

# مرور مقایسه‌ی معتبرترین روش‌های برآورد رفتار درازمدت بتن تحت آنالیز متداول یک مرحله‌ی و آنالیز غیرخطی مرحله‌ی

محمد جلیل‌زاده افشاری\* (دانشجوی دکتری)

علی خیرالدین (استاد)

مجید قلهکی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (۱۳۹۷)  
دوره ۲ - ۳۴، شماره ۱/۴، ص. ۱۳۱-۱۴۴، (پادداست شریف)

طی سال‌های اخیر، لزوم تطابق مراحل عملی اجرا و طراحی سازه‌های بلند بتن‌آرمه با در نظر گرفتن رفتار درازمدت بتن، از طریق آنالیز غیرخطی مرحله‌ی، منطبق بر توالی ساخت همواره مورد توصیه‌ی اکید پژوهشگران بوده است. در نوشتار حاضر، مهم‌ترین روش‌های پیش‌بینی رفتار درازمدت بتن، معرفی و روابط پیشنهادی جهت بیان چگونگی اعمال مشخصه‌های روش‌های مذکور در نرم‌افزارهای متعارف به روز تحلیل و طراحی ارائه شده است. همچنین جهت آشنایی با شیوه‌ی محاسبه‌ی دستی آثار خزش و آب‌رفتگی، نحوه‌ی پیاده‌سازی دقیق روش فینتل و خان، با تشکیل جدول‌های قبل و بعد از ساخت و لحاظ تغییراتی که روش‌نگر وجوه مبهم روش باشد، بیان شده است. حصول انطباق مناسب نتایج با مقادیر حاصل از مدل‌سازی المان محدود، بیانگر امکان ارائه‌ی مثال مورد بررسی به‌عنوان نمونه‌ی قابل استناد جهت صحت‌سنجی و کالیبراسیون خطای مدل‌سازی است.

jalilzadeh.afshari@semnan.ac.ir  
kheyrodin@semnan.ac.ir  
mgholhaki@semnan.ac.ir

واژگان کلیدی: آنالیز غیرخطی توالی ساخت، آنالیز متداول، کوتاه‌شدگی ستون، خزش، آب‌رفتگی، مدول کشسانی.

## ۱. مقدمه

کامل هر روش، دستاوردهای پژوهش حاضر نیز در خصوص بهبود روش مذکور یا ارائه‌ی روابط پیشنهادی جهت اعمال روش موردنظر در نرم‌افزارهای متداول تحلیل و طراحی ارائه شود. از دیگر اهداف نوشتار حاضر، بیان شیوه‌ی محاسبه‌ی دستی آثار خزش و آب‌رفتگی با پیاده‌سازی دقیق روش فینتل و خان از طریق تشکیل جدول‌های قبل و بعد از ساخت، به گونه‌ی است که با اعمال تغییراتی ساده، وجوه مبهم روش مذکور برطرف و پس از حصول انطباق مناسب نتایج با مقادیر حاصل از روش مشابه PCA که قابلیت مدل‌سازی المان محدودی دارد، امکان ارائه‌ی مثالی قابل استناد جهت صحت‌سنجی و کالیبراسیون خطای مدل‌سازی مهیا شود. از دیگر اهداف نوشتار حاضر، مقایسه‌ی کوتاه‌شدگی ستون در مثالی یکسان برای کلیه‌ی روش‌های مورد بررسی، تحت دو آنالیز متداول یک مرحله‌ی و آنالیز مرحله‌ی توالی ساخت پس از گذشت ۱۰۰۰ روز از زمان ساخت است.

## ۲. روش‌های برآورد رفتار دراز مدت بتن

بررسی آثار درازمدت بتن تحت تحلیل متداول یک مرحله‌ی و تحلیل مرحله‌ی غیرخطی، در ابتدا مستلزم شناخت روش‌های اعمال پدیده‌های وابسته به زمان بتن

طی سال‌های اخیر، توجه به تطابق طراحی سازه با مراحل عملی اجرا از طریق وارد کردن تقدم و تأخر برنامه‌ی ساخت در طراحی سازه در قالب تحلیل مرحله‌ی توالی ساخت، همواره مورد توصیه‌ی اکید پژوهشگران بوده است.<sup>[۱]</sup> غفلت از تحلیل غیرخطی مرحله‌ی سازه می‌تواند منجر به بروز مشکلات بسیاری در تحلیل و طراحی سازه‌های بلندمرتبه شود. از جمله‌ی مسائل ذکر شده می‌توان کوتاه‌شدگی تجمعی ستون‌ها،<sup>[۲]</sup> لنگرهای اضافی در اعضاء سازه‌ی افقی، نظیر: تیرها ناشی از تغییرشکل‌های محوری متفاوت اعضاء سازه‌ی مجاور و بازپخش قابل توجه تنش در بین المان‌های سازه‌ی، افزایش خیز تیرهای بتنی،<sup>[۳]</sup> گسترش ترک‌های پیش‌رونده در اعضاء غیرسازه‌ی و پانل‌های با تغییرشکل‌های نقلی ناهمگون و عدم استفاده از ظرفیت در نظر گرفته‌شده در طراحی اعضاء سازه،<sup>[۴]</sup> را به‌عنوان آثار نامطلوبی نام برد که در نظر گرفتن پدیده‌های وابسته به زمان سازه‌های بتنی، نظیر خزش و جمع‌شدگی (آب‌رفتگی)، منجر به تشدید آن‌ها نیز می‌شوند. از این رو هدف نوشتار حاضر، آشنایی کامل با معتبرترین روش‌های اعمال رفتار درازمدت بتن در تحلیل به گونه‌ی است که ضمن شناخت

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۱۳، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۲۳

DOI: 10.24200/J30.2019.1436

در تحلیل است. از این رو در ابتدا، مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش‌های موجود با بیان محدودیت‌های کاربرد و معایب و مزایای هر یک ارائه شده است.

### ۱.۱.۲ CEB-FIP

آیین‌نامه‌ی CEB-FIP، یکی از قدیمی‌ترین و معتبرترین کدهای شناخته‌شده در خصوص برآورد پدیده‌های سه‌گانه وابسته به زمان بتن است که به دلیل سادگی روابط و روند محاسبات<sup>[۱۸]</sup> به طور قابل ملاحظه‌ی مورد استفاده‌ی پژوهشگران قرار دارد. تفاوت‌های عمده و اساسی در پیش‌بینی رفتار درازمدت بتن که در بین دو نسخه‌ی اصلی سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۱۰ وجود دارد، در قالب دو بخش جداگانه‌ی CEB-FIP ۱۹۹۰ و CEB-FIP ۲۰۱۰ بررسی اجمالی شده است. در ابتدا، ضوابط یکسان و مشترک بین نسخ یادشده ارائه شده‌اند: در کلیه‌ی روابط مورد استفاده‌ی پیش رو،  $t$  سن بتن (به روز)،  $t_0$  سن بتن (به روز) در زمان بارگذاری،  $t_s$  سن بتن (به روز) در زمان شروع آبرفتگی یا تورم است که با پایان دوره‌ی عمل‌آوری مرطوب شروع می‌شود،  $RH$  درصد رطوبت محیط و  $h$  بُعد نظری<sup>۱</sup> عضو بر حسب میلی‌متر است که از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$h = \frac{2A_c}{u} \quad (1)$$

که در آن،  $A_c$  سطح مقطع عضو و  $u$  محیط عضو در تماس با اتمسفر است. مقاومت فشاری مورد استفاده در محاسبه‌ی خزش و آبرفتگی، مقاومت فشاری میانگین ( $f_{cm}$ ) است که در سن ۲۸ روز از رابطه‌ی ۲، بر حسب مگاپاسکال حاصل می‌شود و مدول کشسانی ۲۸ روزه‌ی بتن نیز با استفاده از آن و مطابق رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید.

$$f_{cm} = f_{ck} + \lambda MPa \quad (2)$$

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 (f_{cm}/100)^{1/2} \quad (3)$$

که در آن،  $f_{ck}$  مقاومت فشاری مشخصه‌ی ۲۸ روزه‌ی بتن ( $MPa$ ) است. چگونگی رشد مقاومت فشاری میانگین و مدول کشسانی بتن با گذشت زمان در سن دلخواه  $t$ ، به ترتیب از حاصل ضرب توابع نمایی<sup>۲</sup> در مقاومت فشاری میانگین و مدول کشسانی ۲۸ روزه‌ی بتن مطابق روابط ۴ و ۵ حاصل می‌شود. اثر نوع سیمان در تخمین سن بارگذاری ( $t_0$ ) به صورت رابطه‌ی ۶ قابل تعریف است:

$$f_{cm}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \times f_{cm} \quad (4)$$

$$E_{ci}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \times E_{ci} \quad (5)$$

$$t_0 = t_{0,T} \times \left[ \frac{9}{2 + (t_{0,T})^{1/2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ روز} \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $s$  و  $\alpha$  ضرایب وابسته به نوع سیمان مصرفی با مقادیر مندرج در جدول ۱،  $t_{0,T}$  سن بارگذاری معادل حرارتی بتن (به روز) ناشی از اعمال اثر درجه حرارت در بلوغ بتن و متعاقباً در خزش مؤثر در سازه قبل از بارگذاری است و مطابق رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13,65 - \frac{4000}{2773 + T(\Delta t_i)} \right] \quad (7)$$

که در آن،  $t_T$  سن معادل حرارتی بتن (به روز) است که جایگزین  $t$  در تمامی معادلات مرتبط خواهد شد،  $\Delta t_i$  تعداد روزهایی است که درجه حرارت  $T$  (به سانتی‌گراد)

جدول ۱. ضرایب به‌کاررفته در روابط (۴ الی ۶) برای انواع سیمان.

