲۰۰ mm (۴×۸ in) آزمایش بتن. X_2 دومین نتیجه آزمایش مقاومت، X_3 سومین نتیجه آزمایش مقاومت و به همین صورت. $\sum X_i$ جمع همه نتایج آزمایش مقاومت و n تعداد آزمایش‌ها در سابقه است.

۴. ۲.۲ انحراف استاندارد نمونه s

انحراف استاندارد، شناخته شده ترین معیار پراکندگی داده‌های آزمایش است. انحراف استاندارد نمونه s، برآوردی از انحراف استاندارد جمعیت σ است. انحراف استاندارد جمعیت که تمامی داده‌های ممکن را در بر دارد، اغلب به عنوان تعداد نامتناهی از نقاط داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. نمونه، یک قسمت از جمعیت است که یک تعداد متناهی از نقاط داده را

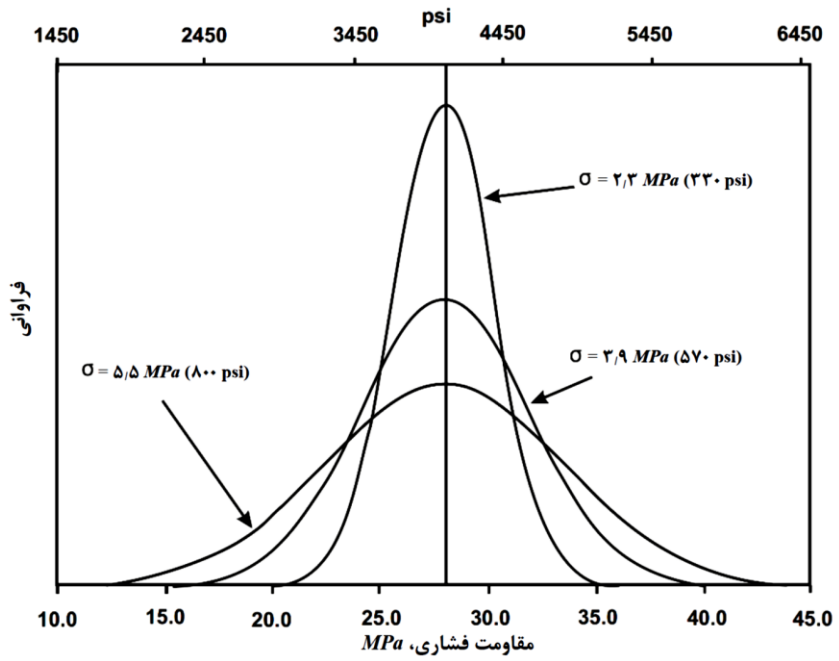
تشکیل می‌دهد. انحراف استانـدارد نمونه از طریق معادله (۴-۲a) یا از طریق معادل جبری آن [معادله (۴-۲b)] بدست می‌آید. معادله دوم برای محاسبه ارجحیت دارد چون ساده‌تر بوده و خطاهای گرد کردن را به حداقل می‌رساند. بسیاری از بسته‌های نرم افزاری کامپیوتری، توابع آماری را محاسبه می‌کنند. به هنگام استفاده از چنین برنامه‌هایی، از انحراف استانداردی که از طریق این نرم افزارها محاسبه می‌شود، اطمینان حاصل کنید که همانند انحراف استاندارد نمونه‌ای باشد که در معادله (۴-۲a) نشان داده شده است.

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{(X_1-\bar{X})^2+(X_2-\bar{X})^2+\ldots(X_n-\bar{X})^2}{n-1}} \qquad (۴\text{-}۲a)$$

که با معادله (۴-۲b) معادل است.

$$s=\sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^{n}X_i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}X_i\right)^2}{n(n-1)}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}X_i^2-n\bar{X}^2}{n-1}} \qquad (۴\text{-}۲b)$$

در این معادله s انحراف استاندارد نمونه؛ n تعداد نتایج آزمایش مقاومت در سابقه؛ $\bar{X}$ متوسط نمونه یا میانگین نتیجه آزمایش مقاومت است و $\sum X$ جمع نتایج آزمایش مقاومت است.



شکل ۴. ۲ منحنی‌های فراوانی نرمال برای سه توزیع مختلف با متوسط یکسان، امّا با تغییرپذیری مختلف.

به هنگام ترکیب دو سابقه مجزا از مخلوط‌های بتن با نتایج آزمایش مقاومت مشابه، اغلب تعیین میانگین آماری انحراف استاندارد که انحراف استاندارد ادغامی نیز نامیده می‌شود، ضروری است. همانطور که در معادله (۴-۳) نشان داده شده است، میانگین آماری انحراف استاندارد از دو سابقه محاسبه می‌شود.

$$\overline{s} = \sqrt{\frac{(n_A - 1)(s_A)^2 + (n_B - 1)(s_B)^2}{(n_A + n_B - 2)}} \qquad (۴-۳)$$

در این معادله $\overline{S}$ ، میانگین آماری انحراف استاندارد یا انحراف استاندارد ادغامی[1]است که از دو سابقه تعیین می‌شود؛ S_A و S_B به ترتیب انحرافات استاندارد از سوابق A و B هستند و n_A و n_A به ترتیب تعداد آزمایش‌ها در سوابق A و B هستند.

۴. ۳.۲ پارامترهای آماری دیگر

مقادیر آماری دیگر، به‌طور معمول برای مقایسهٔ مجموعه داده‌های مختلف یا برای تخمین پراکندگی در نبود اندازه‌های نمونهٔ معتبر آماری، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴. ۱.۳.۲ ضریب تغییرات V

بیان انحراف استاندارد نمونه به عنوان درصدی از متوسط مقاومت میانگین $\overline{X}$ ، ضریب تغییرات نامیده می‌شود.

$$V = \frac{s}{\overline{X}} \times 100 \qquad (۴-۴)$$

که در آن، V ضریب تغییرات، s انحراف استاندارد نمونه و $\overline{X}$ میانگین نتیجه آزمایش مقاومت است.

ضریب تغییرات، به میزان کمتری تحت تأثیر بـزرگای سطح مقاومت قرار می‌گیرد (۱۹۸۹، Cook؛ ۱۹۸۵، Anderson)، از این رو، ضریب تغییرات برای مقایسه درجهٔ کنترل بر طیف گسترده‌ای از مقاومت‌های فشاری، مفیدتر از انحراف استاندارد است. به‌طور نوعی، ضریب تغییرات به‌هنگامی استفاده می‌شود که هدف، مقایسه پراکندگی در گروهی از نتایج آزمایش مقاومت با یک تفاوت در مقاومت میانگین بیش از ۷ *MPa* (۱۰۰۰ *psi*) است.

۴. ۲.۳.۲ دامنه R

یک پارامتر آماری است که به‌وسیلهٔ کسر نمودن کمترین مقدار از بیشترین مقدار در یک مجموعه از داده‌ها حاصل می‌شود. به هنگام ارزیابی از نتایج آزمایش بتن، دامنه آزمایش R، از یک نتیجهٔ آزمایش مقاومت، به‌وسیلهٔ کسر کمترین مقاومت

[1]. Pooled standard deviation

استوانهٔ منفرد از بیشترین مقاومت استوانهٔ منفرد بدست آمده از دو یا چند استوانه‌ای که یک نتیجه آزمایش مقاومت را تشکیل می‌دهند، حاصل می‌شود. برای برآورد انحراف استاندارد حدود پیمانه، از متوسط دامنه حدود پیمانه استفاده می‌شود. برای بحث بیشتر به بخش ۱.۳.۴ رجوع شود. وقتی برای یک آزمایش، از دو استوانه آزمایش شده از نمونه و سن یکسان استفاده می‌شود، گاهی اوقات دامنهٔ آن آزمایش، «جفت-تفاضل» نامیده می‌شود.

۴. ۳ تغییرات مقاومت

همانطور که در فصول ۱ و ۳ ذکر شد، تغییرات در نتایج آزمایش مقاومت را می‌توان از طریق تغییرات پیمانه به پیمانه دیگر و تغییرات حدود پیمانه جستجو نمود.

۴. ۱.۳ تغییر حدود پیمانه

تغییرپذیری ناشی از آزمودن به وسیلهٔ تغییرات حدود پیمانه و مبتنی بر تفاوضل‌ها در سنجش مقاومت‌هایی از استوانه‌های هم منبع (تکراری) که یک نتیجه آزمایش مقاومت را تشکیل می‌دهند، برآورد می‌شود.

علت تغییرات حدود پیمانه ممکن است بخاطر نمونه برداری از نمونه پیمانه، ساخت، عمل‌آوری یا آزمایش از نمونه‌های آزمایش بتن باشد. با این حال، یک نتیجهٔ آزمایش مقاومت منفرد از یک مخلوط بتن، اطلاعات کافی را برای تحلیل آماری فراهم نمی‌کند. همینطور اطمینان در برآورد با هر گونه برآوردگر آماری، تابعی از تعداد نتایج آزمایش است.

گرچه یک نمونه با بیش از ۳۰ آزمایش، ارجحیت دارد، امّا انحراف استاندارد حدود پیمانه S_1 را می‌توان از دامنه میانگین $\bar{R}$ با حداقل ۱۰ نتیجه آزمایش مقاومت هم‌سن برآورد نمود. S_1 از تقسیم $\bar{R}$ به d_2 حاصل می‌شود.

$$s_1 = \frac{1}{d_2}\bar{R} \qquad (۴-۵)$$

مقدار مناسب d_2 را می‌توان از جدول (۱.۴) بر اساس تعداد نمونه‌های ارائه شده در هر نتیجه آزمایش مقاومت، انتخاب نمود. مقادیر d_2 در این جدول، از جدول ۴۹ راهنمای ASTM 7A استخراج شده است. مقادیر d_2 به آن دلیل افزایش می‌یابد که بـرای یک جمعیت با یک انحراف استاندارد معین، دامنهٔ مورد انتظار حاصله از یک مجموعه چهار آزمونه‌ای، بزرگتر از یک مجموعه دو آزمونه‌ای است.

جدول ۴. ۱ عامل‌های محاسبهٔ انحراف استاندارد حدود پیمانه، از دامنه آزمایش‌ها با استفاده از دو، سه یا چهار آزمونه*.

تعداد آزمونه‌ها	d_2
۲	۱٫۱۲۸
۳	۱٫۶۹۳
۴	۲٫۰۵۹

*در حالتی که دامنه باید از نتایج آزمایش با استفاده از تعداد استوانه‌های مختلف محاسبه شود، d_2، متوسط d_2 وزن‌دهی شده توسط تعداد آزمایش‌ها می‌باشد. به عنوان مثال، اگر قرار است d_2 بر اساس ۱۲ آزمایش که ۵ مورد از آن با استفاده از ۲ استوانه، ۴ مورد از آن با استفاده از ۳ استوانه و ۳ مورد از آن با استفاده از ۴ استوانه محاسبه شود، به این ترتیب d_2 برابر است با:

$$d_2 = 1{,}128(5/12) + 1{,}693(4/12) + 2{,}059(3/12) = 1{,}643$$

ضریب تغییرات حدود پیمانه V_1 که میزان پراکندگی را به عنوان درصدی از مقاومت میانگین بیان می‌کند، از انحراف استاندارد حدود پیمانه و میانگین مقاومت $\bar{X}$ تعیین می‌شود:

$$V_1 = \frac{s_1}{\bar{X}} \times 100 \qquad (۴-۶)$$

به عنوان مثال، وقتی برای هر یک از ۱۰ آزمایش مقاومت مجزا، دو استوانه ریخته می‌شوند و میانگین دامنهٔ مقاومت حدود پیمانه، ۱٫۷۵ *MPa* (۲۵۴ *psi*) است، انحراف استاندارد حدود پیمانهٔ برآورده شده (برای دو استوانه d_2=۱٫۱۲۸) برابر است با ۱٫۷۵/۱٫۱۲۸=۱٫۵۵ *MPa* (۲۵۴/۱٫۱۲۸=۲۲۵ *psi*). بیانیه مربوط به دقت در ASTM C39/C39M نشان می‌دهد ضریب تغییرات حدود پیمانه، برای آزمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰mm (۶×۱۲ in) که در آزمایشگاه ساخته می‌شوند ٪۲/۴ و برای استوانه‌هایی که در محل ساخته می‌شوند، ٪۲٫۹ است و برای استوانه‌های ۱۰۰×۲۰۰ mm (۴×۸ in) ساخته شده تحت شرایط آزمایشگاهی، ضریب تغییرات ٪۳٫۲ را نشان می‌دهد.

