

میزان تأثیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری در خیز دال بتن مسلح در سن پایین بتن

محمودرضا کی منش^۱، سجاد کفاش زاده^۲

۱ - استاد دانشگاه، گروه مهندسی عمران گرایش راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، ایران

۲ - استاد دانشگاه، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، ایران

Email: Sajjadkaffashzadeh@yahoo.com

چکیده

امروزه تامین سریع مسکن سبب به وجود آمدن شیوه‌های نوین ساخت صنعتی ساختمان‌ها شده که در پی آن در نمونه سازه‌های بتنی، زمان بتن‌ریزی دال و دیوار به حداقل ممکن می‌بایست کاهش یابد. در یک پروژه‌ی انبوه‌سازی، حجم بالای ساختمان‌های هم‌تیپ، کم بودن قالب‌های دیوار و سقف و اتمام پروژه در یک زمان کم، می‌تواند در فرآیند قالب‌برداری مشکلاتی را برای مجریان انبوه ساز پیش بیاورد. آنچه در این مقاله به آن پرداخته شده، بررسی عواملی است که باعث تغییر شکل های بیش از حد دال بتن مسلح ناشی از قالب‌برداری زود هنگام دال می‌شود.

در همین راستا یک نمونه‌ی اجرا شده از ساختمان‌های موجود انتخاب و با انجام تحلیل‌های غیرخطی دو عامل مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از آنجایی که سازه‌ی بتنی فوق برای سنین کم و عمدتاً زیر سه روز مورد تحلیل قرار گرفته، از مشخصاتی که آیین‌نامه‌ها برای بتن ارائه می‌دهند نمی‌توان به طور کامل استفاده کرد. لذا مدل‌های رفتاری گوناگون بتن در فاز فشاری، روابطی که توصیف واقع‌بینانه‌ای را از مدول الاستیسیته‌ی بتن در سن کم داشته باشند و همچنین روابط مختلف مقاومت فشاری بتن در سن کم بررسی شده و با انتخاب تعدادی از آنها تحلیل غیرخطی سازه انجام شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته تأثیری به مراتب بیشتر از مقاومت فشاری بتن در تغییر شکل‌های دال دارد.

واژگان کلیدی: دال بتن مسلح، سیستم قالب مدولار، خرابی، بتن کم سن

مقدمه

مرور کارهای پژوهشی انجام شده در این موضوع، نشان می‌دهد که عمده‌ی زمینه‌های تحقیقاتی، به بررسی رفتار لرزه‌ای و دینامیکی سیستم قالب مدولار بر می‌گردد و در مورد عملکرد آن تحت اثر بارهای قائم صحبتی نشده است. در ضمن، شیوه‌های به کار رفته عمدتاً بر اساس ساده‌سازی رفتار صفحه‌ی بتن مسلح با اجزای رشته‌ای می‌باشد. در حال حاضر اجزایی برای تحلیل سازه‌ی صفحه‌ای بتن مسلح وجود دارد. نرم‌افزارهای اجزای محدودی مانند آباکوس هم‌المان‌هایی برای مدل‌سازی صفحه‌های مرکب دارند. با انجام الگوسازی سازه‌های اجرا شده با المان‌های صفحه‌ای مرکب رفتار دقیق‌تری از ساختمان‌های قالب مدولار تحت اثر بارهای ثقلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای دستیابی به مدل صحیح و کاملی از رفتار دال، حذف فرضیات ساده‌کننده‌ای که از تأثیر المان‌های متصل به دال چشم‌پوشی می‌کنند، برای رسیدن به پاسخ واقعی دال از اهمیت بالایی برخوردار است. با مدل‌سازی دال به همراه دیوارهای بتن مسلحی که به آن متصل‌اند و همچنین آرماتورگذاری دال و دیوارها مطابق با نتایج طراحی، می‌توان به بررسی دقیق‌تر این نوع سیستم پرداخت. همچنین با تغییر در پارامترهای سیستم دال می‌توان به روابط و ضوابط مناسب‌تری برای تحلیل و طراحی دال‌های بتن مسلح دست یافت. برای بررسی اهداف ذکر شده‌ی فوق، نمونه‌ی آزمایشگاهی دال بتن مسلح که توسط جین و کندی [1] تست شده، به منظور انجام صحت‌سنجی انتخاب، و در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و مورد تحلیل واقع شد. پس از بررسی نتایج، ملاحظه شد که مطابقت مناسبی میان نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد.

۱- مروری مختصر بر پژوهش‌های پیشین

سن کم در بتن به طور کلی به سنین قبل از ۲۸ روز و پس از عملیات بتن‌ریزی گفته می‌شود. با نگاهی جزئی‌تر به این تعریف، بهتر است سن کم را برای بتن، به روزهای اولیه‌ی پس از عملیات بتن‌ریزی و یا حتی به ساعات اولیه نسبت داد. از آنجا که بارهای قابل توجهی می‌تواند به سازه‌ی بتنی در حین اجرا تحمیل شود، لازم است تا مطالعاتی در زمینه‌ی خواص بتن در سنین کم صورت پذیرد. هرچند بر اساس آنچه کمیته‌ی ACI 347, 2005 بیان می‌دارد، می‌توان فرض کرد که انواع مختلف مقاومت‌های بتن از جمله مقاومت خمشی، برشی و کششی متناسب با مقاومت فشاری بتن در طی دوران بارگذاری است. اما بر اساس آنچه محققین در این زمینه کار کرده‌اند، پیداست که آن تنها یک فرض ساده‌کننده به شمار می‌آید.