طبقه‌بندی سیمان		$\alpha$	$s$
CEB-FIP ۲۰۱۰	CEB-FIP ۱۹۹۰		
۳۲,۵ N	دیرگیر (SL)	-۱	۰,۳۸
۳۲,۵ R, ۴۲,۵ N	نرمال و زودگیر (N&R)	۰	۰,۲۵
۴۲,۵ R, ۵۲,۵ N, ۵۲,۵ R	زودگیر با مقاومت بالا (RS)	+۱	۰,۲

تداوم می‌یابد و  $T(\Delta t_i)$  درجه حرارتی (به سانتی‌گراد) است که در بازه‌ی زمانی  $\Delta t_i$  اتفاق می‌افتد. این تذکر لازم است که کلیه‌ی روابط مورد استفاده در روش CEB-FIP بر پایه‌ی درجه حرارت مینا و معیار ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است و تنظیم حرارتی زمان و سن بارگذاری بتن از طریق رابطه‌ی ۶ برای درجه‌ی دمای مذکور ضروری نیست و در صورت استفاده از سیمان با زمان گیرایش نرمال ( $N$ )، سن بارگذاری عضو ( $t_0$ )، همان سن بارگذاری معادل حرارتی بتن ( $t_0, T$ ) است.

### ۱.۱.۲ CEB-FIP ۱۹۹۰

خزش: کلیه‌ی روابط پیشنهادی روش مورد بررسی، در محدوده‌ی مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه بین ۱۲ تا ۸۰ مگاپاسکال، رطوبت محیط بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد و دمای محیط بین ۵ تا ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد معتبر است.<sup>[۸]</sup> در محدوده‌ی که قدرمطابق تنش محوری کوچک‌تر از ۰,۴<sup>۰</sup> مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه‌ی بتن باشد، رابطه‌ی کرنش خزشی و تنش خطی است. در این حالت کرنش خزشی  $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  وابسته به تنش ثابت، مطابق رابطه‌ی ۸ خواهد بود:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = \sigma_c(t_0) J(t, t_0) \quad (8)$$

که در آن،  $E_c(t_0)$  مدول کشسانی در زمان بارگذاری و در نتیجه  $1/E_c(t_0)$  بیانگر کرنش اولیه بر واحد تنش و  $J(t, t_0)$  تابع خزش یا تابع انطباق<sup>۳</sup> و مبین کرنش وابسته به تنش بر واحد تنش است. ضریب بی بُعد خزش  $\phi(t, t_0)$  مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (9)$$

که در آن،  $\phi_0$  از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$\phi_0 = \left( 1 + \frac{1 - RH/100}{0,46(h/100)^{1/2}} \right) \cdot \left[ \frac{5,3}{(f_{cm}/100)^{0,75}} \right] \cdot \beta(t_0) \quad (10)$$

و در آن،  $\beta(t_0)$  از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$\beta(t_0) = \left( \frac{1}{0,1 + t_0^{0,7}} \right) \quad (11)$$

همچنین  $\beta_c(t - t_0)$  و  $\beta_H$  از رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آیند:

$$\beta_c(t - t_0) = \left[ \frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,7} \quad (12)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + (1/2 \frac{RH}{100})^{1,8} \right\} \frac{h}{100} + 250 \leq 1500 \quad (13)$$

که در آن‌ها،  $\beta_c(t - t_0)$  ضریب مبین نحوه‌ی رشد خزش پس از بارگذاری است.

آبرفتگی: کرنش آبرفتگی یا تورمی  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$  مطابق رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (14)$$

که در آن‌ها،  $\beta_{dc}(t, t_0)$  ضریب مبین نحوه‌ی رشد خزش خشک‌شونده با گذشت زمان است.

-- آبرفتگی: کرنش آبرفتگی نهایی  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ ، از جمع آبرفتگی خود به خودی  $\varepsilon_{cas}(t)$  و آبرفتگی خشک‌شونده  $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ ، به صورت رابطه‌ی ۲۶ حاصل می‌شود.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (26)$$

که در آن،  $\varepsilon_{cas}(t)$  از رابطه‌های ۲۷ به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{cas}(t) = \left[ -\alpha_{as} \left( \frac{f_{cm}/10^0}{6 + f_{cm}/10^0} \right)^{2,5} \times 10^{-6} \right] \beta_{as}(t) \quad (27)$$

که در آن،  $\beta_{as}(t)$  و  $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$  از رابطه‌های ۲۸ و ۲۹ به دست می‌آیند:

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2\sqrt{t}) \quad (28)$$

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \beta_{RH}(RH) \varepsilon_{cds^0}(f_{cm}) \beta_{ds}(t - t_s) \quad (29)$$

که در آن‌ها،  $\varepsilon_{cds^0}(f_{cm})$ ،  $\beta_{ds}(t - t_s)$  و  $\beta_{RH}(RH)$  از رابطه‌های ۳۰ الی ۳۳ به دست می‌آیند:

$$\varepsilon_{cds^0}(f_{cm}) = [(22^0 + 11^0 \alpha_{ds1}) \exp(\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \times 10^{-6} \quad (30)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left( \frac{t - t_s}{0,7 \cdot 35h^2 + t - t_s} \right)^{0,5} \quad (31)$$

$$\beta_{RH}(RH) = -1,55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{10^0} \right)^2 \right] \quad (32)$$

$$0,4^0 \leq RH < 0,99\beta_{s1}$$

$$\beta_{RH}(RH) = +0,25 \quad RH \geq 0,99\beta_{s1} \quad (32)$$

$$\beta_{s1} = \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,1} \leq 1 \quad (33)$$

که در آن‌ها،  $\beta_{ds}(t - t_s)$  ضریب مبین نحوه‌ی رشد آبرفتگی خشک‌شونده با گذشت زمان است. سایر پارامترهای مورداستفاده‌ی روابط ۲۷ و ۳۰، در جدول ۲ ارائه شده است.

### ۲.۲.۲. ACI

روش آیین‌نامه‌ی ACI در قالب کمیته‌ی ۲۰۹ (ACI 209R-92)، ساده‌ترین روش شناخته‌شده در میان روش‌های معتبر برآورد رفتار درازمدت بتن است، که با وجود سادگی، وجوه گسترده‌تری از خواص مصالح مؤثر در پدیده‌های سه‌گانه وابسته به زمان بتن را در روابط منعکس می‌کند.<sup>[۱۰]</sup> در روش ACI، ابتدا شرایط استاندارد تعریف و براساس آن روابط پیش‌بینی‌کننده‌ی تغییرات زمانی خزش و آبرفتگی

جدول ۲. ضرایب به‌کار رفته در روابط ۲۷ و ۳۰.

$\alpha_{ds2}$	$\alpha_{ds1}$	$\alpha_{as}$	نوع سیمان
0,13	3	800	۳۲,۵N
0,12	4	700	۳۲,۵R, ۴۲,۵N
0,12	6	600	۴۲,۵R, ۵۲,۵N, ۵۲,۵R

که در آن،  $\beta_{RH}$ ،  $\varepsilon_s(f_{cm})$  و  $\beta(t - t_s)$  از رابطه‌های ۱۵ الی ۱۷ به دست می‌آیند:

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [16^0 + 1^0 \beta_{sc}(9 - f_{cm}/10^0)] \times 10^{-6} \quad (15)$$

$$\beta_{RH} = -1,55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{10^0} \right)^2 \right] \quad 0,4^0 \leq RH < 0,99 \quad (16)$$

$$\beta_{RH} = +0,25 \quad RH \geq 0,99$$

$$\beta_s(t - t_s) = \left[ \frac{t - t_s}{0,7 \cdot 35h^2 + t - t_s} \right]^{0,5} \quad (17)$$

که در آن‌ها،  $\beta_{sc}$  ضریب وابسته به نوع سیمان مصرفی است که برای سیمان‌های دیرگیر برابر ۴، برای سیمان‌های نرمال یا زودگیر برابر ۵ و برای سیمان‌های زودگیر با مقاومت بالا برابر ۸ خواهد بود و  $\beta_s(t - t_s)$  ضریب مبین نحوه‌ی رشد آبرفتگی با گذشت زمان است.

