

## نمودارهای کنترل کیفیت بتن

مؤلف اول، عبدالحسین آزادمنش

۱- عنوان و آدرس کوتاه مؤلف اول دانش آموخته مهندسی عمران از دانشگاه صنعتی اصفهان

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (abazad2000@gmail.com)

### چکیده

کنترل کیفیت بتن چه از نظر دوام یا مقاومت فشاری و سایر مشخصات موردنیاز به دلیل حصول اطمینان از نقش کلیدی آن در دوام و پایداری سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. کنترل کیفیت در همه مراحل، از تهیه مصالح، ساخت بتن و اجرا لازم بوده که عموماً با انجام آزمایش‌های استاندارد و یا بررسی‌های میدانی پیش می‌گردد. علاوه بر این در همه مراحل یادشده داده‌های آزمایشگاهی و بررسی‌های کیفی و توصیفی بستری برای تحلیل چگونگی روند نتایج بر اساس روش‌های آماری فراهم آورده که نقش مدیریتی در جهت بهبود کیفیت، جذب مشتری و کاهش هزینه‌های تولید را در بردارد. در اینجا با توجه به گستردگی روش‌های آماری کنترل کیفیت بحث را محدود به نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در سن ۲۸ روزه معطوف می‌شود. روش‌های آماری پرکاربرد کنترل کیفیت شامل موارد زیر است:

- (۱) نمودارهای کنترل کیفیت بتن: نمودارهای کنترل کیفیت بتن مدنظر این مقاله بوده که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.
- (۲) توزیع نرمال: این نوع نمودار توزیع فراوانی داده‌ها را نسبت به میانگین و انحراف معیار تبیین می‌نماید. این موضوع خود بحثی جداگانه می‌طلبد
- (۳) نمودار CUSUM: در این نوع نمودار تفاوت میان هر میانگین و مقدار هدف برحسب زمان رسم می‌شود. این نمودار از دقت بالایی در مشاهده تغییرات کوچک دارد.

کلمات کلیدی: کنترل کیفیت آماری، بتن، مقاومت ۲۸ روزه،

## ۱ مقدمه

بسیاری از صنایع تولیدی از نمودارهای کنترل کیفیت برای کاهش تغییرات، افزایش کارایی تولید و شناسایی سریع روند تغییرات نتایج فرایند استفاده می کنند. از مواردی که در زمینه تولید بتن به صورت راهنمای بررسی نتایج مقاومت فشاری بتن آمده است می توان به ACI ۲۱۴R-11 اشاره کرد. روند تغییرات نتایج آزمایش نمونه های بتن بر اساس الگوی نتایج قبلی و حدود مشخصات تعریف شده آشکارتر می شوند. داده هایی که در خارج از محدوده تعیین شده قرار دارند نشان می دهند که عامل یا عواملی در کنترل فرایند تأثیر داشته است و غالباً نیاز به اقدامات اصلاحی در متغیرهای فرایند برای بازگرداندن مجدد آن به مسیر تحت کنترل است.

این اقدامات یا عوامل مؤثر بر فرآیند، معمولاً با استفاده از روش هایی آماری از جمله نمودارهای کنترل کیفیت و بر اساس مشخصات فنی شناسایی می شوند. چنین بررسی هایی برای یک پروژه با توجه به معیارهای پذیرش و مشترک می تواند چشم اندازی نیز برای دیگر پروژه های مشابه باشد. در این مقاله جهت کنترل کیفی نتایج مقاومت فشاری (توسط آزمایشگاه آزمون فولاد مستقر در کارگاه) یکی از طرح های اختلاط بتن رده C۳۵ کارگاه سد داریان در دوره ای کوتاه مدت که به دلایل مختلف نوساناتی داشته و هم زمان تلاش برای بهبود نتایج، انتخاب شده است.

### ۱. نمودار Run chart

نمودار Run chart داده های فرآیند را با گذشت زمان نشان می دهد. از این نمودار برای ردیابی تغییرات خاص و داده های غیر تصادفی در فرآیند استفاده می شود. چنانچه در آزمون آماری احتمال داده ها p-value (probability value) بزرگ تر از ۰،۰۵ باشد. می توان نتیجه گرفت که هیچ گونه نشانه ای از تغییر ناشی از علتی خاص یا داده غیر تصادفی وجود ندارد. در چنین حالتی نقاط به طور تصادفی در اطراف خط میانه (میانگین) تغییر می کنند. توضیحاً در خصوص آزمون آماری p-value اشاره می گردد که برای بررسی یک فرض آماری، آزمایش تصادفی جمع آوری داده ها انجام می گردد. اگر نتیجه ای آزمایش تفاوت «معناداری» با آنچه انتظار هست، داشته باشد وقتی که فرض مورد نظر را صحیح فرض کرده ایم، فرض را رد می کنیم و در غیر این صورت نمی توانیم آن را رد کنیم.