خطاهای ثابت یا انحراف در شیوه‌های آزمودن، الزاماً از طریق مقایسه نتایج آزمایش استوانه‌ها از نمونه بتن یکسان، یافت نمی‌شوند. هنگامی که انجام نادرست یک آزمایش، بطور ثابت صورت گیرد، ممکن است تغییرات حاصله کوچک باشند.

۴. ۲.۳ تغییرات پیمانه به پیمانه دیگر

تفاوت‌ها در مقاومت از یک پیمانه به پیمانه دیگر را می‌توان به تغییرات حاصله از دو مقوله اصلی نسبت داد:

۱. ویژگی‌ها و خواص عناصر بتن؛

۲. بچینگ، آمیختن، حمل و نقل، نمونه برداری از پیمانه و شرایط جوی.

هنگامی که هر نتیجه آزمایش، نمایندهٔ پیمانهٔ مجزایی از بتن باشد، می‌توان تغییرات پیمانه به پیمانه دیگر را از نتایج آزمایش مقاومت یک اختلاط بتن، تخمین زد.

۳.۳.۴ تغییر کلی

تغییر کلی که از طریق انحراف استاندارد σ (برای یک جمعیت) یا s (برای یک نمونه) اندازه‌گیری می‌شود، دارای دو مولفهٔ تغییرات است:

۱. حدود پیمانه σ_1 (جمعیت) یا حدود پیمانه s_1 (نمونه)؛

۲. پیمانه به پیمانه دیگر σ_2 (جمعیت) یا پیمانه به پیمانه دیگر s_2 (نمونه).

انحراف استاندارد نمونهٔ پیمانه به پیمانه دیگر، تغییرات قابل انتساب به تهیه‌کنندهٔ مواد تشکیل‌دهنده و تولیدکننده بتن را برآورد می‌کند. تغییر نمونهٔ حدود پیمانه، از نمونه برداری نمونه پیمانه، آماده‌سازی آزمونه، عمل‌آوری و آزمایش حاصل می‌شود. مقادیری برای انحرافات استاندارد نمونهٔ حدود پیمانه و کلی، بعلاوهٔ ضرایب تغییرات مرتبط با استانداردهای کنترل گوناگون در بخش ۵.۴ ارائه می‌شوند.

۴.۴ تفسیر پارامترهای آماری

از وقتی پارامترهای آماری مفروض، محاسبه شدند و هیستوگرام تایید شده، ترسیم شد (شکل ۱.۴)، به دنبال نتایج یک منحنی توزیع فراوانی نرمال، تحلیل اضافی از نتایج آزمایش امکان پذیر می‌شود. شکل ۱.۴ بخش تقریبی مساحت زیر منحنی توزیع فراوانی نرمال را نشان می‌دهد. نشان داده شده است، تقریباً ۶۸٪ مساحت (معادل ۶۸٪ از نتایج)، در محدودهٔ ±σ۱ و ۹۵٪ مساحت در محدودهٔ ±σ۲ واقع شده است. این خاصیت توزیع نرمال، امکان برآورد بخشی از نتایج آزمایش که انتظار می‌رود در محدودهٔ مضرب‌های z، از انحراف استاندارد σ از میانگین یا از هر مقدار مشخص دیگر قرار گیرد را میسر می‌کند.

جدول ۲.۴ درصدهای مورد انتظار از آزمایش‌های انفرادی کمتر از f'_c *

درصدهای مورد انتظار از آزمایش‌های پایین	مقاومت میانگین	درصد مورد انتظار از آزماش‌های پایین	مقاومت میانگین
۵٫۵	$f'_c + 1{,}6\sigma$	۴۶٫۰	$f'_c + 0{,}10\sigma$
۴٫۵	$f'_c + 1{,}7\sigma$	۴۲٫۱	$f'_c + 0{,}20\sigma$
۳٫۶	$f'_c + 1{,}8\sigma$	۳۸٫۲	$f'_c + 0{,}30\sigma$
۲٫۹	$f'_c + 1{,}9\sigma$	۳۴٫۵	$f'_c + 0{,}40\sigma$
۲٫۳	$f'_c + 2{,}0\sigma$	۳۰٫۹	$f'_c + 0{,}50\sigma$

$f'_c + 0/60\sigma$	۲۷/۴	$f'_c + 2/1\sigma$	۱/۸
$f'_c + 0/70\sigma$	۲۴/۲	$f'_c + 2/2\sigma$	۱/۴
$f'_c + 0/80\sigma$	۲۱/۲	$f'_c + 2/3\sigma$	۱/۱
$f'_c + 0/90\sigma$	۱۸/۴	$f'_c + 2/4\sigma$	۰/۸
$f'_c + 1/00\sigma$	۱۵/۹	$f'_c + 2/5\sigma$	۰/۶
$f'_c + 1/10\sigma$	۱۳/۶	$f'_c + 2/6\sigma$	۰/۴۵
$f'_c + 1/20\sigma$	۱۱/۵	$f'_c + 2/7\sigma$	۰/۳۵
$f'_c + 1/30\sigma$	۹/۷	$f'_c + 2/8\sigma$	۰/۲۵
$f'_c + 1/40\sigma$	۸/۱	$f'_c + 2/9\sigma$	۰/۱۹
$f'_c + 0/50\sigma$	۶/۷	$f'_c + 3/0\sigma$	۰/۱۳

هرچه اندازه نمونه افزایش می‌یابد، هیستوگرام داده‌ها با دقت بیشتری تمایل دارد که مانند یک توزیع نرمال شود. هنگامی که نتایجی اندکی در دسترس باشند، ممکن است با استاندارد تطبیق نشود و الگوی زنگی شکل به وجود نیاید. خطاهای نمونه برداری، ساخت، عمل‌آوری و آزمودن نیز می‌توانند منجر به فقدان تطابق بین یک هیستوگرام نتایج آزمایش مقاومت و یک توزیع نرمال شوند. کاستی در نمونه‌برداری به یک شیوهٔ کاملاً تصادفی، نمونه‌برداری از جمعیت‌های گوناگون یا وجود چوله یا کشیدگی در بتن‌های پر مقاومت (Cook ،۱۹۸۹)، عواملی هستند که می‌تواند موجب تفاوت‌های اساسی بین مقاومت‌های اندازه‌گیری شده و یک توزیع نرمال شوند.

جدول (۲.۴) مطابق توزیع تجمعی نرمال است که انتگرال تابع احتمال نرمال می‌باشد. لیست ذکر شده، احتمالی قرار گرفتن یک آزمایش به‌زیر f'_c است، وقتی که مقاومت میانگین مورد نیاز μ برابر با $f'_c + z\sigma$ باشد.

۴. ۵ استانداردهای کنترل

یکی از مقاصد اصلی ارزیابی آماری از داده‌های بتن، شناسایی سرچشمه‌ها یا منابع تغییرپذیری می‌باشد. از ایـن دانش، می‌توان در جهت تعیین گام‌های مناسب برای حفظ کنترل کیفیت استفاده نمود. در مورد یافتن تغییرات در تولید بتن، پردازش و رسیدگی مواد و عملیات موسسهٔ آزمایش و پیمان‌کار، چندین تکنیک را می‌توان استفاده کرد. مقایسه تغییرپذیری کلی و تغییر پذیری حدود پیمانه از طریق انحراف استاندارد یا ضریب تغییرات، با عملکرد پیشین تا حد مناسب یک رهیافت ساده است.

جدول ۳.۴ استانداردهای کنترل بتن برای $f_c' \leq$ ۳۵ MPa (۵۰۰۰ psi)

تغییر کلی					
نوع عملکرد	انحراف استاندارد برای استانداردهای کنترل مختلف، *MPa* (*psi*)				
	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی
آزمایش عمومی ساخت و ساز	بالای ۴٫۸ (بالای ۷۰۰)	۴٫۸ تا ۴٫۱ (۷۰۰ تا ۶۰۰)	۴٫۱ تا ۳٫۴ (۶۰۰ تا ۵۰۰)	۳٫۴ تا ۲٫۸ (۵۰۰ تا ۴۰۰)	زیر ۲٫۸ (زیر ۴۰۰)
پیمانه‌های آزمایشی آزمایشگاهی	بالای ۲٫۴ (بالای ۳۵۰)	۲٫۴ تا ۲٫۱ (۳۵۰ تا ۳۰۰)	۲٫۱ تا ۱٫۷ (۳۰۰ تا ۲۵۰)	۱٫۷ تا ۱٫۴ (۲۵۰ تا ۲۰۰)	زیر ۱٫۴ (زیر ۲۰۰)
تغییر حدود پیمانه					
نوع عملکرد	ضریب تغییرات برای استانداردهای کنترل مختلف، (درصد)				
	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی
کنترل میدانی آزمایش	بالای ۶٫۰	۶٫۰ تا ۵٫۰	۵٫۰ تا ۴٫۰	۴٫۰ تا ۳٫۰	زیر ۳٫۰
پیمانه‌های آزمایشی آزمایشگاهی	بالای ۵٫۰	۵٫۰ تا ۴٫۰	۴٫۰ تا ۳٫۰	۳٫۰ تا ۲٫۰	زیر ۲٫۰

جدول ۴.۴ استانداردهای کنترل بتن برای $f_c' \geq$ ۳۵ *MPa* (۵۰۰۰ psi)

تغییر کلی					
نوع عملکرد	ضریب تغییرات برای استانداردهای کنترل مختلف، (درصد)				
	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی
آزمایش عمومی ساخت و ساز	بالای ۱۴٫۰	۱۴٫۰ تا ۱۱٫۰	۱۱٫۰ تا ۹٫۰	۹٫۰ تا ۷٫۰	زیر ۷٫۰
پیمانه‌های آزمایشی آزمایشگاهی	بالای ۷٫۰	۷٫۰ تا ۵٫۰	۵٫۰ تا ۴٫۵	۴٫۵ تا ۳٫۵	زیر ۳٫۵
تغییر حدود پیمانه					
نوع عملکرد	ضریب تغییرات برای استانداردهای کنترل مختلف، (درصد)				
	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی
آزمایش کنترل میدانی	بالای ۶٫۰	۶٫۰ تا ۵٫۰	۵٫۰ تا ۴٫۰	۴٫۰ تا ۳٫۰	زیر ۳٫۰
پیمانه‌های آزمایشی آزمایشگاهی	بالای ۵٫۰	۵٫۰ تا ۴٫۰	۴٫۰ تا ۳٫۰	۳٫۰ تا ۲٫۰	زیر ۲٫۰

خواه انحراف استاندارد، خواه ضریب تغییرات، بسته به اینکه کدام سنجه، در سراسر دامنه‌ای از مقاومت‌های مورد توجه، ثابت‌تر است، سنجه‌های مناسبی از پراکندگی برای استفاده در موقعیت معین می‌باشند. تجارب میـدانی نشان می‌دهند که انحراف استاندارد، در سراسر یک دامنه محدودی از مقاومت‌ها به‌طور معقولانه‌ای ثابت باقی می‌ماند؛ با وجود این، مطالعات

متعددی نشان می‌دهند که ضریب تغییرات، در سراسر دامنهٔ وسیعتری از مقاومت‌ها، بخصوص در مقاومت‌های بالاتر تا حدی ثابت‌تر است (۱۹۸۲، ۱۹۸۹، Cook). مقایسه کردن در جهت ارزیابی از سطح کنترل بین مقاومت‌های فشاری و خمشی، به وسیلهٔ ضریب تغییرات آسان تر است. همچنین، ضریب تغییرات، یک پارامتر آماری بهتری برای ارزیابی‌های از حدود پیمانه می‌باشد (۱۹۵۹، Neville؛ ۱۹۷۰، Metcalf؛ ۱۹۵۳، Murdock؛ ۱۹۶۰، Emtroy؛ ۱۹۶۴، Misch و ASTM C 802). می‌توان از انحراف استاندارد یا ضریب تغییرات برای ارزیابی سطح کنترل مخلوط‌های بتنی با مقاومت متعارف استفاده نمود، امّا برای مقاومت‌های فراتر از ۳۵ *MPa* (۵۰۰۰ *psi*)، ضریب تغییرات ارجحیت دارد.