### ۲.۱.۲. CEB-FIP 2010

کلیه‌ی روابط پیشنهادی روش ذکرشده، در محدوده‌ی مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه بین ۲۰ تا ۱۳۰ مگاپاسکال، رطوبت محیط بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد، و دمای محیط بین ۵ تا ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد معتبر است. مهم‌ترین وجه تمایز و برایش سال ۲۰۱۰ نسبت به سال ۱۹۹۰، تفکیک خزش کلی به دو خزش پایه و خزش خشک‌شونده و نیز تفکیک آبرفتگی کلی به مؤلفه‌های آبرفتگی خودکار و آبرفتگی خشک‌شونده است.<sup>[۹]</sup> نمود عینی تفکیک مذکور در روابط محاسباتی مربوط به خزش و آبرفتگی به ترتیب در بخش‌های آتی مورد بازبینی قرار خواهد گرفت.

-- خزش: ضریب بی‌بعد خزش  $\phi(t, t_0)$  از جمع ضرایب خزش پایه  $\phi_{bc}(t, t_0)$  و خزش خشک‌شونده  $\phi_{dc}(t, t_0)$ ، مطابق رابطه‌ی ۱۸ حاصل می‌شود:

$$\phi(t, t_0) = \phi_{bc}(t, t_0) + \phi_{dc}(t, t_0) \quad (18)$$

که در آن،  $\phi_{bc}(t, t_0)$  و  $\phi_{dc}(t, t_0)$  از روابط ۱۹ و ۲۰ به دست می‌آیند:

$$\phi_{bc}(t, t_0) = \left[ \frac{1,8}{(f_{cm})^{0,7}} \right] \ln \left[ (30/t_0 + 0,7 \cdot 35)^2 \cdot (t - t_0) + 1 \right] \quad (19)$$

$$\phi_{dc}(t, t_0) = \left( \frac{1 - RH/10^0}{\sqrt{h/10^0}} \right) \beta_{dc}(f_{cm}) \beta_{dc}(t_0) \beta_{dc}(t, t_0) \quad (20)$$

که در آن‌ها،  $\beta_{dc}(f_{cm})$ ،  $\beta_{dc}(t_0)$  و  $\beta_{dc}(t, t_0)$  از روابط ۲۱ الی ۲۳ به دست می‌آیند:

$$\beta_{dc}(f_{cm}) = 412 (f_{cm})^{-1,2} \quad (21)$$

$$\beta_{dc}(t_0) = (0,1 + t_0^{0,2})^{-1} \quad (22)$$

$$\beta_{dc}(t, t_0) = \left( \frac{t - t_0}{\beta_h + t - t_0} \right)^{\gamma(t_0)} \quad (23)$$

که در آن،  $\gamma(t_0)$  و  $\beta(h)$  از رابطه‌های ۲۴ و ۲۵ به دست می‌آیند:

$$\gamma(t_0) = \left( 2,3 + \frac{3,5}{\sqrt{t_0}} \right)^{-1} \quad (24)$$

$$\beta_h = 1,5h + 250 \cdot \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \leq 1500 \cdot \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \quad (25)$$

جدول ۳. ثابت‌های به‌کار رفته در رابطه‌ی ۳۴.

ثابت	عمل‌آوری مرطوب		عمل‌آوری با بخار	
	سیمان تیپ I	سیمان تیپ III	سیمان تیپ I	سیمان تیپ III
$\alpha$	۴	۲٫۳	۱	۰٫۷
$\beta$	۰٫۸۵	۰٫۹۲	۰٫۹۵	۰٫۹۸

استاندارد برابر ۱ و در غیر این صورت شکل حاصل ضرب ضرایبی مطابق رابطه‌ی ۳۸ است:

$$\gamma_c = \gamma_c(t_0) \cdot \gamma_c(RH) \cdot \gamma_c(\nu/s) \cdot \gamma_c(sl) \cdot \gamma_c(\mu) \cdot \gamma_c(a) \quad (38)$$

که در آن،  $\gamma_c(t_0)$ ،  $\gamma_c(RH)$ ،  $\gamma_c(\nu/s)$ ،  $\gamma_c(sl)$ ،  $\gamma_c(\mu)$  و  $\gamma_c(a)$  به ترتیب اثر تغییر در سن بارگذاری استاندارد، درصد رطوبت استاندارد، نسبت حجم به سطح جانبی استاندارد، اسلامپ استاندارد، درصد ریزدانه‌ی استاندارد و درصد هوای استاندارد، مطابق روابط ۳۹ الی ۴۴ است:

$$\gamma_c(t_0) = 1,25(t_0)^{-0,118} \quad (39)$$

$$\gamma_c(RH) = 1,27 - 0,0067RH \quad RH > 70\% \quad (40)$$

$$\gamma_c(\nu/s) = (2,3) \{1 + 1,13 \exp[-0,0213(\nu/s)]\} \quad (41)$$

$$\gamma_c(sl) = 0,82 + 0,00264 \times sl \quad (42)$$

$$\gamma_c(\mu) = 0,88 + 0,0024 \times \mu \quad (43)$$

$$\gamma_c(a) = 0,46 + 0,09a \quad (44)$$

که در آن‌ها،  $(\nu/s)$ ،  $(sl)$ ،  $(\mu)$  و  $(a)$ ، به ترتیب نسبت حجم به سطح جانبی بر حسب میلی‌متر، اسلامپ بتن بر حسب میلی‌متر، درصد ریزدانه‌ی بتن و درصد هوای بتن هستند. در مواقعی که استفاده از ضخامت عضو ( $Th$  بر حسب میلی‌متر) به جای نسبت حجم به سطح جانبی مثلاً در خصوص دال‌ها، منطقی‌تر باشد، به جای رابطه‌ی ۴۱ می‌توان از رابطه‌ی ۴۵ استفاده کرد:

$$\gamma_c(Th) = 1,14 - 0,00092 \times Th \quad t - t_0 < \text{سال } 1 \quad (45)$$

$$\gamma_c(Th) = 1,1 - 0,00067 \times Th \quad t - t_0 \text{ برای مقدار نهایی} \quad (45)$$

با توجه به مرسوم بودن عمل‌آوری مرطوب بتن و محل کاربرد گسترده‌تر آن نسبت به عمل‌آوری با بخار، روابط ۳۹ الی ۴۵ که مختص شرایط عمل‌آوری مرطوب بتن هستند، در پژوهش حاضر ارائه شده است. روابط مذکور برای شرایط عمل‌آوری با بخار، مقادیری متفاوت ارائه می‌دهند.<sup>[۱۰]</sup> این تذکر لازم است که در نسبت زمانی رابطه‌ی ۳۷، آثار خزش پایه و خشک‌شونده تفکیک نشده و از آنجا که پارامترهای  $\psi$  و  $d$  در نسبت زمانی یادشده به شکل ضرایب ثابت فرض شده‌اند، لذا خواص ناشی از شکل و ابعاد نیز در رابطه‌ی مذکور بازتاب نمی‌یابد. برای تأثیر شکل و ابعاد عضو در منحنی خزش، از مقادیر رابطه‌ی ۴۶ به جای مقادیر متناظر پیشین  $\psi$  و  $d$  استفاده می‌شود:

$$d = 26 \exp[1,42 \times 10^{-2}(\nu/s)], \psi = 1 \quad (46)$$

این تذکر لازم است که روابطی جهت تفکیک خزش پایه از خزش کلی و اعمال آثار وابستگی دینامیکی مدول کشسانی به زمان توسط برخی پژوهشگران در قالب نسخ تکمیلی روش ACI 209 اضافه شده است که می‌تواند مورد استفاده‌ی علاقمندان قرار گیرد.<sup>[۶]</sup>

مطرح می‌شود. تغییر و عدول هر یک از شرایط مؤثر در خزش یا آبرفتگی نسبت به ضوابط استاندارد به شکل حاصل ضرب یک ضریب اصلاحی، به ترتیب در مقادیر نهایی ضریب خزش  $(\nu_u)$  یا کرنش نهایی آبرفتگی  $(\varepsilon_{sh})_u$ ، در روابط نمود می‌یابد. در ضوابط روش ACI، مقاومت فشاری مشخصه‌ی بتن در زمان دلخواه  $t$  ( $f'_c(t)$ )، به صورت حاصل ضرب نسبت زمانی<sup>۴</sup> (به شکل تابع هایپر بولیک<sup>۵</sup>) در مقاومت فشاری مشخصه‌ی ۲۸ روزه‌ی بتن ( $f_{ck}$ )، مطابق رابطه‌ی ۳۴ تعریف می‌شود. رشد زمانی مدول کشسانی بتن نیز به صورت تابعی از مقاومت فشاری بتن در هر زمان موردنظر و وزن حجمی بتن ( $w_c$ ) مطابق رابطه‌ی ۳۵ خواهد بود.

$$f'_c(t) = \frac{t}{\alpha + \beta t} f_{ck} \quad (34)$$

$$E_c(t) = 0,043 \times (w_c)^{1,5} \sqrt{f'_c(t)} \quad (35)$$

که در آن‌ها، مقاومت‌های فشاری بر حسب مگاپاسکال و وزن حجمی بتن بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است و پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت‌های وابسته به شرایط عمل‌آوری بتن و نوع سیمان مصرفی با مقادیر مندرج در جدول ۳ هستند.