تنوع داده ها در کلیه فرایندها رخ می دهد. تنوع عادی یک بخش طبیعی از روند است. علت تغییرات خاص، خارج از سیستم ناشی می شود و باعث ایجاد الگوها، تغییرات یا روندهای قابل تشخیص در داده ها می شود. نمودار Run chart به صورت گرافیکی نشان می دهد که آیا دلایل خاص بر روند تأثیر می گذارد یا خیر.

در این نمودار آزمایش هایی برای کنترل داده های تصادفی انجام می شود که اطلاعات مربوط به علل تغییر غیر تصادفی را نشان می دهد.

این علل به چهار دسته تقسیم می شوند

#### ۱) الگوی ترکیب Mixture patterns

به طور معمول داده های یک فرآیند با عبور مکرر از خط مرکز یا میانگین مشخص می شوند. در غیر این صورت اغلب نشانگر داده های ترکیبی از دو فرایند هستند. اگر p-value for mixtures کمتر از ۰،۰۵ باشد، ممکن است در داده ها ترکیب وجود داشته باشد.

#### ۲) الگوهای خوشه ای Cluster patterns

خوشه ها گروه هایی از نقاط هستند که در یک منطقه از نمودار قرار می گیرند. خوشه ها ممکن است تغییرات ناشی از دلایل خاص، مانند مشکلات اندازه گیری یا نمونه برداری یا مربوط به تنظیمات ابزاری های سنجش و آزمایش باشد. اگر p-value for clustering کمتر از ۰،۰۵ باشد، ممکن است داده های خوشه ای وجود داشته باشد.

#### ۳) الگوهای نوسان Oscillating patterns

نوسان هنگامی اتفاق می افتد که داده ها از بالا و پایین نوسان می کنند و این نشان می دهد که روند پایدار نیست. اگر p-value for oscillation کمتر از ۰،۰۵ باشد، ممکن است در داده های نوسان وجود داشته باشد. در این حالت، داده به طور متناوب بالا و پایین می روند.

#### ۴) الگوهای گرایش Trend patterns

گرایش یعنی یک‌روند پیوسته صعودی یا نزولی در داده‌ها وجود دارد. گرایش داده‌ها ممکن است هشدار دهند که یک فرآیند احتمالاً به‌زودی از کنترل خارج خواهد شد. بروز آن به دلیل عواملی مانند ابزارهای فرسوده، دستگاه خارج از تنظیمات یا چرخش دوره‌ای اپراتورها است. اگر مقدار p-value for trends کمتر از ۰،۰۵ باشد، ممکن است گرایی در داده‌ها رخ داده باشد. [۱]

قبل از توضیحات مربوط به نمودار لازم است مفاهیمی که در متن مقاله به کرات استفاده شده تبیین شود.  
- منظور از نمونه نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده از یک بتن است و آزمایش، تعیین مقاومت فشاری مجموعه از نمونه‌ها (۲ یا ۳) در یک سن مشخص است.

- مقاومت هدف  $f_{cm}$  (معادل  $f_{cr}$  در ACI) مقاومتی است که تضمین کننده مقاومت مشخصه در مرحله اجراست؛ و با استفاده از مقررات ملی مبحث ۹ بند 1-3-2-9-9 تعیین می‌شود. جدول (۱)

### جدول ۱ تعیین مقاومت فشاری هدف [۲]

مقاومت فشاری متوسط لازم برای تعیین نسبت مخلوط بتن پر مقاومت، باید بیشترین مقدار از بین دو مقدار به دست آمده از روابط زیر باشد:	در صورتی که مقدار انحراف استاندارد از داده‌های گذشته در دسترس نباشد، مقاومت فشاری متوسط لازم طبق رابط باید محاسبه شود:
$f_{cm} = f_c + 1,33 S \text{ MPa (1)}$	$f_{cm} = 1,1 f_c + 6 \text{ Mpa (3)}$
$f_c$ مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای $15 \times 30$ سانتیمتر	

در نمودار (۱) Run chart مقاومت فشاری نمونه‌های سه‌تایی هر آزمایش همراه با خطوط مبنا با کاربرد شرایط پذیرش بتن آمده است.