۱-۱- رفتار غیرخطی بتن در فاز فشاری

رابطه‌ی تنش-کرنش بتن معمولی بستگی به خواص مختلفی از جمله مقاومت بتن، سن بتن، میزان بار، اندازه‌ی نمونه و مواد تشکیل‌دهنده‌ی بتن از قبیل سیمان و سنگ‌دانه‌ها دارد. تنش فشاری بتن تا سقف ۴۰ تا ۴۵ درصد مقاومت فشاری آن به صورت نسبتی تقریباً خطی با کرنش، افزایش می‌یابد. هنگامی که کرنش بتن از محدوده‌ی الاستیک تجاوز می‌کند، تنش بتن نیز به صورت غیرخطی افزایش یافته تا به مقاومت فشاری مشخصه f'_c برسد. پس از رسیدن تنش فشاری به مقاومت نهایی f'_c ، مقدار آن به صورت غیرخطی کاهش یافته تا به نقطه‌ی شکست برسد. آیین‌نامه‌ی ACI 318 (2005) کرنش نهایی ϵ_c را برای مقاصد طراحی در نظر می‌گیرد. بتن در محدوده‌ی الاستیک به صورت یک مدل خطی الاستیک همسانگرد فرض می‌شود. این مدل الاستیک خطی با پاسخ بتن به هر دو نوع تنش کششی کمتر از ترک‌خوردگی و تنش فشاری در محدوده‌ی ۴۰ تا ۴۵ درصد مقاومت فشاری همخوانی دارد. محققان به‌طور گسترده‌ای روابط تنش-کرنش غیرخطی بتن را در طی چندین دهه با استفاده از فرمول‌های ریاضی مورد بررسی قرار داده‌اند.

۱-۱-۱- مدل اسمیت و یانگ [2]

این مدل، رفتار غیرخطی بتن را در هر دو شاخه‌ی صعودی و نزولی به صورت تابعی نمایی و در یک رابطه ارائه می‌دهد.

$$f_c = E_c \epsilon e^{(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_c})}$$

در این رابطه، ϵ_c کرنش نظیر مقاومت فشاری و E_c مدول الاستیسیته‌ی سکانتی می‌باشد.

مدول الاستیسیته‌ی سکانتی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$E_c = \frac{f'_c}{\epsilon_c}$$

که در آن f'_c همان مقاومت مشخصه‌ی فشاری بتن می‌باشد.

۲-۱- مدول الاستیسیته

تعیین مدول الاستیسیته‌ی اولیه کار آسانی نیست؛ اما مقدار تقریبی آن را می‌توان به طور غیرمستقیم به دست آورد. هیچ روش استانداردی برای تعیین مدول یانگ تا به امروز وجود ندارد.

روش‌های مختلفی برای تعیین مدول یانگ در اروپا و آمریکای شمالی استفاده شده است. در مدل CEB-FIP آیین‌نامه‌ی ۱۹۹۰، مدول الاستیسیته به عنوان شیب نمودار تنش-کرنش در مبدأ نمودار، تعریف شده است؛ اما در آیین‌نامه‌ی ACI، مدول الاستیسیته به عنوان شیب منحنی تنش-کرنش از مبدأ تا نقطه‌ای متناظر با ۴۵ درصد تنش در نظر گرفته می‌شود.

مدول الاستیسیته‌ی بررسی شده در بیشتر پژوهش‌ها و آیین‌نامه‌ها برای سنین بیش از سه روز کاربرد دارد. پیدا کردن رابطه‌ای برای مدول یانگ در سنین ابتدایی بتن، به ندرت در پژوهش‌ها یافت می‌شود. بر اساس مقاله‌ای که کنراد و همکاران ارائه داده، رابطه‌ای را پیشنهاد می‌کند که از ابتدای سن بتن تا مدول الاستیسیته‌ی نهایی را شامل می‌شود. رابطه‌ی آن‌ها به صورت تابع نمایی پیشنهاد شده که در نهایت به مدول الاستیسیته‌ی نهایی منجر می‌شود [3].

$$E(t) = E_{365} \exp(-5t^{-0.63})$$

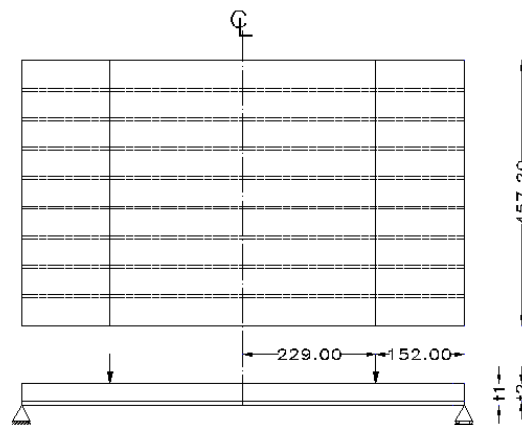
در این رابطه، E_{365} مدول الاستیسیته‌ی نهایی است که در سن یک سال برداشت می‌شود و t سن بتن برحسب روز می‌باشد.