شرایط استاندارد روش ACI برای حصول روابط خزش و آبرفتگی به این قرار است: سن بارگذاری بتن برابر ۷ روز برای عمل‌آوری مرطوب و ۱ و ۳ روز برای عمل‌آوری با بخار، رطوبت ۴۰ درصدی محیط، نسبت حجم به سطح جانبی عضو  $(\nu/s)$  ۳۸ میلی‌متر، اسلامپ ۷۰ میلی‌متری، درصد ریزدانه ۵۰٪، هوای بتن کمتر از ۶٪ و سیمان‌های مورد استفاده از نوع تیپ I و III با عیار بین ۲۷۹ تا ۴۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. کلیه‌ی شرایط ذکرشده در دامای معیار  $23,2 \pm 2$  درجه‌ی سانتی‌گراد معتبر است. این تذکر لازم است که نسبت حجم به سطح جانبی مورد استفاده‌ی روش ACI، نصف بُعد نظری مورد استفاده‌ی روش CEB-FIP است.

### ۱.۲.۲. خزش

کرنش خزشی  $\varepsilon_{cr}(t, t_0)$  وابسته به تنش ثابت  $\sigma_c(t_0)$ ، با توجه به رابطه‌ی خطی تنش و کرنش، مطابق رابطه‌ی ۳۶ خواهد بود:

$$\varepsilon_{cr}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\nu(t, t_0)}{E_c(t_0)} \right] = \sigma_c(t_0) \delta(t, t_0) \quad (36)$$

که در آن،  $E_c(t_0)$  مدول کشسانی در زمان بارگذاری و در نتیجه،  $\frac{1}{E_c(t_0)}$  بیانگر کرنش اولیه بر واحد تنش و  $\delta(t, t_0)$  تابع انطباق و مبین کرنش وابسته به تنش بر واحد تنش است. ضریب بی بُعد خزش  $\nu(t, t_0)$  مطابق رابطه‌ی ۳۷ محاسبه می‌شود:

$$\nu(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^\psi}{d + (t - t_0)^\psi} \nu_u \quad (37)$$

برای شرایط استاندارد مطرح‌شده،  $\psi$  برابر ۰٫۶،  $d$  برابر ۱۰ روز و  $\nu_u$  برابر ۲٫۳۵ در نظر گرفته می‌شود. این تذکر لازم است که ضریب نهایی خزش  $(\nu_u)$  در ضریب اصلاحی ( $\gamma_c$ ) ضرب خواهد شد که مقدار آن در صورت برقراری کلیه‌ی شرایط

کرنش آب رفتگی  $(\varepsilon_{sh})_t$  مطابق رابطه ۴۷ محاسبه می‌شود:

$$(\varepsilon_{sh})_t = \frac{(t - t_s)^\eta}{f + (t - t_s)^\eta} (\varepsilon_{sh})_u \quad (47)$$

برای شرایط استاندارد مطرح شده،  $\eta$  برابر ۱،  $f$  برای شرایط عمل‌آوری مرطوب و با بخار به ترتیب برابر ۳۵ و ۵۵ روز و  $(\varepsilon_{sh})_u$  برای شرایط عمل‌آوری مرطوب و عمل‌آوری با بخار به ترتیب برابر  $800 \times 10^{-6}$  و  $730 \times 10^{-6}$  است. با تقریب مناسب می‌توان از مقدار  $780 \times 10^{-6}$  برای هر دو نوع شرایط عمل‌آوری استفاده کرد. کرنش نهایی آب رفتگی  $(\varepsilon_{sh})_u$  در ضریب اصلاحی  $(\gamma_{sh})$  ضرب خواهد شد که مقدار آن در صورت برقراری کلیه شرایط استاندارد، برابر ۱ و در غیر این صورت به صورت حاصل ضرب ضریبی است که هر یک مبین اثر تغییر و عدول پارامتر مورد بررسی از شرایط متناظر استاندارد است (رابطه ۴۸).

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh}(t_s) \cdot \gamma_{sh}(RH) \cdot \gamma_{sh}(v/s) \cdot \gamma_{sh}(sl) \cdot \gamma_{sh}(\mu) \cdot \gamma_{sh}(a) \cdot \gamma_{sh}(c) \quad (48)$$

که در آن،  $\gamma_{sh}(a)$ ،  $\gamma_{sh}(\mu)$ ،  $\gamma_{sh}(sl)$ ،  $\gamma_{sh}(v/s)$ ،  $\gamma_{sh}(RH)$ ،  $\gamma_{sh}(t_s)$  و  $\gamma_{sh}(c)$  به ترتیب اثر تغییر در سن عمل‌آوری استاندارد، درصد رطوبت استاندارد، نسبت حجم به سطح جانبی استاندارد، اسلامپ استاندارد، درصد ریزدانه‌ی استاندارد، درصد هوای استاندارد، و عیار استاندارد سیمان مصرفی مطابق روابط ۴۹ الی ۵۵ هستند.

$$\gamma_{sh}(t_s) = 1.202 - 0.2337 \log(t_s) \quad (49)$$

$$\gamma_{sh}(RH) = 1.4 - 0.102 RH \quad \%40 \leq RH \leq \%80 \quad (50)$$

$$\gamma_{sh}(RH) = 3 - 0.3RH \quad \%80 < RH \leq \%100 \quad (50)$$

$$\gamma_{sh}(v/s) = 1.2 \exp[-0.00422(v/s)] \quad (51)$$

$$\gamma_{sh}(sl) = 0.89 + 0.00161 \times sl \quad (52)$$

$$\gamma_{sh}(\mu) = 0.3 + 0.014\mu \quad \mu \leq \%50 \quad (53)$$

$$\gamma_{sh}(\mu) = 0.9 + 0.002\mu \quad \mu > \%50 \quad (53)$$

$$\gamma_{sh}(a) = 0.95 + 0.008a \quad (54)$$

$$\gamma_{sh}(c) = 0.75 + 0.00061c \quad (55)$$

که در رابطه ۵۵،  $c$  عیار سیمان بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است. در مواقعی که استفاده از ضخامت عضو  $(Th)$  (بر حسب میلی‌متر) به جای نسبت حجم به سطح جانبی مثلاً در خصوص دال‌ها منطقی‌تر باشد، به جای رابطه ۵۱ می‌توان از رابطه ۵۶ استفاده کرد:

$$\gamma_{sh}(Th) = 1.23 - 0.00015 \times Th \quad t - t_s < \text{سال } 1 \quad (56)$$

$$\gamma_c(Th) = 1.17 - 0.00114 \times Th \quad t - t_s \quad (56)$$

لازم به ذکر است که  $(\gamma_{sh})$  در هیچ حالتی نباید از ۰٫۲ کوچک‌تر باشد. این تذکر لازم است که در نسبت زمانی رابطه ۴۷، آثار آب رفتگی خود به خود و خشک‌شونده تفکیک نشده و برای تأثیر شکل و ابعاد عضو در منحنی آب رفتگی، از مقادیر رابطه ۵۷ به جای مقادیر متناظر پیشین  $\eta$  و  $f$  استفاده می‌شود.

$$f = 26 \exp[1.42 \times 10^{-1}(v/s)], \eta = 1 \quad (57)$$

### ۳.۲. مدل Bazant-Baweja B3

مدل B3 بازانت کامل‌ترین و جامع‌ترین روش شناخته‌شده در میان روش‌های معتبر برآورد رفتار درازمدت بتن است که با به‌کارگیری طیف وسیعی از پارامترهای مؤثر در پدیده‌های وابسته به زمان بتن، روابط پیچیده‌ی را رقم می‌زند.<sup>[۱۱]</sup> در روش مذکور، کلیه‌ی آثار خزش پایه و خشک‌شونده و نیز آب رفتگی خود به خود و خشک‌شونده در روابط لحاظ شده است. یکی از وجوه تمایز روش بازانت نسبت به سایر روش‌ها، ارائه‌ی مستقیم تابع انطباق خزشی، بدون ارائه‌ی مجرای ضرایب بی‌بعد خزش است، که کار را با نرم‌فزارهایی که از ضرایب بی‌بعد خزش (و نه توابع انطباق خزش با واحد معکوس تنش) به عنوان ورودی استفاده می‌کنند (مانند ETABS۲۰۱۵)، مشکل می‌سازد. پژوهش حاضر با انجام مدل‌سازی‌های متعدد در نرم‌افزار Midas۲۰۱۵ GEN که قابلیت استفاده از کلیه‌ی انواع ورودی خزش، شامل: ضرایب خزش، تابع انطباق خزش و معادلات فرموله‌شده‌ی زمان - خزش را دارد، مشکل مطرح‌شده را در قالب ارائه‌ی راه‌حلی برای کاربران نرم‌افزار ETABS۲۰۱۵ حل کرده است که در ادامه مطرح شده است. از دیگر مشخصه‌های برجسته‌ی مدل بازانت نسبت به سایر روش‌ها، می‌توان وابستگی خزش خشک‌شونده به آب رفتگی را از آن جهت که بدون حصول مجهولات آب رفتگی نمی‌توان توابع انطباق خزش خشک‌شونده را محاسبه کرد، نام برد.<sup>[۱۲]</sup> در مدل بازانت، مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه بتن  $(f_{cm})$  براساس مقاومت فشاری مشخصه‌ی ۲۸ روزه بتن  $(f_{ck})$ ، مطابق رابطه‌ی ۵۸ و در پی آن مدول کشسانی ۲۸ روزه بتن  $(E_{cm28})$  مطابق رابطه‌ی ۵۹ و متعاقباً مدول کشسانی بتن در زمان دلخواه  $t$   $(E_{cm}(t))$ ، از رابطه‌ی ۶۰ به دست می‌آید:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8.3 MPa \quad (58)$$