$f_{cr}$  = مقاومت فشاری هدف، حداقل مقاومت فشاری طرح اختلاط بتن در سن ۲۸ روزه ۴۱ مگاپاسکال

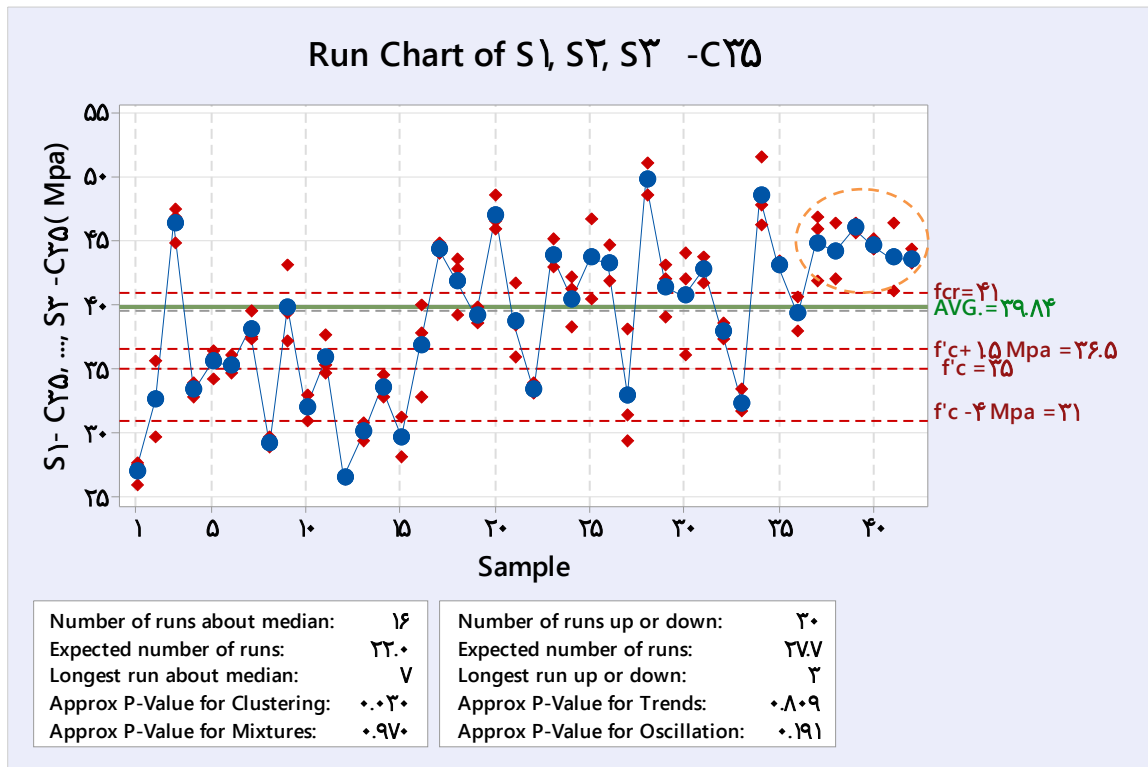
•  $f_c$  = مقاومت مشخصه ۳۵ مگاپاسکال

• خطوط مبنا مربوط به ضوابط پذیرش بتن

○  $f_c + 1,5$  = مقاومت مشخصه به اضافه ۱,۵ مگاپاسکال

○  $f_c - 4$  = مقاومت مشخصه منهای ۴ مگاپاسکال

در این نمودار p-value به جز p-value for clustering که از مقدار ۰،۰۵ کمتر بوده که به معنای داده‌های خوشه‌ای است. این داده‌ها در انتهای دوره مشهود است.



نمودار ۱ مقاومت فشاری آزمونه‌های هر آزمایش بتن در سن ۲۸ روزه

## ۲. نمودار تک مشاهده‌ای I chart

یکی از ساده‌ترین نمودارهای کنترل کیفیت نمودار تک مشاهده‌ای است. در این نمودار نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری متوسط آزمونه‌های (۲ یا ۳ آزمونه) بتن در سن ۲۸ روزه برحسب تاریخ اجرا، موقعیت یا شماره نمونه ترسیم می‌شود.

نمونه ای از این نوع نمودار (۲) متوسط مقاومت فشاری هر آزمایش شامل میانگین ۳ آزمونه را به همراه مقادیر مبنا نشان می‌دهد.