جدول ۳.۴ استانداردهای کنترل متناسب با بتن‌های دارای f'_c تا ۳۵ *MPa* (۵۰۰۰ *psi*) را ارائه می‌دهد. جدول ۴.۴ استانداردهای کنترل بتن‌های دارای f'_c فراتر از ۳۵ *MPa* (۵۰۰۰ *psi*) را ارائه می‌دهد. این استانداردهای کنترل بر مبنای بررسی و تحلیل داده‌های مقاومت فشاری، توسط کمیته‌های ۲۱۴ و ۳۶۳ (ارزیابی از آزمایش‌های مقاومت و بتن پر مقاومت) اتخاذ شده اند. آزمایش‌های مقاومت به وسیلهٔ استوانه‌های ۱۵۰×۳۰۰ mm (۶×۱۲ in) انجام شدند. به این ترتیب، این استانداردهای کنترل، برای آزمونه‌هایی در این اندازه که در سن ۲۸ روزه آزمایش شده اند، قابل اجرا هستند. این استانداردها با تفاوت‌های جزئی ممکن است برای استوانه‌هایی با اندازه‌های دیگر، مانند استوانه‌های ۱۰۰×۲۰۰ mm (۴×۸ in)، همانگونه که در ASTM C31/C31M تصدیق شده است، قابل اجرا باشند.

ضریب تغییرات کلی و ضریب تغییرات حدود پیمانه برای استوانه‌های ۱۰۰×۲۰۰ mm (۴×۸ in)، در مقایسه با استوانه‌های ۱۵۰×۳۰۰mm (۶×۱۲ in) اندکی بالاتر تشخیص داده شده است (۲۰۰۶، Detwiler و همکاران؛ ASTM C31/C31M). بنابراین، همانطور که ACI 318 الزام می‌دارد، در جهت کاهش تغییرات در نتایج آزمایش استوانه-های ۱۰۰×۲۰۰ mm (۴×۸ in)، می‌بایست از مقاومت میانگین حداقل سه استوانهٔ ۱۰۰×۲۰۰ mm (۴×۸ in) برای تعیین مقاومت فشاری استفاده شود.

به عنوان یک معیار از خطای حدود پیمانه، برخی از مفسران بین‌المللی جفت تفاصل‌های متوسط شده تا ۱ *MPa* (۱۴۵ *psi*) را نماینگر کنترل «خوب» تشخیص می‌دهند و تفاضل‌هایی تا ۲ *MPa* (۲۹۰ *psi*) را به عنوان کنترل «قابل قبول» می‌پذیرند (Day ۲۰۰۶). چون جفت تفاضل‌ها بیانگر دامنه‌ای از آزمایش‌های دو استوانه‌ای هستند، انحرافات استاندارد در این سطوح را می‌توان با تقسیم جفت تفاضل به ۱/۱۲۸، (از جدول ۱.۴)، برآورد نمود و به ترتیب به ۰/۸۸ *MPa* (۱۲۸ *psi*) و ۱/۷۷ *MPa* (۲۵۷ *psi*) رسید.

فصل پنجم

معیارها

۵. ۱ کلیات

در جهت سنجش مقاومت برای پذیرش قراردادی از استوانه‌های بتنی استفاده می‌شود که تحت شرایط بسیار کنترل‌شده، نمونه برداری شده (ASTM C172/C172M)، ساخته شده و عمل آمده (ASTM C31/C31M) و آزمایش (ASTM C39/C39M) می‌شود. به‌طور کلی، مقاومت‌های این استوانه‌ها، نشانه‌های اولیهٔ کیفیت بتن مصرفی در سازه هستند. مهندس مقاومت مورد نیاز، فراوانی آزمودن و تلرانس مجاز در مقاومت فشاری را مشخص می‌نماید (ACI 301).

هرگونه کمیتی می‌بایست با یک تلرانس بیان شود. حتی زمانی که کنترل خوبی صورت می‌گیرد، به‌دلیل تغییر تصادفی، ممکن است مقاومت‌های کمتری حاصل شود، از این رو، مشخص نمودن یک حداقل مقاومت مطلق، غیر عملی است.

صنعت بتن با استفاده از روش‌های احتمالاتی و تکنیک‌های کنترل کیفیت، روش‌شناسی‌هایی را توسعه داده است تا تعیین اندازه‌ای از تلرانسی آن را در مشخصات و آزمودن مقاومت بتن اعمال کند. فرضیه اساسی آن است که آزمایش‌های مقاومت بتن به‌صورت نرمال توزیع می‌شوند.

با پذیرش یک توزیع نرمال برای یک جمعیت از آزمایش‌های بتن، برای یک مقاومت متوسط داده شده، می‌توان درصدی از نتایج آزمایش‌ها که به زیر مقاومت مورد نیاز بتن f'_c و درصدی از آنها که بالای f'_c قرار می‌گیرند را انتظار داشت.

وقتی نمونه‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند، احتمال کمی وجود دارد که نتایج مقاومت کم (کمتر از حد مورد نیاز)، با بتن قرار گرفته در ناحیه بحرانی مطابقت داشته باشد. تبعات ناحیهٔ موضعی شده از بتن با مقاومت کم در یک سازه به عوامل زیادی بستگی دارد، که عبارتند از:

- احتمال اضافه بار زود هنگام؛
- موقعیت و اندازهٔ ناحیهٔ کم کیفیت در عضو سازه‌ای؛
- درجه اعتماد بر مقاومت در طراحی؛
- علت مقاومت کم؛
- دلالت‌ها، اقتصادی و غیر اقتصادی، از دست رفتن خدمت‌پذیری یا شکست سازه.

تعدادی از آزمایش‌ها به زیر f'_c قرار خواهند گرفت. ACI 318 و اکثر آیین نامه‌های ساختمانی و مشخصات دیگر، معیارهای پذیرش مبتنی بر آمار بتن را، برای مطابقت با معیار پذیرش f'_c ، برقرار می‌کنند (مشابه تلرانس‌هایی برای مواد ساختمانی دیگر).

برای اقناع الزامات عملکرد-مقاومت مبتنی بر آمار، حداقل مقاومت میانگین مورد نیاز نسبت اختلاط بتن، باید بیش از مقاومت مشخصهٔ آن باشد. f'_{cr} ، تابعی از تغییرپذیری نتایج آزمایش اندازه‌گیری شده به‌وسیله ضریب تغییرات یا انحراف استاندارد است و به نسبتی از آزمایش‌ها، f'_{cr} مجاز به قرار گیری زیر مقاومت مشخصه است.

۵. ۲ داده‌های مورد استفاده برای مقرر کردن حداقل مقاومت میانگین لازم

برای مقرر کردن مقاومت میانگین لازم f'_{cr} ، نیاز است تا برآوردی از تغییر پذیری بتنی که برای ساخت و ساز عرضه شود، به‌عمل آید. برای برآورد انحراف استاندارد یا ضریب تغییرات از سابقه آزمایش مقاومت استفاده می‌شود و این سابقه باید بیانگر یک گروه از حداقل ۳۰ آزمایش باشد. به منظور برآورد از تغییرپذیری، داده‌های مورد استفاده می‌بایست بیانگر بتن تولید شده برای رسیدن یک مقاومت مشخصه نزدیک با آن مشخصه‌ای باشد که برای کار مطرح می‌شود، باشند و در ترکیبات و محصول، مشابه باشند.

الزام برای ۳۰ آزمایش مقاومت متوالی می‌تواند به وسیلهٔ یک سابقه آزمایش از ۳۰ پیمانه از ردهٔ بتن یکسان، در محدودهٔ ۷ MPa (۱۰۰۰ psi) از f'_c مشخصه یا میانگین آماری از دو سابقه آزمایش با کلیت ۳۰ آزمایش یا بیشتر، رضایت بخش باشد. در مورد دوم، انحراف استاندارد ادغام شده را می‌توان با استفاده از معادله (۴-۳) محاسبه نمود.

وقتی تعداد نتایج آزمایشی که در دسترس است کمتر از ۳۰ آزمایش باشد، به یک رویکرد محافظه کارانه‌تری نیاز است. ACI 318، برای تخمین انحراف استاندارد، سوابق آزمایش کمتر از ۱۵ آزمایش را مجاز می‌دارد. با وجود این، مقدار انحراف استاندارد نمونه باید تا ۱۶ درصد افزایش یابد تا بتوان در انحراف استاندارد جمیعت برآورد شده، عدم قطعیت بیشتری برشمرد. در نتیجه به یک رویکرد محافظه‌کارانه نیاز است و بتن برای تولید مقاومت میانگین بالاتر از آنچه که نیاز خواهد بود، متناسب می‌شود؛ اگر نتایج آزمایش بیشتری در دسترس باشند و انحراف استاندارد به‌طور دقیق‌تری تعیین می‌شود. وقتی ۱۵ تا ۳۰ نتیجه آزمایش مقاومت وجود داشته باشند، انحراف استاندارد محاسبه شده باید با ضریب اصلاح حاصل شده از جدول (۱.۵) ضرب شود تا برآوردها برای برشمردن عدم قطعیت در انحراف استاندارد محاسبه شده، به اندازه کافی محافظه‌کارانه شوند. این روش‌شناسی از فصل ۵، ACI 318 اتخاذ می‌شود.

وقتی نتایج آزمایش مقاومت کمتر از ۱۵ نتیجه باشد، انحراف استاندارد محاسبه شده به اندازه کافی قابل اعتماد نیست. در این موارد، بتن با استفاده از جدول (۲.۵) متناسب می‌شود؛ که در آن می‌توان مقاومت‌های مورد نیاز بالاتری از آنهایی که از یک انحراف استاندارد مقرر محاسبه می‌شوند، انتظار داشت.

وقتی یک پروژه پیشرفت نمود و آزمایش‌های مقاومت بیشتری در دسترس قرار می‌گیرد، تمامی آزمایش‌های مقاومت در دسترس می‌بایست در جهت حصول قابل اطمینان ترین برآورد انحراف استاندارد برای بتن در حال استفاده در آن پروژه، مورد تحلیل قرار گیرند. بنابراین، می‌توان مقدار f'_{cr} تجدید نظر شده را که به‌طور نوعی کمتر از مقدار اصلی آن است، محاسبه کرد و از آن استفاده نمود.

۳.۵ معیارهای الزامات مقاومت

چندین معیار وجود دارند که می‌توان از آنها در جهت اطمینان از مطابقت عملکرد بتن با الزامات خاص استفاده نمود. در ساده ترین شکل، به این ترتیب که با ملتزم دانستن مقاومت میانگین لازم f'_{cr} در جهت برابری یا تجاوز از مقاومت مشخصه f'_c از طریق یک مضرب که برای نشان دادن درصدی از آزمایش‌های مجاز برای معیوب بودن انتخاب شده، از تغییر مقاومتی که در محلی از جدول (۳.۵) یافت می‌شود، صورت می‌پذیرد:

$$f'_{cr} = f'_c + zs \qquad \text{(رجوع به معادله (۵-۳b))}$$

در بخش ۱.۳.۵، بحث مفصلی از معیار مورد نیاز برای بکارگیری کامل این جدول، از طریق مثال‌هایی با استفاده از معادلات آن، ارائه می‌شود.