$$E_{cm28} = 4734 \sqrt{f_{cm}} \quad (59)$$

$$E_{cm}(t) = E_{cm28} \left( \frac{t}{4 + 0.85t} \right)^{0.5} \quad (60)$$

کلیه‌ی روابط مدل بازانت برای نسبت آب به سیمان  $(w/c)$  بین ۰٫۳۵ تا ۰٫۸۵، نسبت سنگ‌دانه به سیمان  $(a/c)$  بین ۲٫۵ تا ۱۳٫۵، مقاومت فشاری میانگین بین ۱۷ تا ۷۰ مگاپاسکال، و عیار سیمان بین ۱۶۰ تا ۷۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب معتبر است.

### ۱.۳.۲. آب رفتگی

با توجه به وابستگی خزش خشک‌شونده به برخی از پارامترهای آب رفتگی، در ابتدا روابط مربوط به محاسبه‌ی آب رفتگی بررسی شده است. کرنش آب رفتگی  $(\varepsilon_{sh}(t, t_s))$  مطابق رابطه ۶۱ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_s) = -\varepsilon_{sh\infty} k_{RH} S(t - t_s) \quad (61)$$

که در آن،  $k_{RH}$  ضریب وابسته به درصد رطوبت،  $\varepsilon_{sh\infty}$  بیانگر کرنش نهایی آب رفتگی و  $S(t - t_s)$  تابع مبین نحوه‌ی رشد زمانی آب رفتگی، مطابق روابط ۶۲ الی ۶۶ است:

$$k_{RH} = 1 - RH^2 \quad RH \leq 0.98$$

$$k_{RH} = -0.2 \quad RH = 1$$

$$k_{RH} = 1.274 - 1.294RH \quad 0.98 < RH < 1 \quad (62)$$

که در آن،  $q_5$  و  $H(t)$  از روابط ۷۸ و ۷۹ به دست می‌آیند:

$$q_5 = {}^{\circ} / 75 \gamma (f_{cm})^{-1} \left| \varepsilon_{sh\infty} \times 10^{-6} \right|^{-\gamma / 6} \quad (78)$$

$$H(t) = 1 - (1 - RH) \cdot S(t - t_s) \quad (79)$$

توقف روند محاسبات مدل برای سن بارگذاری کوچک‌تر از سن شروع آب‌رفتگی ( $t_s < t$ )، از نقاط ضعف روش مذکور، البته فقط از دیدگاه ریاضی است چرا که معمولاً بارگذاری عضو قبل از پایان دوره‌ی عمل‌آوری آن شروع نمی‌شود. همان‌طور که اشاره شد، مدل بازانت ضرایب بی‌بعد خزش را به صورت مجزا ارائه نمی‌دهد. به عبارتی مشخص نیست که توابع انطباق از تقسیم ضرایب خزشی بر چه مدول کشسانی حاصل شده است. موضوع مذکور برای کاربران نرم‌افزارهایی که ورودی آنها ضرایب بی‌بعد خزش است، مشکل‌ساز خواهد بود (رابطه‌ی ۸۰).

$$J(t, t_s)_{ETABS} = \left[ \frac{1}{E(t_s)} + \frac{\phi_{ETABS INPUT}(t, t_s)}{E(28)} \right] \quad (80)$$

مشکل مذکور در نرم‌افزار Midas Gen ۲۰۱۵ که قابلیت پذیرش انواع ورودی خزش را دارد، احساس نمی‌شود. از این رو مدل‌سازی‌های متعدد در نرم‌افزار ذکر شده، انجام و نتایج تحلیل در قالب کوتاه‌شدگی ستون‌ها ناشی از ورودی خزش و آب‌رفتگی مدل بازانت یادداشت شد. جهت حصول بهترین انطباق بین نتایج به دست آمده‌ی مذکور و نتایج نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۵ و با کمک از رابطه‌ی پیشنهادی آیین‌نامه‌ی ACI برای کرنش کشسان، نهایتاً در اینجا روش ساده‌ی ارائه‌شده‌ی بی‌بعد برای کاربرانی که قصد مدل‌سازی با مدل بازانت را به عنوان مدل ورودی کاربر دارند، پیشنهاد شده است. به جای استفاده از مقدار  ${}^{\circ} / 6 / E_{cm28}$  برای  $q_1$  (مطابق رابطه‌ی ۶۸)، از مقدار  ${}^{\circ} / 84 / E_{cm28}$  استفاده و پس از حصول تابع انطباق کلی مطابق رابطه‌ی ۶۷، ورودی ضرایب بی‌بعد خزش برای نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۵ به صورت رابطه‌ی ۸۱ فراهم شده است:

$$\phi_{ETABS INPUT}(t, t_s) = [J_{Bazant} - ({}^{\circ} / 84 / E_{cm28})] \cdot E(28) \quad (81)$$

که در آن،  $E(28)$  مدول کشسانی ۲۸ روزه‌ی بتن است. صحت رابطه‌ی پیشنهادی ۸۱ با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی در Midas Gen ۲۰۱۵ و ETABS ۲۰۱۵ و مشاهده‌ی انطباق ۱۰۰ درصدی نتایج، تأیید می‌شود.

#### ۴.۲. مدل GL ۲۰۰۰

مدل گاردنر<sup>۶</sup>، یکی از ساده‌ترین مدل‌های معتبر برآورد رفتار درازمدت بتن است. شاخصه‌ی مهم مدل از یک سو، پیش‌بینی پدیده‌های وابسته به زمان بتن با کمترین تعداد روابط محاسباتی و از سوی دیگر، شباهت بسیار آن به روش CEB-FIP است. در ضمن خزش مدل گاردنر به مانند مدل بازانت مستقل از آب‌رفتگی موجود نیست. آنچه در پژوهش حاضر در مورد مدل مذکور ارائه شده است، نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی برخی ضرایب مؤثر در رشد زمانی مقاومت فشاری بتن است، که در مدل سال ۲۰۰۱ گاردنر و لاکمن<sup>۷</sup> ارائه شده است.<sup>[۱۲]</sup> روابط پیشنهادی مدل مورد بررسی، برای مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه بین ۱۶ تا ۸۲ مگاپاسکال، رطوبت محیط بین ۲۰ تا ۱۰۰ درصد و نسبت آب به سیمان بین ۰/۴ تا ۰/۶ معتبر است. در روش گاردنر، مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه بتن ( $f_{cm28}$ ) براساس مقاومت فشاری مشخصه‌ی ۲۸ روزه بتن ( $f_{ck}$ )، مطابق رابطه‌ی ۸۲ و در پی آن مقاومت

$$\varepsilon_{sh\infty} = -\varepsilon_{s\infty} \left( \frac{E_{cm67}}{E_{cm(t_s + \tau_{sh})}} \right) \times 10^{-6} \quad (63)$$

$$\varepsilon_{s\infty} = -\alpha_1 \alpha_2 [{}^{\circ} / 9 w^{1/3} (f_{cm})^{-\alpha_2 / 28} + 270] \times 10^{-6} \quad (64)$$

$$S(t - t_s) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_s}{\tau_{sh}}} \quad (65)$$

$$\tau_{sh} = {}^{\circ} / 85 (t_s)^{-\alpha_3 / 8} (f_{cm})^{-\alpha_4 / 25} [2 k_s (v/s)] \quad (66)$$

که در آن‌ها،  $w$  محتوی آب بتن بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $E_{cm67}$  و  $E_{cm(t_s + \tau_{sh})}$  مدول کشسانی بتن به ترتیب در زمان‌های ۶۰ و  $(t_s + \tau_{sh})$  روز است.  $(\tau_{sh})$  ضریبی است که اثر ابعاد عضو در آب‌رفتگی را اعمال می‌کند،  $(k_s)$  ضریب اثر شکل است که برای آنالیزهای معمولی به دلیل عدم حساسیت بالا، می‌توان مقدار آن را برابر ۱ فرض کرد. مقدار  $\alpha_1$  برای سیمان‌های تیپ I، II و III به ترتیب برابر ۱، ۰/۸۵ و ۰/۱۱ و مقدار  $\alpha_2$  برای شرایط عمل‌آوری با بخار، عمل‌آوری مرطوب و عمل‌آوری عایق و محافظت‌شده، به ترتیب برابر ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲ است.