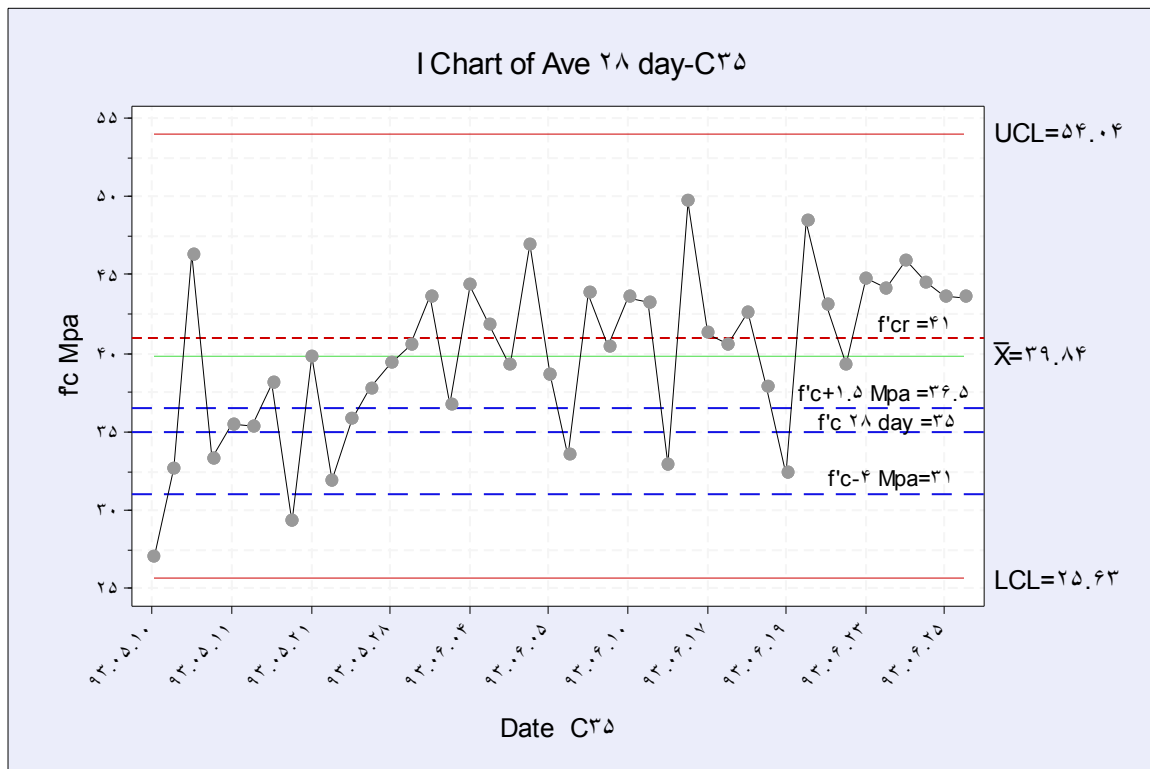
- $\bar{X}$  = مقاومت فشاری متوسط کلی شامل میانگین همه آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری در دوره موردبررسی و برابر ۳۹٫۸ مگاپاسکال است.
- $f_{cr}$  = مقاومت فشاری هدف، حداقل مقاومت فشاری طرح اختلاط بتن در سن ۲۸ روزه ۴۱ مگاپاسکال - تعداد آزمایش‌های کمتر از مبنا ۲۰ مورد از ۴۲ آزمایش است.
- $f'_c$  = مقاومت مشخصه ۳۵ مگاپاسکال - تعداد آزمایش‌های کمتر از مبنا ۸ مورد از تعداد ۴۲ آزمایش است.
- $f'_c + 1.5$  = مقاومت مشخصه به‌اضافه ۱٫۵ مگاپاسکال - تعداد آزمایش‌های کمتر از مبنا ۱۱ مورد از تعداد ۴۲ آزمایش است.
- $f'_c - 1.5$  = مقاومت مشخصه منهای ۱٫۵ مگاپاسکال - تعداد آزمایش‌های کمتر از مبنا ۲ مورد از ۴۲ تعداد آزمایش است.
- کلیه نتایج در محدوده کنترلی میانگین به‌اضافه و منهای ضریبی از انحراف معیار قرار دارند. جدول (۲) البته می‌توان همان حدود توزیع نرمال یعنی مقادیر  $\bar{X} \pm 3\sigma$  بکار برد. در اینجا از پیش فرض برنامه Minitab استفاده شده است.

جدول ۲ حدود نمودار کنترل [۱]

حد پایین کنترل LCL	حد بالایی کنترل UCL
$\bar{X} - k\sigma$ (۵)	$\bar{X} + k\sigma$ (۴)

که در آن  $\sigma$  انحراف معیار،  $K$  ضریبی از انحراف معیار معمولاً ۳ و  $\bar{X}$  میانگین هر آزمایش

مطابق این نمودار روند تولید بتن به سمت افزایش مقاومت فشاری بوده است. با توجه به اینکه نتایج در محدوده UCL و LCL فرآیند تولید بتن تحت کنترل هست.