وقتی مضرب اعمال شده به تغییر مقاومت، افزایش می‌یابد، احتمال آن کمتر می‌شود که آزمایش مقاومت انفرادی، از f'_c فراتر رود. این در شکل (۱.۵) نشان داده شده است که برای یک مقاومت مشخصه معین، وقتی ضریب تغییرات بالا می‌رود، مقاومت میانگین لازم بیش طراحی به عنوان متغیر، افزایش می‌یابد.

تمامی معادلات نیاز به یک ضریب قابلیت اعتماد مقدار **Z** دارند، این ضریب برای آن انتخاب می‌شوند که یک احتمال به اندازهٔ کافی بالا فراهم شود تا f'_c برابر یا بزرگتر شود. برای بتن‌های دارای یک توزیع نرمال از نتایج آزمایش مقاومت، مقدار **Z** را می‌تواند از جدول (۴.۵) اخذ نمود. برای یک مجموعه معین از نتایج آزمایش مقاومت، فارغ از آنکه از معادلهٔ ضریب تغییرات یا از معادلهٔ انحراف استاندارد استفاده شود، مقدار محاسبه شدهٔ f'_{cr} یکسان خواهد بود.

جدول ۵. ۱ ضرایب اصلاح برای انحراف استاندارد*

ضرایب اصلاح	تعداد آزمایش‌ها
رجوع به جدول ۲.۵	کمتر از ۱۵
۱٫۱۶	۲۰
۱٫۰۸	۲۵
۱٫۰۳	۲۵
۱٫۰۰	بیش از ۳۰

* جدول ۲.۱.۳.۵ از ACI 318

جدول ۵. ۲ حداقل مقاومت میانگین لازم، بدون داده‌های تاریخی کافی*

مقاومت فشاری مشخصه	مقاومت فشاری میانگین لازم
وقتی $f'_c < 21\,MPa$ ($f'_c < 3000\,psi$)	$f'_{cr} = f'_c + 7\,MPa$ ($f'_{cr} = f'_c + 1000 psi$)
وقتی $f'_c \le 35 MPa$ و $f'_c \ge 21\,MPa$ ($f'_c \le 5000\,psi$ و $f'_c \ge 3000 psi$)	$f'_{cr} = f'_c + 8\,MPa$ ($f'_{cr} = f'_c + 1200\,psi$)
وقتی $f'_c > 35 MPa$ ($5000 psi$)	$f'_{cr} = 1{,}10 f'_c + 5\,MPa$ ($f'_{cr} = 1{,}10 f'_c + 700\,psi$)

* جدول ۲.۲.۳.۵ از ACI 318

جدول ۵. ۳ معادلات تعیین حداقل مقاومت میانگین لازم.

	ضابطه ۱	ضابطه ۲	ضابطه ۳*	ضابطه ۴♣
	حداکثر درصد از آزمایشات انفرادی f_c' >	حداکثر درصد دامنه حرکت از n آزمایشات متوالی f_c' >	حداکثر درصد از آزمایشات انفرادی $(f_c'-k)$ >	حداکثر درصد از آزمایشات انفرادی > $(k\%\ of\ f_c')$
فرمول ضریب تغییرات	$f'_{cr}=f'_c/(1-zV)$ (۱a-۵)	$f'_{cr}=f'_c/(1-zV/\sqrt{n})$ (۲a-۵)	$f'_{cr}=(f'_c-k)/(1-zV)$ (۳a-۵)	$f'_{cr}=k\,f'_c/(1-zV)$ (۴a-۵)
فرمول انحراف استاندارد	$f'_{cr}=f'_c+zs$ (۱b-۵)	$f'_{cr}=f'_c+(zs/\sqrt{n})$ (۲b-۵)	$f'_{cr}=(f'_c-k)+zs$ (۳b-۵)	$f'_{cr}=k\,f'_c+zs$ (۴b-۵)

* ضابطه ۳ برای $f'_c \le 35\,MPa\,(5000psi)$ است.

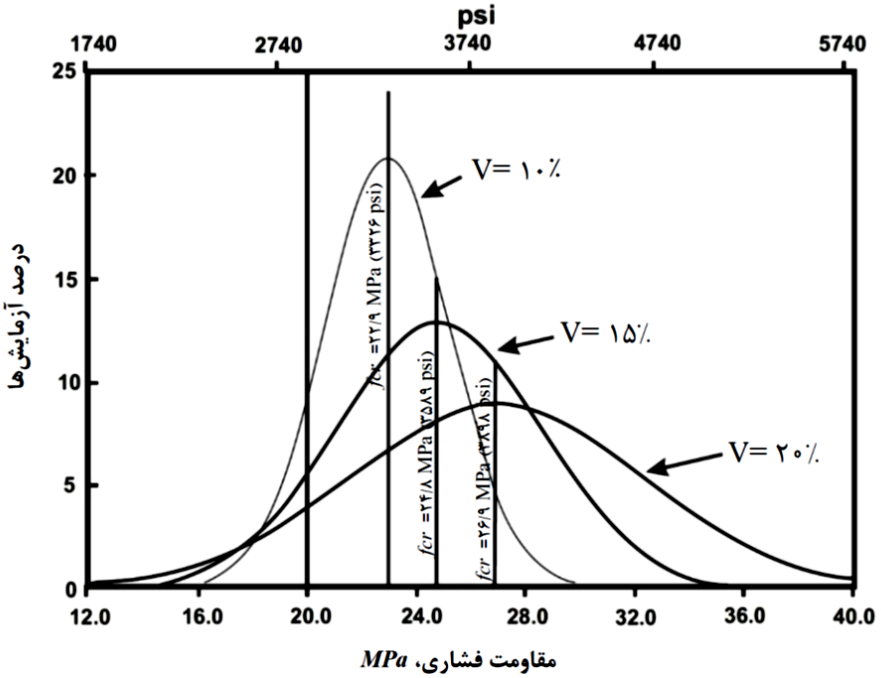
♣ ضابطه ۴ برای $f'_c > 35\,MPa\,(5000psi)$ است.

حداقل مقدار f'_{cr} را می‌توان بـا استفاده از جدول (۲.۵) و یا با بکار گیری معادلات (۵-۱) تا (۵-۴)، آنگونه که درخور معیارهای ذکر شده جدول (۳-۵) می‌باشد، محاسبه نمود.

وقتی مشخصات مستلزم تلفیقی از تعداد میانگینی از آزمایش‌ها است (مثل میانگین سه آزمایش‌های متوالی)، انحراف استاندارد یا ضریب تغییرات چنین میانگینی کمتر از آن مقداری خواهد بود که با استفاده از تمامی نتایج آزمایش انفرادی محاسبه می‌شود (بخش ۱.۲.۳.۵). انحراف استاندارد از یک میانگین محاسبه می‌شود که از طریق تقسیم انحراف استاندارد (بخش ۲.۲.۳.۵) از نتایج آزمایش انفرادی، بر مجذور تعداد آزمایش‌ها (n) در هر میانگین، حاصل می‌شود [به شکل معادله (۲-۵) در جدول (۳.۵)].

مقدار n، به‌طور نوعی ۳ مشخص می‌شود. این مقدار نباید با تعداد نتایج آزمایش مقاومت مورد استفاده برای برآورد متوسط یا انحراف استاندارد از سابقه، اشتباه گرفته شود. جدول (۴.۵)، مقادیری از z را برای درصدهای مختلف قرارگیری آزمایش‌ها در بین متوسط $\pm$ Zσ و احتمال اینکه یک آزمایش به زیر متوسط منهای Zσ قرار بگیرد را ارائه می‌نماید. در بخش ۲.۳.۵ مثال‌هایی ارائه می‌شوند.

مقداری که به وسیلهٔ آن، f'_{cr} فراتر از f'_c می‌رود، به معیار پذیرش مشخص‌شده برای پروژه خاص، بستگی دارد. مثال‌های زیر نشان می‌دهند که چگونه ممکن است از معیارهای مختلف، در جهت تعیین f'_{cr} برای مشخصات یا اجزای مشخصات مختلف، استفاده شود. مثال‌های عددی، در هر دو واحد SI و اینچ-پوند در یک شکل موازی که به سختی تبدیل شده اند، ارائه می‌شوند؛ از این رو، آنها مقادیری را منعکس می‌کنند که به‌طور معمول و متداول در سیستم واحد مربوطه استفاده می‌شوند. ACI 318 شامل تغییرات این معادلات می‌شود



شکل ۵. ۱ منحنی‌های فراوانی نرمال برای ضرایب تغییرات ۱۰، ۱۵ و ٪۲۰.

جدول ۵. ۴ احتمالات مرتبط با مقادیر z

z	احتمال قرارگیری به زیر $f'_c - z\sigma$	درصد آزمایش‌ها در محدودهٔ $\pm z\sigma$
۰/۵۲	٪۳۰ (۳ در ۱۰)	۴۰
۰/۶۷	٪۲۵ (۲/۵ در ۱۰)	۵۰
۰/۸۴	٪۲۰ (۲ در ۱۰)	۶۰
۱/۰۰	٪۱۵/۹ (۱ در ۶/۳)	۶۸/۲۷
۱/۰۴	٪۱۵ (۱/۵ در ۱۰)	۷۰
۱/۲۸*	٪۱۰* (۱ در ۱۰)	۸۰*
۱/۶۵	٪۵ (۱ در ۲۰)	۹۰
۱/۹۶	٪۲/۵ (۱ در ۴۰)	۹۵
۲/۰۰	٪۲/۳ (۱ در ۴۴)	۹۵/۴۵
۲/۳۳*	٪۱* (۱ در ۱۰۰)	۹۸*
۲/۵۸	٪۰/۵ (۱ در ۲۰۰)	۹۹
۳/۰۰	٪۰/۱۳ (۱ در ۷۴۱)	۹۹/۷۳

* مقادیری که به‌طور معمول استفاده می‌شوند.

۵. ۱.۳ ضابطه شماره ۱

مهندس ممکن است حداکثر درصدی از نتایج آزمایش مقاومت انفرادی و تصادفی مجاز به قرارگیری به زیر f'_c را تعیین نماید. این شکلی از مشخصات متعدد بین‌المللی است که در آن گرایش به استفاده از ضریب قابلیت اعتماد ۱/۶۵ وجود دارد و تنها دلالتی بـر پذیرش یک میزان شکست ۵٪ می‌باشد. این ضابطه در ACI 318 آنچنان استفاده نمی‌شود، امّا ممکن است در مواقعی از آن استفاده شود که متوسط مقاومت، یک بخش اصلی روش شناسی طراحی باشد، (مثلاً در برخی مشخصات روسازی‌ها). یک الزام نوعی اجازه نمی‌دهد بیشتر از ۱۰% آزمایـش‌های مقاومت به زیر f'_c قرار گیرد. به‌طور کلی در چنین شرایطی، مقاومت مشخصه از ۲۱ تا ۳۵ *MPa* (۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ *psi*) متغیر است.

۵. ۱.۱.۳ روش ضریب تغییرات

فرض کنید داده‌های کافی بـرای اینکه یک ضریب تغییرات ۱۰/۵٪ برای یک مخلـوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*) محاسبه شود، وجود داشته باشد. از جدول (۴.۵)، ۱۰% از توزیع احتمال نرمال، بیش از ۱/۲۸ انحراف استاندارد به زیر متوسط است. با استفاده از معادله (۵-1a) از جدول (۳.۵):

$$f'_{cr} = f'_c / (1 - zV)$$
$$f'_{cr} = 28 / (1 - 1{,}28 \times 0{,}105) = 32{,}3\ MPa$$
$$[\, f'_{cr} = 4000 / (1 - 1{,}28 \times 0{,}105) = 4620\ psi \,]$$

بنابراین، برای یک f'_c برابر با ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*)، به‌طوریکه به‌صورت میانگین، بیش از ۱۰% نتایج به زیر f'_c قرار نگیرد، مقاومت میانگین نسبت مخلوط بتن، بیش از ۳۲/۳ *MPa* (۴۶۲۰ *psi*) نیست.