۲- صحت سنجی

پاسخ‌های سازه‌ی دال بتن مسلح که در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحت بارگذاری قائم قرار گرفته با مدل آزمایشگاهی مشابه آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش تحلیلی که برای این سازه در نظر گرفته شده روش استاتیکی غیرخطی است که با توجه به رفتار غیرخطی بتن و به وجود آمدن تغییر شکل‌های بزرگ در سازه ضرورتی غیرقابل انکار به شمار می‌آید. نمونه‌ی آزمایشگاهی که در این پایان‌نامه به عنوان مبنای ارزیابی مدل اجزا محدود استفاده شده، مربوط به آزمایش جین و کندی [1] می‌باشد که در سال ۱۹۷۴ انجام شده است.

۲-۱- مشخصات هندسی مسئله

ابعاد و اندازه‌ی دال و آرماتورها در Error! Reference source not found. نشان داده شده‌اند. کلیه‌ی ابعاد شکل به میلی‌متر هستند. ضخامت دال $t_1 = 38.1$ میلی‌متر و فاصله‌ی آرماتورها از بالای دال $t_2 = 31$ میلی‌متر است. با توجه به نحوه‌ی قرارگیری آرماتورها در دال، عملکرد آن به صورت یک طرفه می‌باشد. به منظور کاهش زمان تحلیل می‌توان از تقارن مسئله استفاده کرده و تنها نیمی از آن را در نرم‌افزار مدل‌سازی کرد. مدل‌سازی دال بتنی به صورت سه بعدی و از نوع المان توپر انجام شده است. از آنجایی که پاسخ سازه در وسط دال به صورت یکنواخت می‌باشد، نیاز به مش‌بندی پیچیده‌ای نداشته و به مش‌بندی سه بعدی مکعبی با دقت ۲۰ گره‌ای اکتفا شده است.



شکل ۱: دال بتن مسلح یک طرفه

۲-۲- مشخصات مواد و مصالح

بر اساس مستندات موجود این آزمایش، رفتار کامل بتن در فاز فشاری ارائه نشده و چاره‌ای جز محاسبه‌ی عددی برای منحنی رفتار بتن نمی‌باشد. مشخصات مصالح بتن ذکر شده در آزمایش به شرح زیر می‌باشد.

$$E_0 = 29 \text{ GPa}$$

$$\theta = 0.18$$

$$f_s = 18.4 \text{ MPa}$$

$$f_r = 32 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_u = 1.3 * 10^{-3}$$

$$\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cracking Failure Stress} = 2 \text{ MPa}$$

$$\text{Ratio of uniaxial tensile to compressive failure stress} = 6.25 * 10^{-2}$$

مشخصات مصالح فولادی مطابق زیر داده شده است.

$$E_{st} = 200 \text{ GPa}$$

$$f_y = 220 \text{ MPa}$$

با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی آیین‌نامه ACI که ارتباط بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بتن را بیان می‌کند، مقدار مقاومت مشخصه به دست می‌آید.

$$E_0 = 4700\sqrt{f'_c} \rightarrow f'_c = 38 \text{ Mpa}$$

همچنین مقدار کرنش نظیر مقاومت مشخصه برابر $\varepsilon_c = 0.00190472$ بدست می‌آید.

حال به منظور حدس منحنی تنش-کرنش فشاری بتن می‌توان از برآزش بهترین منحنی در نقاط موجود بهره برد.

$$f_c = \begin{cases} 8.863\varepsilon e^{(8.28-294.5\varepsilon)} & ; \varepsilon_s < \varepsilon < \varepsilon_c \\ -2.013 * 10^5 \varepsilon + 421.5 & ; \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_u \end{cases} \quad R^2 = 1$$

تعیین رفتار کششی بتن کاملاً متفاوت از رفتار فشاری آن است. اگرچه مدل‌های رفتاری در فاز کششی بتن وجود دارند؛ اما به دلیل رفتار بسیار ترد بتن در این فاز، استفاده‌ی از هرکدام از آن الگوها تفاوت چندانی در نتایج ایجاد نمی‌کند. رفتار ارائه شده برای بتن در فاز کششی در این آزمایش به صورت دوخطی می‌باشد که پارامترهای آن به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتواند تقریباً جوابگوی اندرکنش بین آرماتورها و بتن اطراف آن باشند.