#### ۲.۳.۲. خزش

کرنش خزشی  $\varepsilon_{cr}(t, t_s)$  وابسته به تنش ثابت  $\sigma_c(t_s)$  با در نظر گرفتن رابطه‌ی خطی تنش و کرنش مطابق رابطه‌ی ۶۷ ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cr}(t, t_s) &= \sigma_c(t_s) [q_1 + C_0(t, t_s) + C_d(t, t_s, t_s)] \\ &= \sigma_c(t_s) J(t, t_s) \end{aligned} \quad (67)$$

که در آن،  $q_1$  بیانگر کرنش اولیه بر واحد تنش و  $C_0(t, t_s)$  تابع انطباق خزش پایه بر واحد تنش است که از رابطه‌های ۶۸ و ۶۹ به دست می‌آید:

$$q_1 = 1 / E_{cm t_s} = {}^{\circ} / 6 / E_{cm 28} \quad (68)$$

$$C_0(t, t_s) = q_2 Q(t, t_s) + q_2 \ln[1 + (t - t_s)^{\alpha_5}] + q_2 \ln(t/t_s) \quad (69)$$

که در آن،  $q_2$  و  $q_2$  از روابط ۷۰ الی ۷۲ و  $Q(t, t_s)$  از رابطه‌ی ۷۳ به دست می‌آیند:

$$q_2 = 185.4 \times 10^{-6} \cdot c^{0.5} \cdot f_{cm}^{-0.9} \quad (70)$$

$$q_2 = {}^{\circ} / 29 (w/c)^4 q_2 \quad (71)$$

$$q_2 = 20.3 \times 10^{-6} (a/c)^{-0.7} \quad (72)$$

که در آن‌ها،  $c$  عیار سیمان بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است.

$$Q(t, t_s) = Q_f(t_s) \left[ 1 + \left( \frac{Q_f(t_s)}{Z(t, t_s)} \right)^{r(t_s)} \right]^{-r(t_s)^{-1}} \quad (73)$$

که در آن،  $r(t_s)$ ،  $Z(t, t_s)$  و  $Q_f(t_s)$  از روابط ۷۴ الی ۷۶ به دست می‌آیند:

$$r(t_s) = 1.7 (t_s)^{0.12} + 8 \quad (74)$$

$$Z(t, t_s) = (t_s)^{-0.5} \ln[1 + (t - t_s)^{0.1}] \quad (75)$$

$$Q_f(t_s) = [{}^{\circ} / 86 (t_s)^{2/9} + 1.21 (t_s)^{4/9}]^{-1} \quad (76)$$

همچنین  $C_d(t, t_s, t_s)$  تابع انطباق خزش خشک‌شونده بر واحد تنش است که از رابطه‌ی ۷۷ به دست می‌آید:

$$C_d(t, t_s, t_s) = q_0 \cdot \{ \exp[-\lambda H(t)] - \exp[-\lambda H(t_s)] \}^{0.5} \quad (77)$$

معایب روش فینتل و خان، می‌توان به لزوم وجود دست‌کم یک داده‌ی آزمایشگاهی مشخص از میزان آبرفتگی نمونه‌ی موردبررسی در ابتدای کار، جهت تبدیلات مقادیر نهایی آبرفتگی اشاره کرد. مقدار مذکور می‌تواند در هر زمان دلخواه (از ابتدای ساخت تا مقدار نهایی) باشد، لکن تخمین آبرفتگی بدون داده‌ی آزمایشگاهی مذکور بسیار تقریبی خواهد بود. اصول روش بر مبنای جداسازی مراحل ساخت به قبل و بعد از بتن‌ریزی تراز است که محاسبه‌ی آثار خزش و آبرفتگی آن مد نظر است. در مدل مذکور، تغییرمکان‌های نسبی تکیه‌گاه‌های تراز  $N$ ، با در نظر گرفتن یک سازه‌ی  $R$  طبقه که بتن‌ریزی آن تا تراز  $N$  انجام شده است، در اثر ۱. خزش ناشی از اعمال بارهای قبل از بتن‌ریزی تاوه  $(\Delta_{cr,i}^N)$ ؛ ۲. خزش ناشی از بارهای اعمالی حین اجرا، از تراز  $N$  تا تراز  $R$   $(\Delta_{cr,i}^R)$ ؛ ۳. آبرفتگی و ۴. کوتاه‌شدگی کشسان  $(\Delta_{el,i})$  صورت می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های مدل فینتل و خان، اعمال اثر فولادگذاری در کرنش‌های ناشی از خزش و آبرفتگی مطابق رابطه‌ی ۹۰ است.

$$R_{Sr} = \left( \frac{\sigma_c(t_0)\varepsilon_c' + \varepsilon_{sh}}{\rho\varepsilon_c'} \right) \left( 1 - \exp\left(\frac{-\rho n}{1 + \rho n}\varepsilon_c' E_c\right) \right) (E_s \varepsilon_{tot})^{-1} \quad (90)$$

که در آن،  $R_{Sr}$  نسبت کرنش خزشی و آبرفتگی ماندگار،  $\varepsilon_{cr}$  خزش ویژه نهایی با واحد معکوس تنش است که از گراف ۳ مرجع [۱۵] در پژوهش حاضر به دست می‌آید،  $E_c$  و  $E_s$  به ترتیب مدول کشسانی بتن و فولاد،  $\varepsilon_{tot}$  مجموع کرنش خام خزشی  $(\varepsilon_{cr})$  و کرنش خام آبرفتگی  $(\varepsilon_{sh})$  محاسبه‌شده به روش فینتل و خان،  $n$  نسبت مدول کشسانی فولاد به بتن هستند و  $\rho$  درصد آرماتور مقطع است که از رابطه‌ی ۹۱ محاسبه می‌شود:

$$\rho = A_{st} / [A_g + (n - 1)A_{st}] \quad (91)$$

که در آن،  $A_{st}$  سطح مقطع آرماتور و  $A_g$  سطح مقطع کلی عضو است. جهت حصول کرنش خزشی و آبرفتگی نهایی، قطعاً باید ضریب  $R_{Sr}$  در کرنش‌های خام به دست آمده ضرب شود و این موضوعی است که در بسیاری منابع به آن پرداخته نشده و فقط با رجوع به نوشتار اصلی، روش مورد بررسی و تشکیل جدول‌های موردنظر و مقایسه‌ی نتایج با روش PCA توسط پژوهش حاضر به دست آمده است.

#### ۱.۵.۲. خزش و آبرفتگی

تغییرمکان‌های نسبی تکیه‌گاه‌های تراز  $N$ ، در اثر خزش ناشی از اعمال بارهای قبل از بتن‌ریزی تاوه از رابطه‌ی ۹۲ و در اثر خزش ناشی از بارهای اعمالی حین اجرا، از تراز  $N$  تا تراز  $R$ ، از رابطه‌ی ۹۳ به دست می‌آید:

$$\Delta_{cr}^N = \sum_{i=1}^N \Delta_{cr,i}^N = \sum_{i=1}^N h_i \sum_{j=1}^N (\sigma_c)_{ij} \varepsilon_{c,2\lambda} \lambda_c \lambda_a (1 - \lambda_t) \quad (92)$$

$$\Delta_{cr}^R = \sum_{i=1}^N \Delta_{cr,i}^R = \sum_{i=1}^N h_i \sum_{j=1}^R (\sigma_c)_{ij} \varepsilon_{c,2\lambda} \lambda_c \lambda_a \quad (93)$$

این تذکر لازم است که چنانچه بارها به‌طور یکسان و در زمان‌های مساوی اعمال شود، رابطه‌ی ۹۲ به صورت ساده‌شده‌ی رابطه‌ی ۹۴ ارائه می‌شود:

$$\Delta_{cr}^N = \sum_{i=1}^N \Delta_{cr,i}^N = \sum_{i=1}^N h_i (\sigma_c)_{ij} \varepsilon_{c,2\lambda} \lambda_c \lambda_{ave} (1 - \lambda_t) \quad (94)$$

تغییرمکان‌های نسبی تکیه‌گاه‌های تراز  $N$  در اثر آبرفتگی مؤثر در طبقات زیرین، که فقط پس از بتن‌ریزی طبقه‌ی مذکور اتفاق می‌افتد، حائز اهمیت است و

فشاری بتن در زمان دلخواه  $t$  یا به عبارتی  $f_{cm}(t)$ ، از رابطه‌ی ۸۳ و نهایتاً چگونگی رشد زمانی مدول کشسانی بتن  $E_{cm}(t)$ ، از رابطه‌ی ۸۴ به دست می‌آید:

$$f_{cm28} = 1/1 f_{ck} + 5 MPa \quad (82)$$

$$f_{cm}(t) = \left( \exp\left[\frac{0.5m}{\sqrt{28/t}}\right] \right)^2 f_{cm28} \quad (83)$$

$$E_{cm}(t) = 3500 + 4300 \sqrt{f_{cm}(t)} \quad (84)$$

مقدار  $m$  برای سیمان‌های تیپ I، II و III به ترتیب برابر ۰/۳۳۵، ۰/۴ و ۰/۱۳ است.