نمودار ۲ مقاومت فشاری متوسط بتن در سن ۲۸ روزه بر حسب تاریخ اجرا

### ۳. میانگین متحرک I-MR

نمودار میانگین متحرک I-MR باعث کاهش نوسانات و پراکندگی در نمودار نتایج مقاومت فشاری آزمون‌های هر آزمایش می‌شود. روند عملکرد به‌راحتی و شناسایی و عواملی از جمله تغییرات فصلی و تغییر در مصالح به‌طور مؤثر نشان داده می‌شود. این نمودار معمولاً با ترسیم میانگین متحرک سه آزمایش، شاخص خوبی است؛ اما هرچه تعداد بیشتر آزمایش برای محاسبه میانگین استفاده شود، نمودار برای شناسایی روند تغییرات قدرتمندتر است. باین وجود روش مناسبی برای شناسایی سریع روند تغییرات بوده تا در دنباله آن اقدامات اصلاحی مناسب انجام شود. از آنجاکه میانگین متحرک سه آزمایش مقاومت فشاری متوالی یکی از معیارهای انطباق ACI ۳۱۸ است، این پارامتر اغلب در نمودارهای کنترل ردیابی می‌شود. ولی ردیابی میانگین متحرک سه آزمایش ممکن است قدرت تحلیلی کافی را نداشته‌اند، لذا توصیه می‌گردد، از میانگین متحرک ۵ آزمایش مقاومت فشاری متوالی نیز استفاده شود.

تعداد مناسب آزمایش‌ها برای این نوع نمودار کنترل برای هر کار متفاوت است؛ اما برای ردیابی میانگین متحرک حداقل به ۱۰ یا ۱۵ به‌ویژه جهت تعیین تغییرات و انحراف معیار برای مشخص کردن مقدار مقاومت قراری هدف  $f_{cm}$  لازم است. [۳]

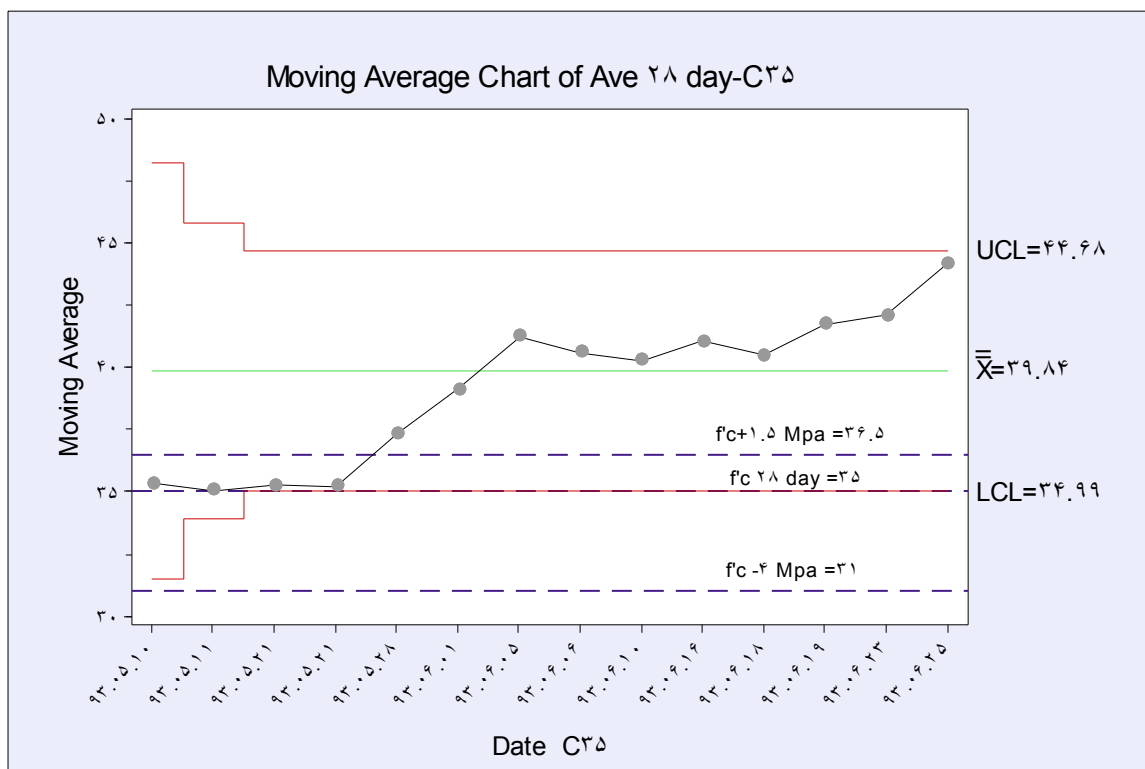
#### ۴. نمودار میانگین متحرک

روند تغییرات میانگین متحرک مقاومت فشاری بتن به علت عوامل برون آزمایشی مانند کیفیت سیمان و سایر مصالح، نحوه اختلاط و میزان دقت در توزین مصالح بتن است. چنانچه این میانگین بالاتر از مقاومت مشخصه قرار داشته باشد شرایط مطلوبی را نمایان می‌سازد. در نمودار (۳) و (۴) به ترتیب برای میانگین متحرک هر سه و پنج آزمایش متوالی (در اینجا هر آزمایش شامل ۳ نمونه) ترسیم شده است. این منحنی به همراه خطوط مبنا آمده است.