۲-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

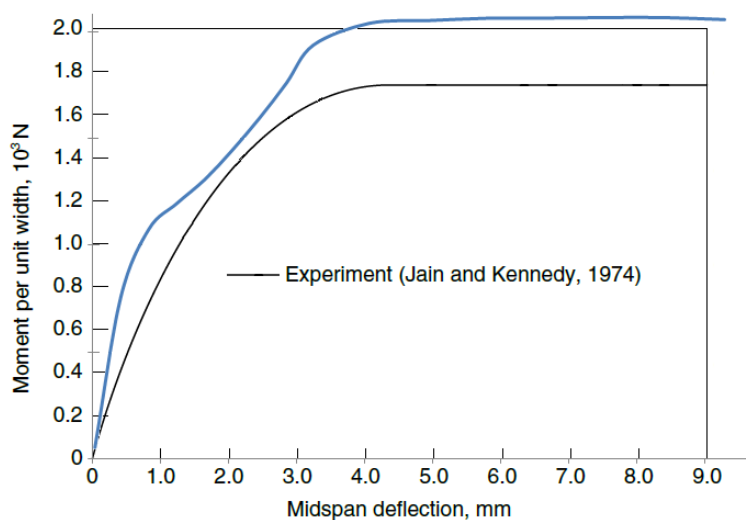
مطابق Error! Reference source not found.، دال بتن مسلح بر روی دو تکیه‌گاه غلتکی و مفصلی زیر دو لبه‌ی کوچک‌تر قرار گرفته است. بارگذاری به صورت بار خطی، متقارن و به فاصله‌ی ۱۵۲ میلی‌متری از دو تکیه‌گاه به سازه اعمال می‌شود.

۲-۴- نتایج تحلیل

تحلیل سازه طی دو گام انجام شده است. در گام اول به سازه اجازه‌ی تغییر شکل تحت اثر وزن داده شده و در گام دوم به آن تغییر مکان اعمال شده تا بقیه‌ی تحلیل انجام شود. در هر دو گام فوق تحلیل با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ بوده است. نتایج تحلیل در جدول ۱ و همچنین تصویر شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: مقادیر بار - تغییر مکان

جابجایی اعمال شده (mm)	عکس العمل تکیه‌گاه غلتکی (N) R	خیز ماکزیمم دال δ (mm)	$M = R * \frac{152}{457.2} * \frac{1}{1000}$
-	160.367	0.0280286	0.0535
0.25	2270.96	0.407881	0.757
0.5	3223.98	0.81945	1.0747
0.75	3587.62	1.23271	1.1959
1	3929.96	1.65072	1.31
1.25	4338.14	2.05077	1.446
1.5	4788.96	2.45144	1.5963
1.75	5279.54	2.84691	1.7598
2	5812.61	3.24156	1.9375
2.5	6118	4.06407	2.0393
3	6156.33	4.93816	2.0521
3.5	6188.5	5.8057	2.0628
4	6190.94	6.66216	2.0636
4.5	6197.77	7.51902	2.0659
5	6198.45	8.38114	2.0662
5.5	6169.75	9.28934	2.0566



شکل ۲: نمودار لنگر-تغییر مکان در مقایسه با آزمایش

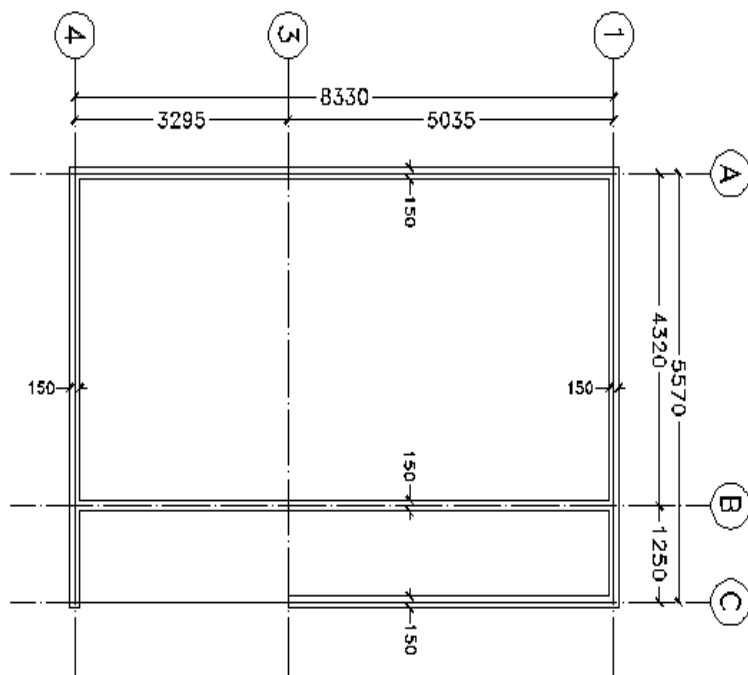
۳- بررسی تأثیر مشخصات مکانیکی بتن در عملکرد دال بتن مسلح

در این قسمت به منظور بررسی تأثیر عوامل رفتاری بتن در تغییر شکل های دال بتن مسلح، مدل های مختلفی ساخته شده است. نبود نتایج آزمایشگاهی کامل سبب شده که از مدل های عددی پیشینیان و رگرسیون غیرخطی بهره گرفته شود.