۵. ۲.۱.۳ روش انحراف استاندارد

فرض کنید داده‌های کافی بـرای اینکه یک انحراف استاندارد ۳/۵۸ *MPa* (۵۱۹ *psi*)، برای یک مخلوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*) محاسبه شود، وجود داشته باشد. مطابق جدول (۴.۵)، ۱۰% از توزیع احتمال نرمال، بیش از ۱/۲۸ انحرافات از استاندارد به زیر متوسط است. با استفاده از معادله (۵-1b) از جدول (۳.۵):

$$f'_{cr} = f'_c + zs$$
$$f'_{cr} = 28 MPa + 1{,}28 \times (3{,}58)\ MPa = 32{,}6\ MPa$$
$$[\, f'_{cr} = 4000 + 1{,}28 \times 519\ psi = 4660\ psi \,]$$

به منظور تولید یک مخلوط بتنی با f'_c ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*)، که به‌طور میانگین، انتظار می‌رود ۱۰% از نتایج آزمایش آن به زیر f'_c قرار گیرد، می‌بایست با یک مقاومت میانگین که کمتر از ۳۲/۶ *MPa* (۴۶۶۰ *psi*) نیست، متناسب شود.

۵. ۲.۳ ضابطه شماره ۲

مهندس می‌تواند احتمال اینکه میانگین n آزمایش مقاومت متوالی، بـه زیر f'_c قرار گیرد را تعیین کند. به عنوان مثال ACI 318 (بخش ۳.۳.۶.۵) تصریح می‌کند که میانگین هر سه نتایج آزمایش مقاومت متوالی باید برابر یا بیش از f'_c باشد. f'_{cr} باید بگونه‌ای مقرر شود که شکست در رسیدن به مقدار f'_c ، بیش از ۱ در ۱۰۰ (۰/۰۱)، پیش بینی نشود.

۵. ۱.۲.۳ روش ضریب تغییرات

فرض کنید داده‌های کافی برای اینکه یک ضریب تغییرات ۱۰/۵% برای یک مخلوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*) محاسبه شود، وجود داشته باشد. از جدول (۴.۵)، ۱٪ از توزیع احتمال نرمال، بیش از ۲/۳۳ انحرافات از استاندارد به زیر متوسط است. با استفاده از معادله (۵-۲a) از جدول (۳.۵):

$$f'_{cr} = f'_c / [1-(zV/\sqrt{n})]$$

$$f'_{cr} = 28MPa / [1-(2{,}33\times 10{,}5/100/\sqrt{3})] = 32{,}6\ MPa$$

$$[f'_{cr} = 4000psi / [1-(2{,}33\times 0{,}105/\sqrt{3})] = 4660\ psi]$$

بنابراین، برای یک مخلوط با f'_c ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*)، به‌طوریکه به‌صورت میانگین، بیش از ۱٪ از میانگین متحرک سه نتایج آزمایش مقاومت متوالی، به زیر f'_c قرار نگیرد، مقاومت میانگین نسبت مخلوط بتن، کمتر از ۳۲/۴ *MPa* (۴۶۳۰ *psi*) نیست.

۵. ۲.۲.۳ روش انحراف استاندارد

فرض کنید داده‌های کافی برای اینکه یک انحراف استاندارد ۳/۵۸ *MPa* (۵۱۹ *psi*)، برای یک مخلوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*) محاسبه شود، وجود داشته باشد. از جدول (۴.۵)، ۱٪ از توزیع احتمال نرمال، بیش از ۲/۳۳ انحرافات از استاندارد به زیر متوسط است. با استفاده از معادله (۵-۲b) از جدول (۳.۵):

$$f'_{cr} = f'_c + zs/\sqrt{n}$$

$$f'_{cr} = 28MPa + [(2{,}33\times 3{,}58MPa)/\sqrt{3}] = 32{,}8\ MPa$$

$$[f'_{cr} = 4000psi + [(2{,}33\times 519\,psi)/\sqrt{3}] = 4700\ psi]$$

بنابراین، برای یک f'_c ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*)، به‌طوریکه به‌صورت میانگین بیش از ۱٪ از میانگین متحرک سه نتایج آزمایش مقاومت متوالی، به زیر f'_c قرار نگیرد. مقاومت میانگین نسبت مخلوط بتن، کمتر از ۳۲/۴ *MPa* (۴۶۳۰ *psi*) نیست.

معادله (۵-۲b) از جدول (۳.۵)، در شکل متفاوتی از معادلهٔ (۱.۵) جدول ۱.۲.۳.۵ در ACI 318، ارائه می‌شود. مقدار ۱/۳۴ در ACI 318، به‌دلیل اینکه z و n از قبل مشخص می‌شود، معادل با $z\sqrt{n} = 2{,}33\sqrt{3} = 1{,}34$ است.

SAMEN BETON

۵. ۳.۳ ضابطه‌های شماره ۳ و ۴

مهندس ممکن است احتمال معینی که یک نتیجه آزمایش مقاومت انفرادی تصادفی، بیش از یک مقدار معین از f'_c کمتر نباشد را مشخص نماید. به عنوان مثال، ضابطه شماره ۳ در ACI 318 از طریق مقرر داشتن اینکه هیچ یک از نتایج آزمایش مقاومت انفرادی، بیش از ۳/۵ MPa (۵۰۰ psi) به زیر f'_c قرار نگیرد، استفاده می‌شود. معیار یا ضابطه شماره ۴ که برای بتن با $f'_c > 35MPa$ (5000 psi) ، یک جایگزین مناسب است، این ضابطه، ایجاب می‌کند که هیچ نتیجه آزمایش انفرادی به زیر ۹۰% مقاومت مشخصه قرار نگیرد. این دو معیار در مقاومت مشخصه ۳۵ MPa (۵۰۰۰ psi) معادل هستند. در هر دو مورد، حداقل مقدار f'_{cr} بگونه‌ای بنا می‌شود که یک آزمایش تصادفی انفرادی نامنطبق، اغلب بیش از ۱ در ۱۰۰، پیش بینی نشود.

۵. ۱.۳.۳ روش ضریب تغییرات، ($f'_c \le 35MPa$ (5000 psi))

فرض کنید داده‌های کافی برای اینکه یک ضریب تغییرات ۱۰/۵٪ برای یک مخلوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۲۸ MPa (۴۰۰۰ psi) محاسبه شود، وجود داشته باشد. از جدول (۴.۵)، ۱٪ از توزیع احتمال نرمال، بیش از ۲/۳۳ انحرافات از استاندارد به زیر متوسط است. با استفاده از معادله (۵-۳a) از جدول (۳.۵) و تنظیم k برابر با ۳/۵ MPa (۵۰۰ psi)، خواهیم داشت:

$$f'_{cr} = (f'_c - k) / (1 - zV)$$

$$f'_{cr} = (28MPa - 3{,}5MPa) / [1 - (2{,}33 \times 10{,}5/100)] = 32{,}4MPa$$

$$[f'_{cr} = (4000\ psi - 500\ psi) / [1 - (2{,}33 \times 0{,}105)] = 4630 psi]$$

بنابراین، برای یک f'_c ۲۸ MPa (۴۰۰۰ psi)، به‌طوریکه به‌صورت میانگین بیش از ۱٪ از نتایج آزمایش مقاومت انفرادی، بیش از ۳/۵ MPa (۵۰۰ psi) به زیر f'_c قرار نگیرد، مقاومت میانگین نسبت مخلوط بتن کمتر از ۳۲/۴ MPa (۴۶۳۰ psi) نیست.

۵. ۲.۳.۳ روش انحراف استاندارد، ($f'_c \le 35MPa$ (5000 psi))

فرض کنید داده‌های کافی برای اینکه انحراف استاندارد ۳/۵۸ MPa (۵۱۹ psi) برای یک مخلوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۲۸ MPa (۴۰۰ psi) محاسبه شود، وجود داشته باشد. از جدول (۴.۵)، ۱٪ از توزیع احتمال نرمال، بیش از ۲/۳۳ انحرافات از استاندارد به زیر متوسط است. با استفاده از معادله (۵-۳b) از جدول (۳.۵) و با تنظیم k برابر با ۳/۵ MPa (۵۰۰ psi)، خواهیم داشت:

$$f'_{cr} = (f'_c - k) + zs$$

$$f'_{cr} = (28MPa - 3{,}5MPa) + (2{,}33 \times 3{,}58MPa) = 32{,}8\ MPa$$

$$[f'_{cr} = (4000psi - 500psi) + (2{,}33 \times 519\ psi) = 4710\ psi]$$

بنابراین، برای یک مقاومت فشاری مشخصهٔ ۲۸ *MPa* (۴۰۰۰ *psi*)، به‌طوریکه به‌صورت میانگین بیش از ۱٪ نتایج آزمایش مقاومت انفرادی، بیش از ۳٫۵ *MPa* (۵۰۰ *psi*) به زیر f'_c قرار نگیرد، مقاومت میانگین نسبت مخلوط بتنی، کمتر از ۳۲٫۸ *MPa* (۴۷۱۰ *psi*) نیست.

۳.۳.۵ روش ضریب تغییرات، ($f'_c >$ ۳۵ ***Mpa*** (۵۰۰۰ ***psi***)

فرض کنید داده‌های کافی برای اینکه ضریب تغییرات ۸٫۲٪ برای یک مخلوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۶۲ *MPa* (۹۰۰۰ *psi*) محاسبه شود، وجود داشته باشد، از جدول (۴.۵)، ۱٪ از توزیع احتمال نرمال، بیش از ۲٫۳۳ انحرافات از استاندارد به زیر متوسط است. با استفاده از معادله (۴a-۵) از جدول (۳.۵) و با تنظیم k برابر با ۰٫۹۰، خواهیم داشت:

$$f'_{cr} = 0{,}90 \times f'_c / (1 - zV)$$

$$f'_{cr} = (0{,}90 \times 62MPa) / [1 - (2{,}33 \times 8{,}2/100)] = 69MPa$$

$$[f'_{cr} = (0{,}90 \times 9000\ psi) / [1 - (2{,}33 \times 0{,}082)] = 10010\ psi]$$

بنابراین برای یک f'_c ۶۲ *MPa* (۹۰۰۰ *psi*)، به‌طوریکه به‌صورت میانگین، بیش از ۱٪ نتایج آزمایش مقاومت انفرادی به زیر ۹۰٪ مقاومت مشخصه قرار نگیرد، مقاومت میانگین نسبت مخلوط بتن، کمتر از ۶۹ *MPa* (۱۰۰۱۰ *psi*) نیست.

۴.۳.۵ روش انحراف استاندارد، ($f'_c >$ ۳۵ ***MPa*** (۵۰۰۰ **psi**)

فرض کنید انحراف استاندارد ۵٫۶۱ *MPa* (۸۱۴ *psi*) برای یک مخلوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۶۲ *MPa* (۹۰۰۰ *psi*) محاسبه شده باشد. از جدول (۴.۵)، ۱٪ از توزیع احتمال نرمال، بیش از ۲٫۳۳ انحرافات از استاندارد به زیر متوسط است. با استفاده از معادله (۴-۵b) از جدول (۳.۵) و با تنظیم k برابر با ۰٫۹۰، خواهیم داشت:

$$f'_{cr} = 0/90 \times f'_c + zs$$

$$f'_{cr} = (0{,}90 \times 62MPa) + (2{,}33 \times 5{,}61\,MPa) = 68{,}9MPa$$

$$[f'_{cr} = (0{,}90 \times 9000\ psi) + (2{,}33 \times 814\ psi) = 10000\ psi]$$

بنابراین، برای یک مقاومت مشخصهٔ ۶۲ *MPa* (۹۰۰۰ *psi*)، به‌طوریکه به‌صورت میانگین، بیشتر از ۱٪ نتایج آزمایش مقاومت انفرادی به زیر ۹۰٪ مقاومت مشخصه قرار نگیرد، مقاومت میانگین نسبت مخلوط بتن، کمتر از ۶۸٫۹ *MPa* (۱۰۰۰۰ *psi*) نیست.