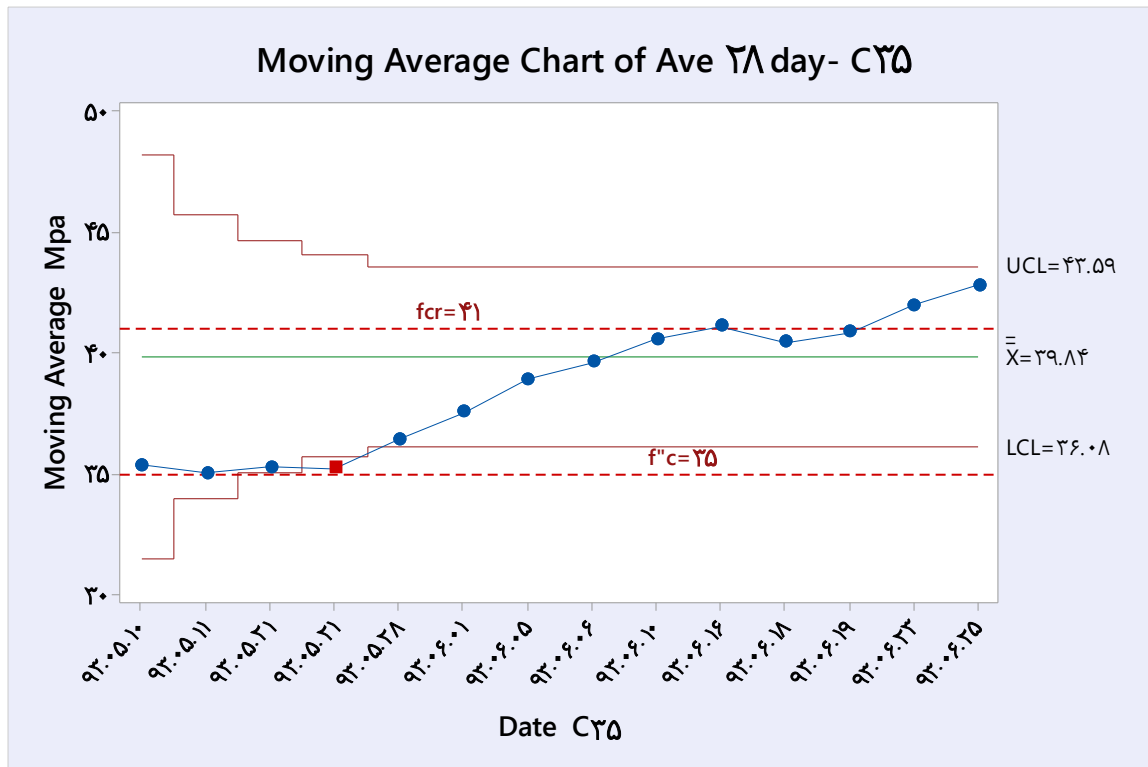
$f_c + 1.5 \text{ Mpa}$  = مقاومت فشاری بعلاوه ۱٫۵ مگاپاسکال - تعداد آزمایش‌های کمتر از مبنا از تعداد ۱۴ میانگین شامل ۳ آزمایش است.

$f_c$  = مقاومت مشخصه - تعداد آزمایش‌های کمتر از مبنا ۱۰ از تعداد ۱۴ میانگین شامل ۳ آزمایش است.

$f_c - 4 \text{ Mpa}$  = مقاومت مشخصه منهای ۴ - تعداد آزمایش‌های کمتر از مبنا ۱۰ از تعداد ۱۴ میانگین شامل ۳ آزمایش است.



نمودار ۳ منحنی میانگین متحرک هر سه مقاومت فشاری متوالی



نمودار ۴ میانگین متحرک هر پنج مقاومت فشاری متوالی

## ۵. تحلیل دامنه

دامنه تغییرات برابر است با حداکثر اختلاف بین نتایج آزمون‌های استوانه‌ای در یک آزمایش مقاومت فشاری که خود شامل دو یا سه آزمون استوانه‌ای است.