۳-۱- مشخصات هندسی مدل

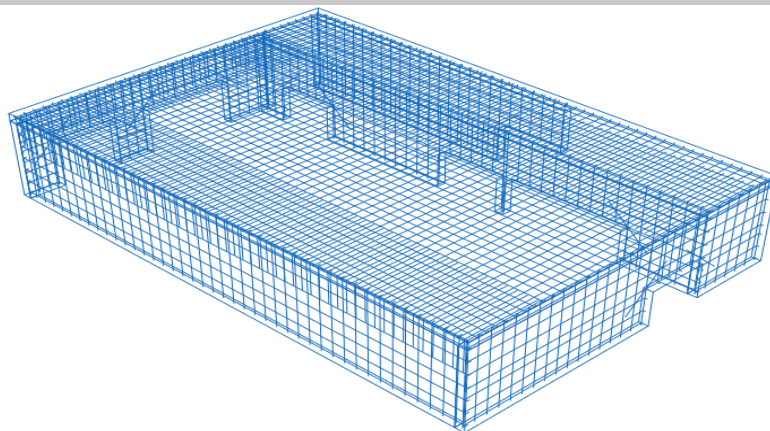
سازه ی مدل سازی شده در نرم افزار، یک سازه ی مبتنی بر سیستم دال-دیوار می باشد. این سازه شامل دال و دیوارهای بتنی مسلح بوده که در آن بازشوهایی به منظور ایجاد در و پنجره نیز تعبیه شده است.

شکل ۳، پلان موقعیت دیوارها، محورهای سازه و همچنین ضخامت دیوارها را نشان می دهد.



شکل ۳: پلان موقعیت دیوارها

آرماتورگذاری سازه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. آرماتورگذاری دال شامل دو شبکه ی مثبت در پایین و منفی در بالای دال می باشد. طول آرماتورهای منفی در محورهای ۱ و A برابر ۱۲۰ سانتیمتر و در محور B، ۲ متر می باشد. همچنین فواصل آرماتورگذاری هر ۱۵ سانتیمتر و شماره ی آرماتورها در تمام سازه از میلگرد ۱۰ انتخاب شده است. آرماتورهای دال با فرض پوشش بتن به اندازه ی ۳۰ میلی متر و آرماتورهای دیوارها در وسط جایگذاری شده اند. ضخامت دال برابر ۱۵ سانتیمتر می باشد. لازم به ذکر است که کلیه ی المان های این مدل براساس نقشه های اجرایی گذاشته شده است.



شکل ۴: آرماتورگذاری سازه در حالت سه بعدی

۳-۲-۳- مشخصات مصالح

۳-۲-۱- مشخصات مصالح فولاد

مشخصات مکانیکی فولاد که در اینجا تنها برای آرماتورها به کار می‌رود به شرح زیر می‌باشد. مدول الاستیسیته‌ی فولاد برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال، نسبت پواسون آن ۰/۳ و تنش جاری شدن برابر ۳۰۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۲- مشخصات مصالح بتن

نمونه‌های مورد آزمایش از نمونه‌ی مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر انتخاب شده‌اند که سیمان مصرفی در آن‌ها از تیپ II با عیار $350 \frac{kg}{m^3}$ می‌باشد.

جدول ۲: آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتن

مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای (MPa)	میانگین مقاومت فشاری	مقاومت فشاری kg/cm^2	وزن مخصوص gr/cm^3	سن نمونه (روز)
16.76	205.5	207	2.29	11
		204	2.29	11
22.96	281.5	279	2.29	42
		284	2.28	42
25.36	311	311	2.3	90

با توجه به لازم بودن مشخصات روزانه‌ی بتن و نبود نتایج آزمایشگاهی، ادامه‌ی کار با تحلیل عددی همین یک نمونه آزمایش پیش برده می‌شود.

$$f'_c(t) = f'_{c,\infty} \exp(at^b)$$

در این رابطه، $f'_c(t)$ مقاومت فشاری بتن در سن t ، $f'_{c,\infty}$ مقاومت فشاری نهایی بتن، t سن بتن برحسب روز، a و b هم ثابت‌های تابع هستند.

تابعی که بتواند از نقاط جدول فوق عبور کرده و در شکل کلی تابع نمایی پیشنهادی نیز قرار بگیرد به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$f'_c(t) = 27 \exp(-4.048t^{-0.8865}) ; R^2 = 0.9995$$

$f'_c(t)$ ، برحسب مگا پاسکال در این تابع محاسبه می شود.

لازم به ذکر است مقاومت فشاری نهایی مورد استفاده در فرمول نیز به صورت تقریبی، مقداری بیشتر از مقدار متناظر با سن ۹۰ روز انتخاب شده است.