#### ۱.۴.۲. خزش

کرنش خزشی  $\varepsilon_{cr}(t, t_0)$  وابسته به تنش ثابت  $\sigma_c(t_0)$  با توجه به رابطه‌ی خطی تنش و کرنش مطابق رابطه‌ی ۸۵ خواهد بود:

$$\varepsilon_{cr}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \left[ \frac{1}{E_{cm}(t_0)} + \frac{\phi_{2\lambda}(t, t_0)}{E_{cm2\lambda}} \right] = \sigma_c(t_0) J(t, t_0) \quad (85)$$

که در آن،  $E_{cm}(t_0)$  مدول کشسانی در زمان بارگذاری و در نتیجه  $1/E_{cm}(t_0)$ ، بیانگر کرنش اولیه بر واحد تنش،  $E_{cm28}$  مدول کشسانی ۲۸ روزه‌ی بتن است. ضریب بی‌بعد خزش  $\phi_{2\lambda}(t, t_0)$ ، با استفاده از روابط ۸۶ و ۸۷ محاسبه می‌شود:

$$\phi_{2\lambda}(t, t_0) = \phi(t_0) \left( 2 \frac{(t - t_0)^{0.7}}{(t - t_0)^{0.7} + 14} + \left( \frac{V(t - t_0)}{t_0(t - t_0 + V)} \right)^{0.5} + 2.5 [1 - 1.086(RH)^2] \left[ \frac{t - t_0}{t - t_0 + 0.12(V/S)^2} \right]^{0.5} \right) \quad (86)$$

$$\phi(t_0) = 1 \quad t_0 = t_s \quad (87)$$

$$\phi(t_0) = \left[ 1 - \left( \frac{t_0 - t_s}{t_0 - t_s + 0.12(V/S)^2} \right)^{0.5} \right]^{0.5} \quad t_0 > t_s \quad (87)$$

#### ۲.۴.۲. آبرفتگی

کرنش آبرفتگی  $\varepsilon_{sh}(t, t_s)$ ، مطابق رابطه‌ی ۸۸ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_s) = \varepsilon_{shu} [1 - 1.18(RH)^2] \left[ \frac{t - t_s}{t - t_s + 0.12(V/S)^2} \right]^{0.5} \quad (88)$$

که در آن،  $\varepsilon_{shu}$  از رابطه‌ی ۸۹ به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{shu} = 900 k \left( \frac{30}{f_{cm28}} \right)^{0.5} \times 10^{-6} \quad (89)$$

که در آن‌ها،  $\varepsilon_{shu}$  کرنش نهایی آبرفتگی و  $k$  ضریب وابسته به نوع سیمان مصرفی است که مقدار آن برای سیمان‌های تیپ I، II و III به ترتیب برابر ۱، ۰/۷۵ و ۰/۱۵ است. [۱۴]

#### ۵.۲. مدل فینتل و خان<sup>۸</sup>

مدل فینتل و فضلورخان، قدیمی‌ترین روش برآورد رفتار درازمدت بتن است که از آن به پایه و اساس روش‌های پیش‌بینی رفتار وابسته به زمان بتن تعبیر می‌شود. [۱۷-۱۵] روش مذکور معایب متعددی دارد، که بزرگ‌ترین آن پیش‌بینی رفتار درازمدت بتن در قالب ارائه‌ی گراف و نه روابط فرموله‌شده است. البته این تذکر لازم است که مشکل مذکور در ویرایش‌های بعدی روش مذکور با عنوان PCA<sup>۹</sup> حل شده است. از دیگر

از رابطه‌ی ۹۵ محاسبه می‌شود:

$$\Delta_{sh} = \sum_1^N \Delta_{sh,i} = \sum_1^N h_i \varepsilon_s \lambda_s (1 - \lambda_t) \quad (95)$$

در روابط ۹۲ الی ۹۵،  $\lambda_c$  و  $\lambda_s$  ضرایب مبین تأثیر ابعاد (نسبت حجم به سطح عضو) در آبرفتگی و خزش،  $\lambda_t$  ضریب مبین نسبت آبرفتگی یا خزش در یک سن خاص به آبرفتگی یا خزش نهایی و  $\lambda_{ave}$  و  $\lambda_a$  ضرایب مبین اثر سن بارگذاری بتن در خزش هستند، که به ترتیب از گراف‌های ۲a، ۲b، ۲c، ۲d، ۲e و ۲f، ۲g، ۲h، ۲i در مرجع [۱۶] در نوشتار حاضر به دست می‌آیند.  $\varepsilon'_{c,28}$  ضریب خزش ویژه‌ی ۲۸ روز با واحد معکوس تنش است که از گراف ۳ مرجع [۱۵] پژوهش حاضر به دست می‌آید.  $\varepsilon_s$  کرنش نهایی آبرفتگی است که از تقسیم مقدار آبرفتگی نمونه‌ی آزمایشگاهی در هر سن دلخواه بر  $\lambda_t$  حاصل می‌شود.  $(\sigma_c)_i$  تنش به دست آمده از کلیه‌ی بارهای بالای تراز مورد بررسی و  $h_i$  ارتفاع طبقه‌ی  $i$  است. بهترین روش برای پیاده‌سازی مدل مورد بررسی تشکیل دو جدول است. جدول اول، برای قبل از بتن‌ریزی طبقه‌ی خاص مورد بررسی و جدول دوم، برای بعد از بتن‌ریزی آن تراز تنظیم می‌شود. در صورت پیاده‌سازی جدول‌های مذکور، برای کلیه‌ی زمان‌های ساخت طبقات در بازه‌ی زمانی مشخص، تغییراتی به این شرح در روابط مورد استفاده که حاصل نتایج پژوهش حاضر است و در مثال بخش ۳ شرح داده شده است، می‌باید رخ دهد. از آنجا که کلیه‌ی طبقات با مدت زمان ساخت و سن بارگذاری خود در جدول مربوط قید می‌شوند، به جای ضریب  $(1 - \lambda_t)$  در روابط مرتبط، از ضریب ۱ مربوط به مقدار نهایی استفاده می‌شود. اما در انتهای کار و پس از حصول کرنش‌های خزشی و آبرفتگی نهایی حاصل از جدول‌های اخیر و بعد، کرنش‌های خزشی طبقات متناظر دو جدول با یکدیگر جمع، ولی کرنش آبرفتگی طبقات جدول قبل از ساخت، از مقادیر نظیر جدول بعد از ساخت کسر می‌شود. به این طریق، اثر جانمایی ۱ به جای  $(1 - \lambda_t)$  جبران می‌شود و آثار آبرفتگی بی‌اهمیت رخ داده تا قبل از ساخت طبقه‌ی مورد نظر صفر می‌شود.

### ۲.۵.۲. مدول کشسان

تغییر مکان‌های نسبی کشسان تکیه‌گاه‌های تراز  $N$ ، در اثر بارهای اعمالی بالای تراز  $N$  مطابق رابطه‌ی ۹۶ به دست می‌آید:

$$\Delta_{el} = \sum_1^N \Delta_{e,i} = P \sum_1^N \frac{h_i}{E_i A_i} \quad (96)$$

که در آن،  $A_i$  و  $E_i$  به ترتیب مدول کشسانی و سطح مقطع معادل عضو طبقه‌ی  $i$  و  $P$  مجموع تمام بارهای بالای طبقه‌ی مورد بررسی هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سکوت روش مورد بررسی در مورد نحوه‌ی تغییرات زمانی مدول کشسانی، که از دیگر نقاط ضعف روش است، استفاده از آن را فقط به آنالیز متداول و یک مرحله‌ی سازه محدود می‌سازد و پرداختن به آنالیز مرحله‌ی، فقط با استفاده از یک مدول کشسانی ثابت و بدون بیان نحوه‌ی رشد زمانی، مستلزم کمک گرفتن از تلفیقی از سایر روش‌های برآورد رفتار درازمدت بتن و روش‌های شبیه‌ساز رفتار واقعی و مرحله‌ی سازه خواهد بود.