۴.۳.۵ معیار چندگانه

در بسیاری از نمونه‌ها، معیار چندگانه مشخص می‌شود. ACI 318 ایجاب می‌کند که مقاومت‌های بتن مطابق با هر دو معیارهای آزمایش انفرادی و میانگین متحرک از سه معیار آزمایش، باشد. از آنجایی که هر دو معیار تأثیرگذار هستند، f'_{cr} لازم باید برابر یا بیشتر از تمامی الزامات باشد؛ بدین معنی که f'_{cr} می‌بایست بالاترین مقاومت محاسبه شده با استفاده از تمامی معیار های مربوطه باشد. به عنوان مثال، فرض کنید داده‌های کافی برای اینکه یک ضریب تغییرات ۸٫۲٪ برای یک مخلوط بتنی با مقاومت مشخصهٔ ۶۰ *MPa*

(psi ۸۷۰۰)، محاسبه شود، وجود داشته باشد. برای این مخلوط بتنی، مقاومت میانگین لازم می‌بایست هر دوی این معیارها را اقناع نماید:

۱. ضابطه مقاومت انفرادی (۴.۳.۳.۵):

$$f'_{cr} = 0{/}90 \times f'_c / (1 - 2{/}33V) = 66{/}8\ MPa\ (9690\ psi)$$

۲. ضابطه میانگین متحرک از سه آزمایش مقاومت (۲.۲.۳.۵):

$$f'_{cr} = f'_c / (1 - 2{/}33V / \sqrt{3}) = 67{/}4\ MPa\ (9780\ psi)$$

ضابطه میانگین متحرک، معیار تعیین‌کننده است، چون آن بزرگ‌ترین f'_{cr} را تولید می‌کند، به این معنا که $67{/}4MPa > 66{/}8MPa$ $(9780psi > 9690psi)$ است و f'_{cr} می‌بایست مقاومت بزرگتر محاسبه شده از دو معیار باشد.

فصل ششم

ارزیابی از داده‌ها

۶. ۱ کلیات

در بسیاری از موقعیت‌ها، ارزیابی از داده های مقاومت یک امر ضروری است. به‌طور معمول سه برنامه مورد نیاز است، که عبارتند از:

۱. ارزیابی برای مقاصد مرسولات اختلاط؛

۲. ارزیابی از سطح کنترل؛

۳. ارزیابی در جهت تعیین انطباق با مشخصات.

این ارزیابی‌ها، در جهت تشخیص انحرافات از مقادیر هدف مطلوب و هر کجا که ممکن است با کمک فرمول‌بندی، یک پاسخ مناسب فراهم شود، حائز اهمیت هستند. در همهٔ موارد، میزان سودمندی ارزیابی، تابعی از میزان داده‌های آزمایش و دقت آماری از تحلیل است. برنامه‌ها برای کنترل کیفیت و انطباقات روزمره، به‌طور قابل توجهی با یکدیگر همپوشانی دارند. بسیاری از تکنیک‌ها یا ابزارهای ارزیابی که در یک برنامه استفاده می‌شوند، برای مصارف دیگر نیز مناسب هستند.

در فصل ۵، تکنیک‌های مناسب برای ارزیابی از مرسوله اختلاط، مرور شد، در این فصل، تکنیک‌هایی برای برنامه‌های کنترل کیفیت و انطباقات روزمره مورد بحث قرار می‌گیرند. همچنین، در رابطه با معیارها و ملاک‌های مردود سازی نتایج مشکوک، تعیین فراوانی آزمودن و راهنمون‌هایی برای شیوه‌های آزمایش دیگر نیز بحث می‌شود.

هنگامی که در اغلب موارد، یک احتمال ۱٪ وجود دارد که یک آزمایش، بیش از ۳/۵ *MPa* (۵۰۰ *psi*)، از f'_c کمتر باشد و یک احتمال ۱٪ وجود داشته باشد که میانگین متحرک سه آزمایش متوالی از f'_c کمتر شود، تعیین درست-نمایی از نتایج مختلف، سودمند است. ممکن است با استفاده از معادله (۶-۱)، حداکثر احتمالی که حداقل یک پیشامد در n آزمایش‌های مستقل رخ خواهد داد را برآورد نمود (Leming، ۱۹۹۹).

$$\Pr\{\text{حداقل ۱ پیشامد} \mid \text{n آزمایش}\} = ۱-(۱-p)^n$$

که در آن، p احتمال وقوع یک پیشامد منفرد است.

به هنگام ارزیابی از آزمایش‌های بتن، p احتمال پیشامد منفرد عدم انطباق با معیار مقاومت در ACI 318 است. به دلیل اینکه p شامل هر دو موارد محتمل: بیش از ۳/۵ *MPa* (۵۰۰ *psi*) کمتر از مقاومت مشخصه و میانگین متحرک سه آزمایش متوالی کمتر از مقاومت مشخصه است، p بین ۱٫۰% و ۲٫۰% قرار می‌گیرد. بدون جزییات بیشتر، برای اقناع معیار مقاومت ACI 318، احتمال شکست یک آزمایش منفرد را برابر با ۱٫۵٪ در نظر بگیرید. جدول (۱.۶)، احتمالاتی از حداقل وقوع یک رخداد از یک نتیجه نامنطبق داده شده از تعداد مختلف n آزمایش‌های مستقل را ارائه می‌کند، هنگامی که احتمال پیشامد منفرد p با ۱٫۵٪ (یک آزمایش معیار مقاومت ACI 318 برآورده نمی‌کند) و ۱۰% (یک آزمایش که به زیر f'_c قرار می‌گیرد) برابر است.

احتمال عدم انطباق حتی برای پروژه‌های نسبتاً کوچک، ناچیز و کم اهمیت نیست. به عنوان مثال، تقریباً ۱۰% احتمال دارد که حداقل یک آزمایش نامنطبق به مقدار ۳/۵ *MPa* (۵۰۰ *psi*) به زیر f'_c قرار گیرد و بیش از ۵۰% احتمال دارد که حداقل یک آزمایش، برای پروژه‌ای با تنها هفت آزمایش، به زیر f'_c قرار گیرد. احتمال زیادی وجود دارد که چنین رویدادی در اکثر پروژه‌ها رخ دهد و در اکثر پروژه‌های بزرگ، حتی اگر تغییر، منحصراً بخاطر اثرات تصادفی باشد و حداقل مقاومت میانگین با استفاده از روش‌های آماری معتبر تعیین شده باشد، تقریباً قطعیت دارد. برای پروژه‌های بزرگتر بخاطر تأثیرات عوامل مداخله‌گر، احتمال‌ها مقداری کاهش می‌یابد؛ با وجود این احتمالات کماکان محسوس هستند (Leming، ۱۹۹۹).

۶. ۲ تعداد آزمایش‌ها

برای یک پروژه خاص، آزمایش‌ها باید به تعداد کافی صورت پذیرد تا اطمینان از نمایندگی و نیابت دقیق بتن حاصل شود؛ ACI 318 یک آزمایش مقاومت را به عنوان میانگین مقاومت دو یا چند آزمونه با سن یکسان که به وسیلهٔ یک نمونهٔ اخذ شده از یک پیمانهٔ منفرد بتن، ساخته می‌شود، تعریف می‌نماید. فراوانی آزمایش را می‌توان بر اساس زمان سپری شده یا حجم ریخته شده مقرر نمود. مهندس باید تعداد آزمایش‌های لازم را بر اساس شرایط کاری پایه‌ریزی کند.

پروژه‌ای که در آن یک مهندس بر تمامی عملیات بتن نظارت داشته باشـد، فرصتی عالی برای کنترل و برآورد دقیق از متوسط و انحراف استاندارد با کمترین آزمایش را فراهم می‌سازد. زمانی که عملیات بطور ملایم پیش می‌رود، بسته به حجم بتن تولید شده، گرفتن آزمایش‌های هر روزه یا شیفتی می‌تواند برای دست‌یابی به داده‌هایی که بیانگر تغییراتی از بتن تحویلی هستند، کافی باشد. مهندس می‌تواند تعداد آزمایش‌های لازم را از طریق مشخصات پروژه که سطح کنترلی از تولیدکننده، آزمایشگاه و پیمانکار را مقرر می‌نماید، کاهش دهد. برای اجتناب از انحراف، تمامی نمونه‌برداری‌ها برای پذیرش آزمایش، باید به وسیلهٔ انتخاب تصادفی پیمانه‌های بتن صورت گیرند.

جدول ۶. ۱ احتمال حداقل یک رویداد در n آزمایش برای انتخاب احتمالات پیشامد منفرد

n	احتمال وقوع پیشامد منفرد = ۱/۵٪	احتمال وقوع پیشامد منفرد = ۱۰٪
۱	۱/۵٪	۱۰/۰٪
۵	۷/۳٪	۴۱/۰٪
۷	۱۰/۰٪	۵۴/۳٪
۱۰	۱۴/۰٪	۶۵/۱٪
۲۰	۲۶/۱٪	۸۷/۸٪
۵۰	۵۳/۰٪	۹۹/۵٪
۱۰۰	۷۷/۹٪	تقریباً ۱۰۰٪

ACI 318 برای ساخت و سازهای روزمرهٔ ساختمانی، در هر روز حداقل یک آزمایش را الزام می‌دارد. می‌بایست یک آزمایش برای هر $115\ m^3$ ($150\ yd^2$) بتن ریخته شده یا یک آزمایش برای هر $460 m^2$ ($5000 ft^2$) از مساحت سطح دال‌ها و دیوارها انجام شود؛ امّا ACI 318 به مهندس این امکان را می‌دهد تا از آزمایش بر روی مقادیر کمتر از $40 m^3$ ($50 yd^3$) چشم‌پوشی کند. فراوانی آزمایش باید متناسب با هر معیار باشد و آن را برآورده سازد. به‌طور کلی، این فراوانی‌های آزمایشات منجر به آزمودن بتن در یکی از ۱۰ تا ۲۰ کامیون خروجی می‌شود. آزمایش با فراوانی بیشتر از ایـن، می تواند روند ساخت و ساز را کند نماید.

آزمودن هر یک از بارهای بتن تحویل داده شده برای مقاومت بالقوه، به ندرت لازم می‌شود. برای اعضایی که عملکرد سازه‌ای آنها به مقاومت فشاری حساس است، ممکن است یک بار آزمایش از هر $80 m^3$ ($100 yd^3$) بتن، مناسب باشد. یک بار آزمایش برای هر $40 m^3$ ($50 yd^3$) بتن، فقط برای مهمترین کاربری‌ها مناسب خواهد بود. آزمایش‌های پر تکرار، فقط باید بنا به دلایل قانع کننده، مانند کاربری‌های ویژه یا عضو مهم مشخص شوند.

هر ردهٔ مختلف از بتن که در طی هر روز، ریخته می‌شود، به وسیلهٔ حداقل یک آزمایش بررسی شود. در یک پروژه معین، حداقل باید ۵ آزمایش برای هر ردهٔ بتن صورت پذیرد. برای دریافت اطلاعات بیشتر از الزامات آزمودن روزمره، به ACI 301، ACI 318 و ASTM C94/C94M مراجعه کنید.

۶. ۳ عدم پذیرش نمونه‌های مشکوک

مردود سازی دلخواهانه نتایج آزمایش مقاومت که بسیار خارج از محدوده ظاهر می‌شود، توصیه نمی‌شود، چونکه توزیع نرمال چنین نتایجی را پیش‌بینی می‌کند. صرف نظر کردن بی ملاحظه از نتایج آزمایش، می‌تواند به‌طور جدی توزیع مقاومت را دچار انحراف کند و تحلیل نتایج را غیر قابل اعتماد کند. گاهی، مقاومت یک استوانه که متعلق به یک گروه ساخته شده از یک نمونه می‌باشد، چنان از دیگر مقاومت‌ها منحرف می‌شود که بسیار بعید است. اگر در حین ساخت، عمل‌آوری یا آزمایش از یک آزمونه، تغییرات سوال بر انگیزی مشاهده شود، بر اساس آن می‌بایست آزمونهٔ استوانه‌ای منفرد مردود شود.