شبهه آنچه برای مقاومت فشاری انجام شد، مدول الاستیسیتهی بتن را نیز می توان به صورت تابعی از سن بتن تعریف کرد. البته با این تفاوت که در این حالت، هیچ مقدار آزمایشگاهی از مدول الاستیسیتهی بتن در اختیار نیست؛ و لذا تنها به استفاده از تابعی که برای مدول الاستیسیتهی بتن پیش از این ارائه شد بسنده می کنیم.

$$E_0(t) = E_{0,\infty} \exp(at^b)$$

در این رابطه، t ، سن بتن برحسب روز و مقادیر ثابت های a و b به ترتیب برابر ۵- و 0.63 - می باشند. مقدار مدول الاستیسیتهی نهایی بتن را می توان با استفاده از رابطه ی پیشنهادی آیین نامه تقریب زد.

$$E_{0,\infty} = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{27} \sim 25 \text{ GPa}$$

$$E_0(t) = 25 \exp(-5t^{-0.63}) \quad ; \quad E_0(\text{GPa})$$

در گام نهایی تعیین مشخصات مکانیکی بتن، نوبت به ترسیم نمودار تنش-کرنش بتن در فاز فشاری می رسد. به همین منظور مدل اسمیت و یانگ برای ترسیم رفتار تنش-کرنش بتن در فاز فشاری انتخاب شده است.

جدول ۳: مشخصات مکانیکی بتن بر اساس مدل اسمیت و یانگ

Smith and Young				
t(day)	(Mpa) f'_c	E_0 (Mpa)	ϵ_c	E_c (Mpa)
1	0.4713	168.4487	0.007606	61.9707
2	3.0228	988.0655	0.008316	363.4999
3	5.8551	2046.8887	0.007775	753.0309
4	8.2597	3099.2372	0.007244	1140.1800
5	10.2162	4075.3336	0.006814	1499.2766
6	11.8109	4961.8759	0.006470	1825.4271
7	13.1264	5762.9124	0.006191	2120.1208
14	18.2783	9685.7460	0.005130	3563.2941
28	21.8633	13546.9049	0.004387	4983.7778
90	25.0502	18638.8477	0.003653	6857.0553

۳-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

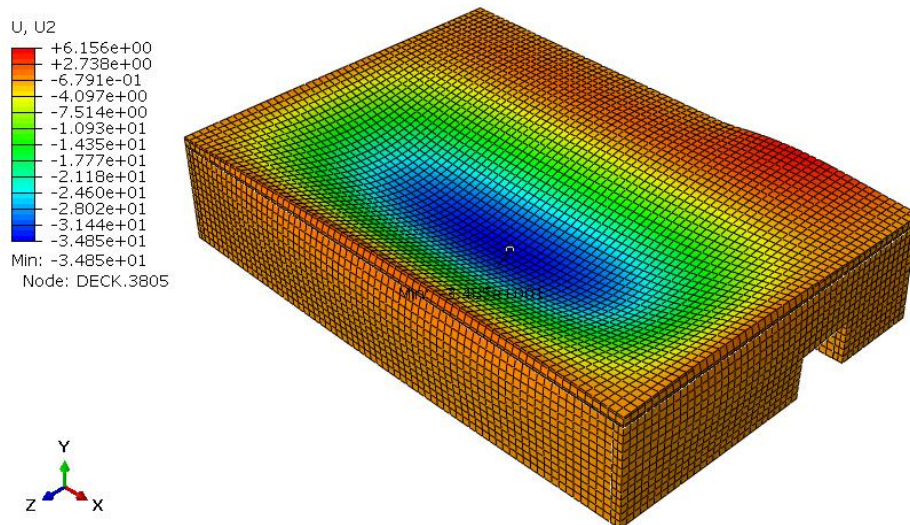
در مدل سازی نمونه ی سازی اجرا شده، بنابر آنچه مک کورمک بیان کرده نیمه ی بالایی طبقه ی آخر ساختمان در نظر گرفته شده است [4]. بنابراین تنها قیودی که به سازه اعمال شده است، در مقطع برش خورده ی دیوارها می باشد که به صورت تکیه گاه های مفصل برشی مقید شده اند. از آنجایی که مدل مورد مطالعه در شرایطی بررسی شده که تنها تحت اثر وزن دال تغییر شکل داده و هیچ گونه بارگذاری خارجی به سازه اعمال نشده، تنها بارگذاری اعمالی در نرم افزار وزن سازه می باشد که با اعمال شتاب جاذبه ی زمین به اندازه ی $9810 \frac{mm}{s^2}$ به کل سازه، لحاظ شده است.

۳-۴- نوع تحلیل

نوع تحلیلی که در اینجا انجام شده، برای همه ی انواع مدل ها، تحلیل استاتیکی غیرخطی می باشد که تغییرشکل های بزرگ نیز در آن ها در نظر گرفته شده است.

۳-۵- بررسی تأثیر مدول الاستیسیته ی بتن در خیز دال

نمونه ای از سازه ی تغییرشکل یافته که برای بتن در سن دو روز انجام شده را می توان در شکل ۵ مشاهده کرد.