از آنجا که مسئولیت دامنه تغییرات مقاومت بین آزمون‌های نمونه بتن بر عهده آزمایشگاه است، از این نمودار برای نظارت بر تکرار آزمایش‌ها توسط آزمایشگاه که مسئول دقت در آزمایش بوده استفاده می‌شود. آزمایشگاه ممکن است یک نمودار کنترل برای دامنه‌ها را به‌عنوان بررسی یکنواختی در عملکرد خود حفظ کند. تغییرات آزمایش‌ها، از جمله عمل‌آوری، کپینگ و موارد مرتبط با انجام آزمایش با ترسیم میانگین متحرک دامنه ۱۰ آزمایش متوالی قبلی تعیین می‌شود. نقش این نمودار کنترل سطح مطلوب انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری متوسط است. [۳]

### ۵.۱ محاسبه تغییرات قابل قبول آزمایش مقاومت فشاری

محاسبه دامنه متوسط قابل قبول بین آزمون‌های استوانه‌ای یک آزمایش بستگی به تعداد نمونه‌های گروه و تغییرات درون‌گروهی دارد، مقدار دامنه متوسط مورد انتظار  $R_m\text{-bar}$  از روابط (۶) الی (۹) تعیین می‌شود:

$$\bar{R}_m = f_{cr} V_1 d_2 \quad (6)$$

$$V_1 = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \quad (7)$$

$$s_1 = \frac{1}{d_2} R \quad (8)$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (9)$$

که در آن:

$V_1$  ضریب پراکندگی درون گروهی انحراف معیاری که برحسب درصدی از مقاومت متوسط بیان می شود.

$\bar{X}$  متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر آزمایش  $X_i$  مقاومت فشاری هر آزمایش

$n$  تعداد آزمایش‌ها

$S_1$  انحراف معیار درون گروهی

$R_m$ -bar حداکثر دامنه متوسط است

$R$  دامنه مقاومت‌ها اختلاف عددی بین بالاترین و پایین‌ترین مقاومت آزمایش‌های مورد بررسی

$R$ -bar میانگین دامنه ۱۰ آزمایش در یک سن

$f'_{cr}$  در  $ACI$  که در مبحث ۹ با عبارت  $f_{cm}$  نامیده شده است برابر است با مقاومت فشاری هدف یعنی متوسط مقاومت فشاری مورد نیاز

برای اطمینان از تأمین حداقل مقاومت فشاری مشخصه  $f'_{cr}$

$d^2$  مطابق جدول (۳)

جدول 3 عوامل مؤثر در محاسبه انحراف معیار درون گروهی دامنه آزمایش‌ها دو، سه یا چهار نمونه‌ای

No. of specimens	$d_2$
2	1.128
3	1.693
4	2.059

ضریب تغییرات درون گروهی یا درون آزمایشی  $V_1$  برای کنترل خوب نمونه‌ها نباید بیشتر از ۵٪ باشد.

بنابراین، برای آزمایش‌های با دو نمونه استوانه‌ای برابر است با:

$$\bar{R}_{cr} = (0.05 \times 1.128) f'_{cr} = 0.05640 f'_{cr} \quad (10)$$

برای آزمایش‌های با سه نمونه استوانه‌ای برابر است با:

$$\bar{R}_{cr} = (0.05 \times 1.693) f'_{cr} = 0.08465 f'_{cr} \quad (11)$$

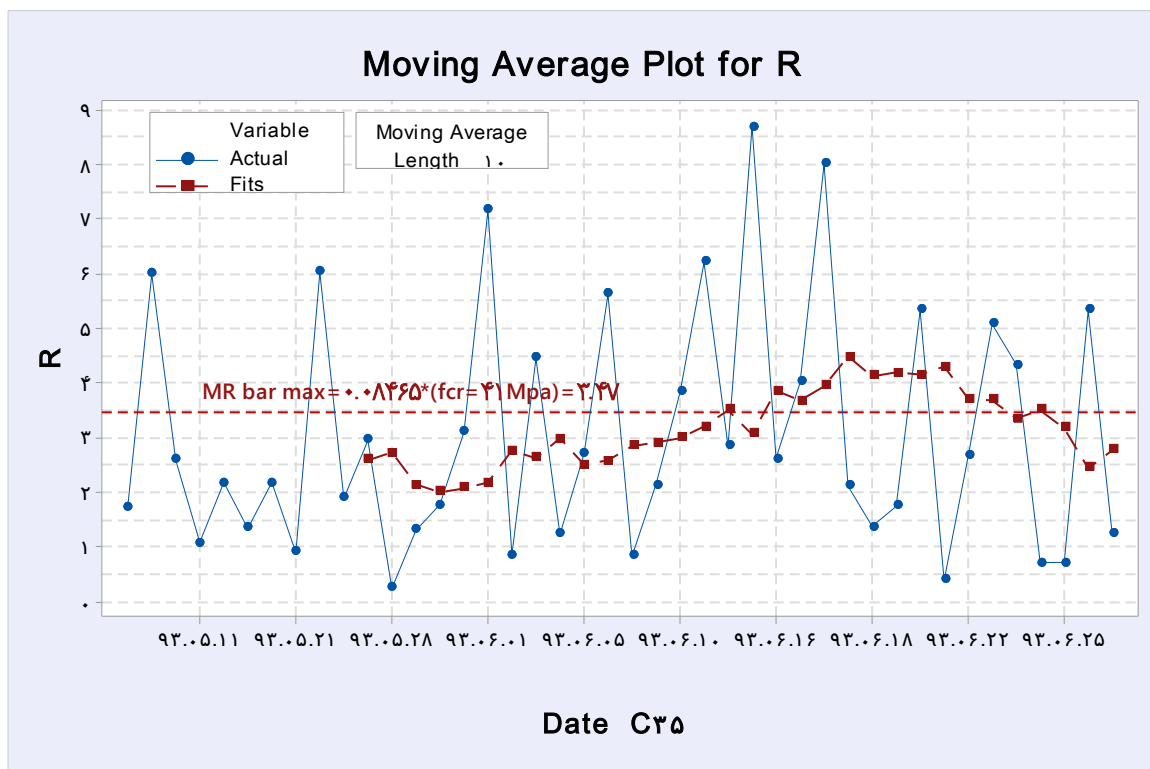
از آنجا که عدم قطعیت‌های آماری غیرقابل قبول زیادی با استفاده از جامعه آماری اندک ایجاد شده است، برای بررسی دامنه تغییرات حداقل تعداد