ASTM E178 ضوابطی را در جهت مردود سازی نتیجه آزمایش یک آزمونه در یک مجموعه از آزمونه‌ها، ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، می‌توان از نتیجهٔ یک آزمونهٔ منفرد در مجموعه‌ای از سه آزمونه و یا بیشتر، صرف نظر نمود، اگر انحراف آن از یک متوسط آزمایش، تا سه برابر انحراف استاندارد حدود پیمانه که پیش تر مقرر گردید است (فصل ۴)، بیشتر باشد. اگر انحراف آن، بیش از دو برابر انحراف استاندارد حدود پیمانه است، نتیجه می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. متوسط یا میانگین آزمایش، باید از آزمونه‌های باقی مانده محاسبه شود. یک آزمایش، به معنی میانگین تمامی آزمونه‌هایی از یک نمونه منفرد مورد آزمایش در سن یکسان است که نباید رد شوند، مگر اینکه احتمال معیوب بودن آزمونه‌ها وجود داشته باشد. این آزمایش، بهترین برآورد ممکن را برای مقاومت نمونه، نشان می‌دهد.

۶. ۴ دیگر الزامات آزمایش

به‌طور معمول، پتانسیل مقاومت فشاری و تغییرپذیری بتن بر مبنای نتایج آزمایش و با استفاده از استوانه‌هایی هستند که مطابق با ASTM C31/C31M نمونه‌برداری، قالب گیری و تا سن مشخصه شدهٔ آزمایش (معمولاً ۲۸ روز)، به‌طور استاندارد عمل‌آوری شده اند. قطر استوانهٔ آزمایش باید حداقل سه برابر حداکثر اندازهٔ اسمی سنگدانه‌های مخلوط باشد. آزمونه‌های بتنی که تحت شرایط غیراستاندارد ساخته یا عمل‌آوری شده‌اند، ممکن است اطلاعات دیگری فراهم سازند، امّا آنها باید به‌صورت جداگانه تحلیل شده و گزارش شوند. نمونه‌هایی که تحت شرایط استاندارد تولید، عمل‌آوری و یا آزمایش نشده‌اند، ممکن است به‌طور دقیق مقاومت بالقوه بتن را نشان ندهند. در گزارشات مربوط به آزمایش مقاومت می‌بایست مغایرت‌ها و انحرافات از شرایط استاندارد آزمودن، ذکر شوند.

آزمایش مقاومت بتن در سنین ثانویه، مانند سنین ۵۶، ۹۱ یا ۱۸۲ روزه، ممکن است بیشتر از مقاومت ۲۸ روزه مناسب باشد، به خصوص در مواردی که از یک پوزولان، سیمان کم حرارت یا سیمان با کسب مقاومت اندک استفاده می‌شود. برخی از اجزای سازه‌ای یا سازه‌ها، تا زمانی که بتن بیشتر از ۲۸ روز بالغ نشود و تا زمانی که بتوان مزیت کسب مقاومت را اخذ نمود، بارگذاری نخواهند شد.

اگر طراحی بر مبنای مقاومت‌های سن ثانویه باشد، ممکن است ارتباط دادن آن به مقاومت ۲۸ روزه لازم باشد، چون همیشه استفاده از آزمونه‌هایی با سن ثانویه برای پذیرش بتن عملی نیست. این ارتباط بـاید قبل از شروع ساخت و ساز و از طریق آزمایش‌های میدانی یا آزمایشگاهی برقرار شود. بچینگ پلانت‌های بتن برای مراجعه بعدی توانسته اند این ارتباط را از قبل برقرار نمایند؛ حتی اگر ممکن است با بتن سن-ثانویه، مستقیماً درگیر نباشد، گاهگاهی می‌بایست آن را بررسی کرد و سرانجام برای بتن فعلی مورد مصرف، تطبیق نمود.

بسیاری اوقات در مراحل اولیه یک کار، به منظور برآورد از مقاومت بتن در حال تولید، دسترسی به نتایج قبل از ۲۸ روز مقاومت، ضروری می‌شود. استوانه‌های بتن باید از نمونه یکسان ساخته شده و در سن ۷ روز و در برخی موارد حتی در سن ۳ روز، آزمایش شوند. آزمایش در سنین اولیه با استفاده از شیوه‌های آزمایش تسریع یافته، مانند آنچه که در ASTM C 684 مقرر گردیده است را نیز می‌توان اتخاذ نمود. مقاومت سن ۲۸ روزه را می‌توان بر اساس ارتباطی که از پیش برای مخلوط مخصوصی مقرر شده است، با استفاده از روش تشریح شده در ASTM C918/C918M برآورد نمود. این آزمایش‌های اولیه، تنها نشانه‌ای از یک عملکرد قابل قبول را ارائه می‌دهند. آزمایش‌های مورد استفاده که برای مقاصد پذیرش در سن ۲۸ روز انجام می‌پذیرند، معمولاً استاندارد قراردادی هستند. استفاده از آزمونه‌های میدانی یا کارگاهی عمل‌آمده (ASTM C 31)، گاهی اوقات در کاربری‌هایی مانند ساخت و ساز سریع یا پس کشیدگی، برای حصول اطمینان از آن که عضو به مقاومت درجای قابل قبولی دست یافته است، بخصوص در سنین اولیه، توصیه شده و یا الزام می‌شود؛ به‌طوریکه بتوان عضو را با امنیت کامل در اسرع وقت بارگذاری یا اعمال تنش نمود. آزمایش‌های آزمونه‌های کارگاهی عمل آمده را می‌توان برای تعیین زمان حذف قالب، بخصوص در آب و هوای سرد و به هنگامی که مقاومت از طریق بخار دهی یا لوله و بلوک بتن برقرار می‌شود، استفاده نمود. همچنین استوانه‌های میدانی عمل آمده به عنوان روشی برای ارزیابی از مقبولیت کار عمل‌آوری پیمانکار، محسوب می‌شوند. استوانه‌های استاندارد عمل آمده که تحت شرایط کاملاً کنترل‌شده در ظرف ۲ روز ریخته می‌شوند و آزمایش‌های آن برای مقاصد پـذیرش انجام می‌پذیرند را نباید با استوانه‌های میدانی عمل آمده اشتباه گرفت.

۶. ۵ نمودارهای کنترل کیفیت

بسیاری از صنایع تولیدی برای کاهش تغییرپذیری، افزایش بازدهی تولید و تشخیص گرایشاتی که به همان اندازه در ابتدای کار قابل اجرا هستند، از نمودارهای کنترل کیفیت استفاده می‌کنند. در ASTM MNL 7A، روش‌های خوبی برای تنظیم نمودارهایی شبیه به آنچه که ارائه می‌شود، طرح گردیده است.

بر اساس الگوی نتایج قبلی و محدودیت‌های مقرر شده از ASTM MNL 7A، گرایش‌هایی آشکار تر می‌شوند. داده‌های نزولی خارج از محدوده‌های مقرر شده، حاکی از چیزی اند که بر کنترل فرایند اثر کرده اند و اغلب برای تحت کنترل در آوردن آنها، کنش یا مداخله با متغیرهای فرآیند موجود، لازم است. این کنش‌ها یا مقادیر محدود مداخله فرایند، به‌طور کلی از طریق روش‌هایی مثل آنهایی که برای این راهنما استفاده شده، مقرر می‌شوند؛ کنش را می‌بایست بر اساس مشخصات پیمان یا مقادیر دیگر اخذ نمود. خیلی از اوقات، محدوده‌های کنش یا مداخله با معیار پذیرش مشخص شده برای یک پروژه خاص، برابر هستند.

شکل (۱.۶) سه نمودار ساده‌شده را که به‌طور خاص برای کنترل بتن تهیه شده است، نشان می‌دهد. این نمودارها با یکدیگر ترکیب می‌شوند و یک شکل را تشکیل می‌دهند، به‌طوریکه می‌توان آنها را به‌طور همزمان بررسی نمود. ممکن است که این نمودارها، تمامی ویژگی‌های نمودارهای رسمی کنترل را در بر نداشته باشند، امّا آنها می‌توانند برای مهندس بتن، معمار، پیمانکار و تهیه‌کننده مفید باشند. این نوع از نمودارهای کنترلی، قویاً برای بتنی که در دورهٔ قابل توجهی به‌طور مستمر تولید می‌شود، توصیه می‌شوند.

۶. ۱.۵ نمودار مقاومت ساده

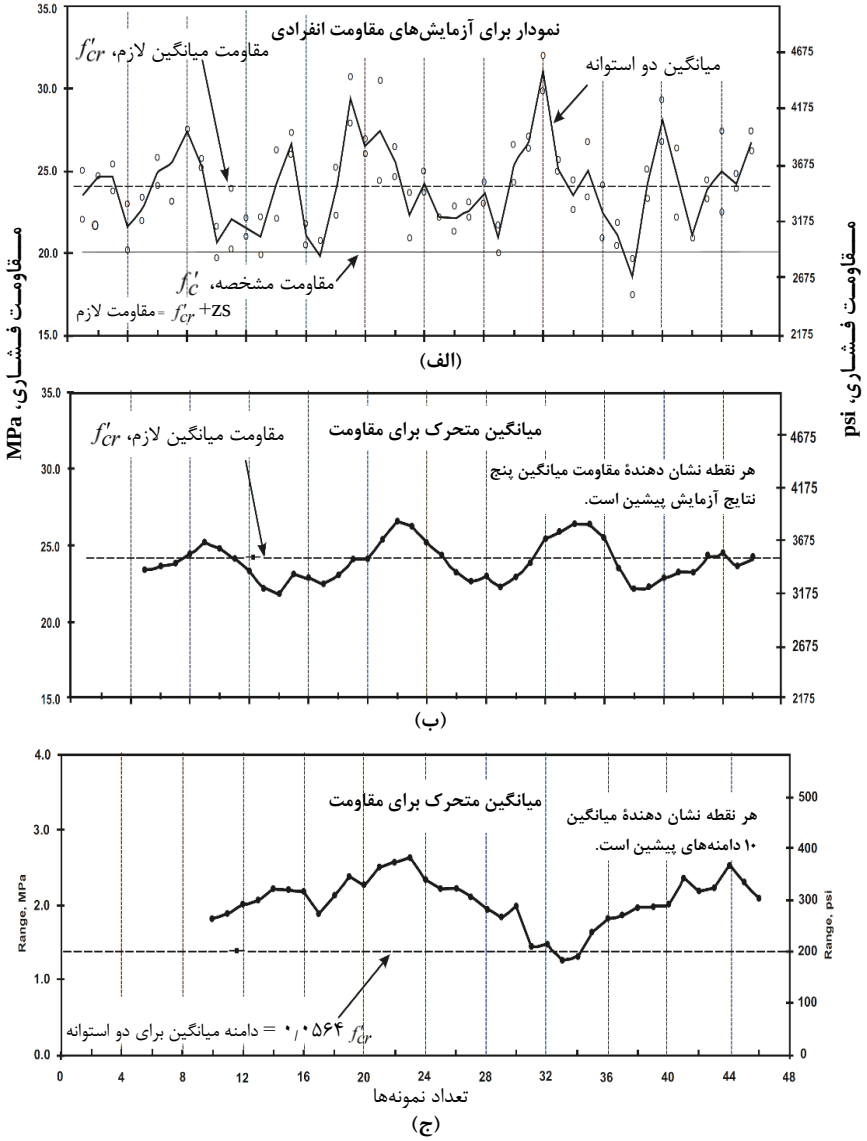
نمودار (الف) در شکل (۱.۶)، نتایج حاصله از تمامی آزمایش‌های انفرادی را نشان می‌دهد که در توالی مبتنی بر تاریخ ریخت شدن، رسم شده است و همینطور تغییر بین یک جفت استوانه‌های ساخته شده از نمونه بتنی یکسان را نشان می‌دهد. مقاومت میانگین لازم در شکل (۱.۶)، با استفاده از معادله (۵-۱b) تعیین شده است؛ هرچند این مقدار می‌توانست از طریق معادله (۵-۱a) یا جدول (۲.۵) نیز به‌دست آید. اغلب این نمودار شامل مقاومت مشخصه نیز هست. این نمودار به‌دلیل نشان دادن تمامی داده‌های در دسترس مفید است، امّا در شناسایی گرایشات و انتقالات در داده‌ها، محدود است.