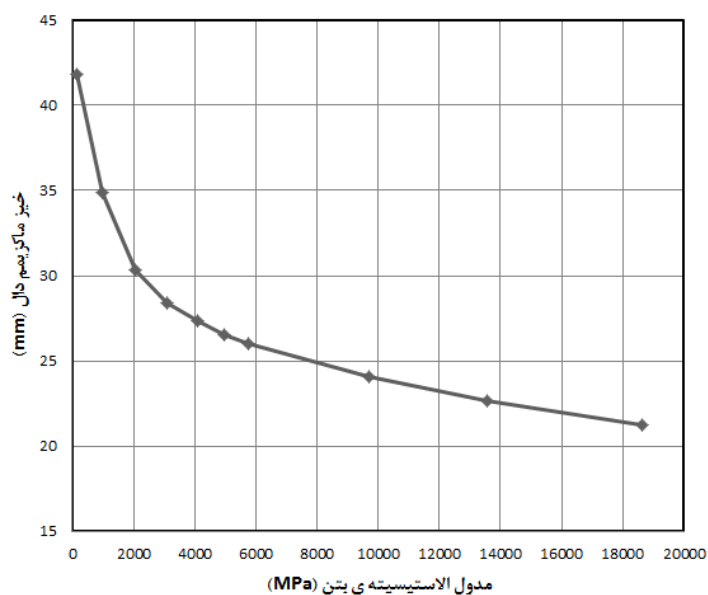
شکل ۵: تغییر شکل سازه در سن ۲ روز

به همین ترتیب برای دیگر سنین بتن نیز سازه مورد تحلیل قرار گرفته و تغییرشکل های آن بررسی شده اند. نتایج حاصل از تحلیل در جدول ۴ ثبت شده است.

جدول ۴: خیز ماکزیمم دال بر حسب تغییر مدول الاستیسیته ی بتن

بتن سن (روز)	مدول الاستیسیته (Mpa)	خیز ماکزیمم دال (mm)
1	168.4487	41.78
2	988.0655	34.85
3	2046.8887	30.30
4	3099.2372	28.42
5	4075.3336	27.32
6	4961.8759	26.57
7	5762.9124	26.01
14	9685.7460	24.04
28	13546.9049	22.66
90	18638.8477	21.22

بنابر جدول فوق مشخصات مکانیکی بتن از جمله مدول الاستیسیته در هر سن محاسبه و در نرم افزار وارد شده است. پس از طی فرآیند تحلیل اجزای محدود سازه، تغییرشکل های سازه و خیز ماکزیمم دال برداشت شده اند. شکل ۶ نمودار تغییرات خیز ماکزیمم دال را بر طبق جدول ۴ نشان می دهد.



شکل ۶: تغییرات خیز ماکزیمم دال بر حسب تغییرات مدول الاستیسیته ی بتن

همانطور که در نمودار شکل ۶ مشاهده می شود، ماکزیمم خیز دال در قالب برداری پس از یک روز که مدول الاستیسیته ی بتن خیلی ناچیز است، به بیش از ۴ سانتیمتر رسیده است. اما اگر همین عملیات قالب برداری به دو روز بعد موکول می شد، یعنی بتن به سن سه روزه رسیده و مدول یانگ آن حدود ۲ گیگا پاسکال شده است، آن وقت ماکزیمم خیز دال به ۳ سانتیمتر کاهش می یافت. دقت شود که در این حالت، مدول الاستیسیته تنها به ۸ درصد مدول نهایی رسیده است. به همین ترتیب اگر قالب برداری پس از گذشت یک هفته انجام شده، که مدول الاستیسیته به ۲۳ درصد مقدار نهایی خود رسیده باشد، خیز ماکزیمم دال ۶۰ درصد از مقدار یک روزه کمتر می شد.

علاوه ی بر این ها مشاهده می شود که در سنین سه روز و کمتر از آن، مدول الاستیسیته ی بتن خیلی کم بوده و تغییرشکل های دال بسیار زیاد است. اما همین روند در سنین پس از سه روز تا هفت روز بهبود چشمگیری داشته و باعث می شود که تغییرشکل های دال کمتر شده و اطمینان از برداشت قالب ها بالاتر رود. فرآیند قالب برداری پس از سن هفت روز بنابر داده های جدول و سیری که نمودار نشان می دهد، خیلی تأثیری در کاهش خیز نداشته و تنها به منظور پیدا کردن دید بهتری از تأثیر مدول یانگ در اینجا آورده شده است.