۱۰ آزمایش باید مورد بررسی قرار می‌گیرد.



## ۶. نمودار میانگین متحرک دامنه

روند کاهشی دامنه تغییرات در نمودار (۵) می تواند نشان دهنده بهبود نتایج درون آزمایشی باشد. عوامل درون آزمایشی مانند نحوه نمونه گیری - عمل آوری آزمونه ها - شکست آزمونه ها و... بوده و بدیهی است که افزایش دامنه تغییرات بین نتایج نامطلوب است. بالا قرار گرفتن منحنی میانگین تغییرات دامنه نسبت به مقدار حداکثر آن حاکی از مطلوب نبودن نتایج درون گروهی یا درون آزمایشی است. یادآوری می گردد که مقدار هدف  $f_{cr}$  مطابق مشخصات فنی حداقل ۶ مگاپاسکال بیش از مقاومت مشخصه فرض شده ولی عملاً طرح های اختلاط دارای حاشیه اطمینان بیش از ۶ مگاپاسکال بوده لذا  $R_{m-bar}$  واقعی بیشتر است.



نمودار ۵ نمودار میانگین متحرک دامنه

## ۷. نتیجه گیری

برای مؤثر بودن، نمودارهای کنترل کیفیت در هر پروژه ای باید به صورت مستمر تهیه گردند. حداقل مسئولیت، آزمایشگاه تهیه نمودار کنترل دامنه متوسط نتایج جهت ارزیابی عملکرد خویش است. نمودارهای کنترل دیگر ممکن است جهت گزارش ارائه شود. از آنجا که یک مخلوط واحد می تواند در پروژه های مختلف مورد استفاده قرار گیرد، تولیدکنندگان بتن می توانند محدوده متوسط متحرک را بر اساس هر بچه یا تراک میکسر بتن ردیابی کرده و داده هایی را برای استفاده آتی به دست آورند.



یازدهمین کنفرانس ملی بتن  
۱۴،۱۵،۱۶ مهرماه ۱۳۹۸  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



## ۸. قدردانی

در اینجا لازم می‌دانم از مجموعه دستگاه نظارت مقیم شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس در سد داریان که افتخار همکاری با آن‌ها را داشته‌ام صمیمانه تشکر کنم.

## ۹. مراجع:

- [۱] راهنمای برنامه کنترل کیفی Minitab ۱۸ <https://www.minitab.com/en-us/products/minitab/free-trial>
- [۲] وزارت راه و شهرسازی معاونت مسکن و ساختمان. (۱۳۹۲) "مقررات ملی ساختمان ایران مبحث نهم طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه" ویرایش چهارم
- [۳] Reported by ACI Committee ۲۱۴, ACI ۲۱۴R-۱۱. (۲۰۱۱) "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete"

Abdolhossein Azamanesh

### Abstract

Concrete quality control is of great importance in terms of durability or compressive strength and other properties required to ensure its key role in structural durability. Quality control at all stages of the preparation and execution of concrete materials is generally required by standard tests or field surveys. In addition, laboratory data and qualitative and descriptive reviews provide the basis for analyzing the results of the process based on statistical methods in all of the above mentioned stages that have a managerial role to improve quality, attract customers for the product and reduce costs. Here, given the scope of statistical quality control methods, the discussion focuses on the experimental results of compressive strength of concrete samples at the age of ۲۸ days, including the most commonly used statistical methods including: ۱- Concrete quality control charts ۲- Normal distribution ۳- CUSUM method; In this paper, quality control diagrams are discussed.

Keywords: Statistical Quality Control, Concrete, ۲۸-day strength