۶. ۲.۵ مقاومت میانگین متحرک

نمودار (ب) در شکل (۱.۶)، میانگین متحرک آزمایش‌های متوالی را نشان می‌دهد. این نوع از نمودار، اغتشاش و پراکنش را در نمودار آزمایش انفرادی کاهش می‌دهد. عملکرد گرایشات به راحتی شناسایی می‌شوند و توانایی اثراتی همچون تغییرات فصلی و تغییرات در مواد، به گونهٔ مؤثر تری نشان داده می‌شوند. هنگامی که میانگین متحرک از سه آزمایش رسم می‌شود، این نمودار، اغلب شامل مقاومت مشخصه می‌باشد.

آزمایش‌های بیشتر مورد استفاده برای محاسبهٔ میانگین، نمودار را برای شناسایی گرایشات قوی تر می‌کند. با به موقع بودن، یک داد و ستد واضح وجود دارد؛ با این حال، یک گرایش هرچه زودتر باید شناسایی شود، به‌طوریکه بتوان کنش‌های تصحیحی مناسب را انجام داد. چون میانگین متحرک سه آزمایش متوالی، یکی از معیارهای انطباق ACI 318 است، خیلی از اوقات این پارامتر بر روی یک نمودار کنترل جستجو می‌شود. به دلیل اینکه پیگیری و جستجوی میانگین متحرک سه آزمایش، ممکن است به اندازه کافی قدرت تحلیلی را فراهم نکند، در غالب اوقات، از میانگین متحرک پنج آزمایش مقاومت متوالی استفاده می‌شود. تعداد آزمایش‌های میانگین شده، به تناسب هر کاری می‌تواند برای این نمودار کنترل و محدودیت مداخله مناسب، تغییر کند.

به منظور پیگیری میانگین متحرک از ۱۰ یا ۱۵ آزمایش، می‌توان یک تهیه‌کننده بتن با تعداد زیادی از آزمایش را برای یک مخلوط خاص انتخاب نمود و مقدار مورد نظر را می‌توان بر اساس f'_{cr} ، مقرر کرد. با توجه به اینکه به مقدار داده‌های زیادی نیاز است، هر یک از گرایشات شناسایی شده با این رویکرد، قوی خواهد شد و انتقالات در مقاومت متوسط را می‌توان به راحتی تشخیص داد. همچنین می‌توان در اسناد و مدارک مرسولهٔ اختلاط از میانگین‌های ۱۰ و ۱۵ آزمایش استفاده کرد.



SAMEN BETON

۶. ۳.۵ تغییرپذیری آزمایش

۶. ۱.۳.۵ هدف

نمودار (ب) در شکل (۱.۶)، میانگین متحرک از دامنه‌ای با حداکثر تفاوضل بین استوانه‌های هم منبع را نشان می‌دهد که متشکل از یک آزمایش مقاومت منفرد می‌باشد و از آن برای نظارت بر تکرار پذیری آزمایش استفاده می‌شود. آزمایشگاه مسئول دقت و صحت آزمودن است؛ اگر آزمایش‌ها، تغییرات بیشتری را نشان دهند یا سطوح مقاومت میانگین کمتر از چیزی باشد که واقعاً باید باشد، ممکن است پیمانکار جریمه شود. از آنجایی که دامنه مقاومت بین آزمونه‌های هم منبع از نمونه یکسان، به عهدهٔ آزمایشگاه است، آزمایشگاه ممکن است نمودار کنترل را به عنوان دامنه‌هایی از بررسی یکنواختی عملکرد خود، حفظ کند. این تغییرات، تفاوضل‌های روزانه آزمایش، عمل‌آوری، کلاهک‌گذاری و شیوه‌های آزمودن را ظاهر نمی‌کند.

به‌طور نوعی، دامنهٔ میانگین از ۱۰ آزمایش متوالی پیشین، رسم می‌شود (مجموعه‌ای از استوانه‌های هم منبع که در بخش ۱.۳.۴ بحث شد). محدوده های مداخله برای این نمودار کنترل، بر اساس میانگین مقاومت و سطح دلخواه کنترل پایه ریزی می‌شود.

۶. ۲.۳.۵ محاسبه تغییرات قابل قبول آزمایش

همانطور که در فصل ۴ بحث شد، محاسبهٔ دامنه قابل قبول بین استوانه‌های هم منبع از یک آزمایش، به تعداد آزمونه‌ها در یک گروه و تغییر حدود پیمانه وابسته است. مراحل زیر می‌تواند محدوده‌های مداخله را برای نمودار کنترل دامنه میانگین متحرک، بر قرار کند.

همانطور که در معادله (۶-۲) نشان داده شده است، مقدار مورد انتظار دامنه میانگین $\overline{R}_m$ را می‌توان از طریق فرمول‌بندی مجـدد معادله (۴-۵) و معادله (۴-۶)، تعیین نمود:

$$\overline{R_m} = f'_{cr} V_1 d_2 \qquad (۶-۲)$$

برای کنترل خوب نمونه‌های میدانی ریخته شده، ضریب تغییرات حدود پیمانه V_1 نباید بیشتر از ۵٪ باشد (جدول ۳.۴). بنابراین، برای گروهی از دو استوانه هم منبع، برآوردی از دامنه میانگین متناظر، چنین خواهد بود:

$$\overline{R_m} = (0{,}05 \times 1{,}128)\, f'_{cr} = 0{,}05640\, f'_{cr} \qquad (۶-۳a)$$

یا برای گروهی از سه استوانه هم منبع:

$$\overline{R_m} = (0{,}05 \times 1{,}693)\, f'_{cr} = 0{,}08465\, f'_{cr} \qquad (۶-۳b)$$

به‌دلیل غیر قابل قبول بودن عدم قطعیت‌های آماری زیاد که با استفاده از نمونه‌های کوچک، وارد می‌شود، این محدوده‌های مداخله تنها بعد از دامنه میانگین حاصله از مقاومت‌های استوانه هم منبعی که به وسیلهٔ حداقل ۱۰ آزمایش مقاومت محاسبه شده باشد، موثر اند.

۴.۵.۶ خلاصه

برای مؤثر بودن، نمودارهای کنترل باید در طول هر پروژه حفظ شوند. حداقل آزمایشگاه باید یک نمودار کنترل برای دامنه میانگین حفظ نمایـد. ممکن است نمودارهای دیگر کنترل به عنوان یک امر الزامی به مهندس یا معمار تسلیم شوند. از آنجایی که در پروژه‌های متعدد می‌تواند از یک مخلوط منفرد (طرح اختلاط) استفاده شود، تهیه‌کنندگان بتن می‌توانند دامنه میانگین متحرک را بر مبنای آن مخلوط پیگیری کنند. بسیاری از تهیه‌کنندگان در هر پروژه، این پیگیری را برای دست آوردن داده‌هایی در جهت استفادهٔ شخصی خودشان انجام می‌دهند.

استانداردها و گزارش‌های ارجاع شده

استانداردها و گزارشاتی که در زیر عنوان شده‌اند، آخرین ویرایش در زمانی است که این سند تهیه شده است. چون این اسناد مکرراً اصلاح می‌شوند، به خواننده توصیه می‌شود در صورت تمایل به مراجعه به آخرین نسخه، با گروه حامی تماس برقرار کند.

ACI

ACI 301	مشخصات بتن سازه‌ای
ACI 318	آیین نامه الزامات ساختمانی برای بتن سازه‌ای و تفسیر

ASTM

ASTM MNL 7A	راهنمای ارائه تحلیل نمودار کنترل و داده‌ها، ویرایش هفتم
ASTM C31/C31M	روش ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌های آزمایش بتنی در کارگاه
ASTM C39/C39M	روش آزمایش برای مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی استوانه‌ای
ASTM C94/C94M	مشخصات مخلوط بتن آماده
ASTM C172/C172M	روش نمونه‌برداری از مخلوط بتن تازه
ASTM C684	روش آزمایش برای ساخت، عمل‌آوی تسریع شده و آزمایش تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌های آزمایشی بتنی

شیوهٔ اداره و اجرای یک برنامه آزمایش بین آزمایشگاهی برای تعیین دقت روش‌های آزمایش مواد ساختمانی	ASTM C802
روش آزمایش برای ارزیابی از مقاومت فشاری در سن اولیه و طرح‌ریزی برای مقاومت در سن ثانویه	ASTM C918/C918M
روش استاندارد برای نمونه برداری تصادفی از مواد ساختمانی	ASTM D3665
روش استاندارد برای پرداختن به مشاهدات خارج از محدوده	ASTM E178

منابع ذکر شده

1. Anderson, F. D., 1985, "Statistical Controls for High-Strength Concrete," *High-Strength Concrete*, SP-87, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 71-82.
2. Box, G. E. P.; Hunter, W. G.; and Hunter, J. S., 2005, *Statistics for Experimenters*, Wiley & Sons, New York, 653 pp.
3. Cook, J. E., 1982, "Research and Application of High-Strength Concrete Using Class C Fly Ash," *Concrete International*, V. 4, No. 7, July, pp. 72-80.
4. Cook, J. E., 1989, "10,000 psi Concrete," *Concrete International*, V. 11, No. 10, Oct., pp. 67-75.
5. Day, K. W., 2006, *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*, third edition, E&FN Spon, 391 pp.
6. Detwiler, R. J.; Swor, T. E.; and Thomas, W., 2006, "Acceptance Testing Using 4 x 8 in. Cylinders," *Concrete International*, V. 28, No. 1, Jan., pp. 81-86.
7. Dewar, J. D., 1995, "Developments in CUSUM Control Systems for Concrete Strength," *Proceedings of the 1 1 th ERMCO Congress*, Istanbul, Dec.
8. Erntroy, H. C., 1960, "The Variation of Works Test Cubes," *Research Report* No. 10, Cement and Concrete Association, London, UK, 28 pp.
9. Kosmatka, S. H.; Kerkhoff, B.; and Panarese, W. C., 2002, "Design and Control of Concrete Mixtures," EB001, fourteenth edition, Portland Cement Association, Skokie, IL, 372 pp.
10. Leming, M. L., 1999, "Probabilities of Low-Strength Events in Concrete," *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 3, May-June, pp. 369-376.
11. Mehta P. K., and Monteiro, P. J. M., 2006, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, third edition, Prentice-Hall, 659 pp.
12. Metcalf, J. B., 1970, "The Specification of Concrete Strength, Part II, The Distribution of Strength of Concrete for Structures in Current Practice," *RRL Report* No. LR 300, Road Research Laboratory, Crawthorne, Berkshire, pp. 22.
13. Murdock, C. J., 1953, "The Control of Concrete Quality," *Proceedings*, Institution of Civil Engineers (London), V. 2, Part 1, July, pp. 426-453.
14. Natrella, M. G., 1963, "Experimental Statistics" *Handbook* No. 91 (reprinted 1966 with corrections), U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology [NIST]), Gaithersburg, MD.
15. Neville, A. M., 1959, "The Relation Between Standard Deviation and Mean Strength of Concrete Test Cubes," *Magazine of Concrete Research* (London), V. 11, No. 32, July, pp. 75-84.