۳-۶- بررسی تأثیر مقاومت فشاری بتن در خیز دال

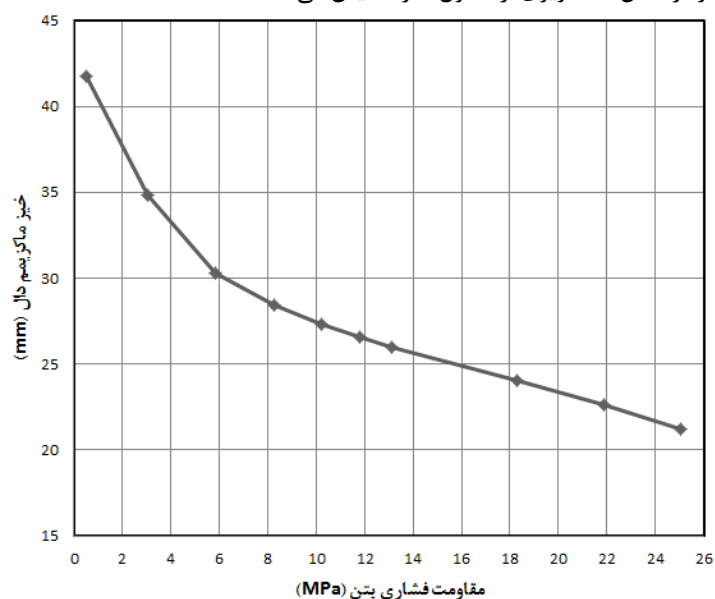
از آنجایی که مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف مقدار ثابتی نداشته و رفته رفته افزایش می یابد، خود می تواند عاملی مهم و تأثیرگذار در تغییرشکل های دال باشد. در ادامه نتایج حاصل از این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: خیز ماکزیمم دال بر حسب تغییر مقاومت فشاری بتن

بتن سن (روز)	مقاومت فشاری (Mpa)	خیز ماکزیمم دال (mm)
1	0.5184	41.78
2	3.0228	34.85
3	5.8551	30.30

4	8.2597	28.42
5	10.2162	27.32
6	11.8109	26.57
7	13.1264	26.01
14	18.2783	24.04
28	21.8633	22.66
90	25.0502	21.22

نمودار شکل ۷ تصویری از جدول ۵ را نمایش می دهد.



شکل ۷: تغییرات خیز ماکزیمم دال بر حسب تغییرات مقاومت فشاری بتن

در توضیح تأثیر مقاومت فشاری بتن در قالب برداری در سنین مختلف می توان گفت که، مقاومت فشاری بتن در سن سه روز بر اساس داده های جدول ۴-۴ به بیش از ۲۱ درصد مقدار نهایی خود رسیده است. این در صورتی است که اگر برداشتن قالبها به یک هفته پس از بتن ریزی دال موکول شود، مقدار مقاومت فشاری بتن به نزدیک ۵۰ درصد مقاومت فشاری نهایی می رسد. به منظور مقایسه ی همزمان میزان تأثیر مشخصات مکانیکی بتن، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری، می توان با نرمال کردن محورهای افقی نمودارهای شکل ۶ و شکل ۷ نسبت به مقادیر نهایی آنها، قضاوت بهتری انجام داد. نتایج این عمل در جدول ۶ ارائه شده اند.

جدول ۶: میزان تأثیر نسبت های مدول الاستیک و مقاومت فشاری بتن در خیز ماکزیمم دال

خیز ماکزیمم دال (mm)	مقاومت فشاری نرمال شده	مدول الاستیسیته نرمال شده	سن (روز)	بتن
41.78	0.02	0.01	1	
34.85	0.11	0.04	2	
30.30	0.22	0.08	3	
28.42	0.31	0.12	4	
27.32	0.38	0.16	5	
26.57	0.44	0.20	6	
26.01	0.49	0.23	7	
24.04	0.68	0.39	14	
22.66	0.81	0.54	28	
21.22	0.93	0.75	90	

۴- نتایج

- علت اصلی استفاده از رابطه ی کنراد برای مدول الاستیسیته و تابع رگرسیون نمایی برای مقاومت فشاری به جای روابط موجود در آیین ها، عدم صحت روابط آیین نامه ای در سنین ابتدایی بتن است.
- همانطور که از داده های جدول ۴-۵ ملاحظه می شود، مدول الاستیک بتن در کاهش خیز دال مؤثرتر از مقاومت فشاری آن می باشد. چرا که اگر سن ۷ روزه را به عنوان نمونه انتخاب کنیم، مشاهده می شود که مقاومت فشاری بتن به حدود نیمی از مقاومت فشاری نهایی خود رسیده اما مدول الاستیسیته ی آن به ۲۵ درصد مدول نهایی هم نرسیده است.
- اگر نیاز به قالب برداری در سنین ابتدایی بتن باشد، بنابر نتایج جدول ۴-۵ بایستی فکری برای افزایش مدول الاستیسیته ی بتن برداشته شود.

منابع

- [1] S. C. Jain and J. B. Kennedy, "Yield Criterion for Reinforced Concrete Slabs," *Journal of Structural Division, American Society of Civil Engineering*, vol. 100, p. 631-644, 1974.
- [2] G. M. Smith and L. E. Young, "Ultimate Flexural Analysis Based on Stress-Strain Curves of Cylinders," *Journal of ACI*, vol. 53, no. 12, pp. 597-609, 1956 .
- [3] M. Conrad, M. Aufleger and A. H. Malkawi, "Investigations on the Modulus of Elasticity of young RCC," in *International symposium on roller compacted concrete (RCC) dams; Roller compacted concrete dams*, Rotterdam, 2003 .
- [4] J. C. McCormac and R. H. Brown, "Two-Way Slabs, Equivalent Frame Method," in *Design of Reinforced Concrete*, United States of America, John Wiley and Sons, 2014, pp. 538-539.