### ۶.۲. روش PCA

روش PCA که در سال ۱۹۸۷ ارائه شده است، [۱۸] تلاشی سودمند در جهت فرموله کردن گراف‌های مدل فینتل و خان و پوشش نقاط ضعف آن بوده است. اصول روش PCA برای محاسبه‌ی خزش و آبرفتگی و تأثیر آرماتور در کرنش‌های مذکور یکسان است. در اینجا روابط ارائه شده‌ی مدل PCA از آن جهت مطرح می‌شود که بهترین

مدل جهت اعتبارسنجی مدل فینتل و خان است. در مدل مذکور، مقاومت فشاری  $(f_{ct})$  و مدول کشسانی بتن  $(E_{ct})$  در سن  $t$  به ترتیب مطابق رابطه‌های ۹۷ و ۹۸ حاصل می‌شود:

$$f_{ct} = \left( \frac{t}{4 + 0.185t} \right) f_{ck} \quad (97)$$

$$E_{ct} = 0.043 \times (w_c)^{1.5} \sqrt{f_{ct}} \quad (98)$$

کرنش خزشی  $\varepsilon_{cr}(t, t_0)$  وابسته به تنش ثابت  $(\sigma_c(t_0))$  مطابق رابطه‌ی ۹۹ و کرنش آبرفتگی  $(\varepsilon_{sh}(t, t_s))$  مطابق رابطه‌ی ۱۰۰ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{cr}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot (C_{cr})_u \cdot C_{Rt} \cdot C_{Rv/s} \cdot C_{RH} \cdot C_{RR} \quad (99)$$

$$\varepsilon_{sh}(t, t_s) = (\varepsilon_{sh})_u \cdot S_{Hv/s} \cdot S_{Ht} \cdot S_{RH} \cdot S_{HR} \quad (100)$$

که در آن‌ها، برخی پارامترها از روابط ۱۰۱ الی ۱۰۷ به دست می‌آیند:

$$C_{Rt} = 2.3(t_0)^{-0.25} \quad (101)$$

$$C_{Rv/s} = \frac{0.044(v/s) + 0.934}{0.1(v/s) + 0.85} \quad (102)$$

$$C_{RH} = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \quad (103)$$

$$C_{RR} = 1.4 - 0.1RH \quad (104)$$

$$S_{Hv/s} = \frac{0.037(v/s) + 0.944}{0.177(v/s) + 0.734} \quad (105)$$

$$S_{Ht} = \frac{(t - t_s)}{26 \exp[0.36(v/s)] + (t - t_s)} \quad (106)$$

$$S_{RH} = 1.4 - 0.1RH \quad 0.4 \leq RH \leq 1.0 \quad (107)$$

$$S_{RH} = 3 - 0.3RH \quad 0.8 \leq RH \leq 1.0 \quad (107)$$

که در آن‌ها،  $C_{RR}$  و  $S_{HR}$  به ترتیب کرنش ماندگار خزش و آبرفتگی در اثر آرماتور موجود هستند که دقیقاً به مانند روش فینتل و خان محاسبه می‌شوند.  $(\varepsilon_{cr})_u$  ضریب نهایی خزش با مقادیری بین  $(\frac{3}{f_{ck}})$  تا  $(\frac{1}{f_{ck}})$  است.  $(\varepsilon_{sh})_u$  ضریب نهایی خزش با مقادیری بین  $500 \times 10^{-6}$  الی  $1500 \times 10^{-6}$  است. از دیگر روش‌های شناخته شده در برآورد رفتار درازمدت بتن، می‌توان به روش‌های India(IRC) [۱۹]، European Code [۲۰] و روش ترکیبی PCA-ACI [۲۱] اشاره کرد.

### ۳. مثال‌های عددی

#### ۱.۳. آنالیز متداول یک مرحله‌ی

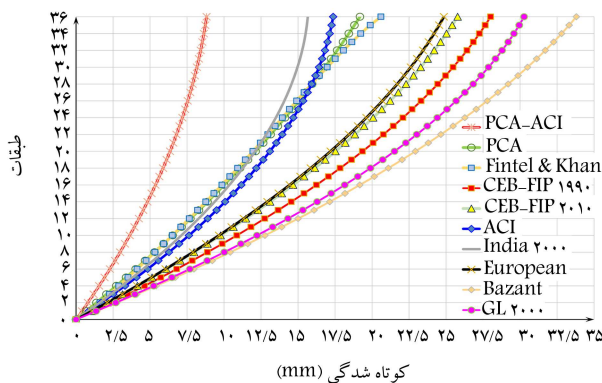
در بخش کنونی، جهت تبیین روش فینتل و خان به صورت صحیح و کامل برای کلیه‌ی طبقات و بازه‌های زمانی مربوط به ساخت طبقات و نیز به منظور بیان دستاوردهای پژوهش حاضر در نحوه‌ی اعمال روش فینتل و خان به روش تهیه‌ی جدول‌های قبل و بعد از ساخت سازه، از مثال مرجع اصلی روش فینتل و خان، [۱۵] که در آن فقط مقادیر کوتاه‌شدگی‌های خزشی و آبرفتگی کلی به صورت تجمعی و برای طبقه‌ی انتهایی توسط فینتل و خان مورد بحث بوده، استفاده شده است. صحت‌سنجی نتایج محاسبات دستی به دست آمده با مقایسه‌ی مقادیر ناشی از مدل‌سازی مجدد مثال با نرم‌افزار Midas Gen ۲۰۱۵ و به روش PCA که روش فرموله شده‌ی فینتل و خان است، انجام شده است تا در صورت انطباق نتایج، به عنوان نمونه‌ی بسیار



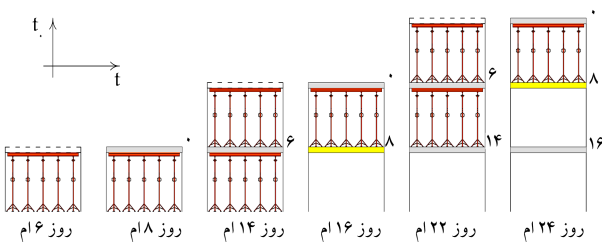
اسلامپ بتن برابر  $0.68$  متر، ریزدانه و هوای بتن به ترتیب  $5$  و  $6$  درصد و محتوی آب بتن (مورد استفاده در روش بازانت) برابر  $172.24$  کیلوگرم بر مترمکعب فرض شده است. نتایج حاصل از مدل سازی مثال مذکور تحت کلیه روش ها در شکل ۱ مشاهده می شود که مطابق آن مقادیر کوتاه شدگی به روش محاسبه دستی فینتل و خان، به شکل بسیار قابل قبولی منطبق بر نتایج مدل PCA حاصل از نرم افزار است که مؤید صحت محاسبات و روش های اعمال شده در تشکیل جدول های قبل و بعد از ساخت است. اندک خطای رخ داده در طبقات ۳۳ الی ۳۶ بین دو روش مذکور، به علت تقریبی بودن روش فینتل و خان در استفاده از گراف هایی است که استخراج  $\lambda_t$  های مورد استفاده ی طبقات یاد شده را به واسطه ی نزدیکی بسیار سنین بارگذاری در مقیاس لگاریتمی گراف های مرتبط با تقریب همراه می سازد.

### ۲.۳. آنالیز مرحله یی ساخت

در بخش کنونی از همان مثال یاد شده ی بخش قبل جهت بررسی اثر هر ۳ پدیده ی وابسته به زمان بتن تحت تحلیل غیرخطی مرحله یی<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. از این رو تغییر شکل های محوری ستون مورد بررسی، ناشی از خزش، آبرفتگی و نیز رشد زمانی مدول کشسانی مختص هر روش، به صورت مجزا و جداگانه برای کلیه روش های مورد بررسی پژوهش حاضر به استثناء روش فینتل و خان که به واسطه ی عدم ارائه ی نحوه ی رشد مدول کشسانی و محاسبه ی کوتاه شدگی های تجمعی کشسان، که فقط در تحلیل متداول یک مرحله یی رخ می دهد، ارائه و نتایج مقایسه شده اند. نکته ی قابل ذکر در بخش حاضر، توجه به سن بارگذاری طبقات است. سن بارگذاری ۲۸۸ روز مربوط به مدت زمان ساخت کلی سازه، فقط در حالت آنالیز یک مرحله یی معتبر است. اما برای آنالیز مرحله یی ساخت، منطبق بر مراحل ساخت طبقه به طبقه، باید از اعداد واقعی برای سنین بارگذاری طبقات استفاده شود. از این رو، سن بارگذاری طبقات  $(t_s)$ ، برابر ۸ روز، شامل ۶ روز جهت قالب بندی و ۲ روز برای بتن ریزی، مطابق شکل ۲ انتخاب شد. مدت زمان نصب قالب و بتن ریزی به



شکل ۱. کوتاه شدگی تجمعی ناشی از آثار خزش و آبرفتگی آنالیز متداول.



شکل ۲. الگوی ساخت طبقات مثال مورد بررسی.

مناسب برای کالیبراسیون خطا و اعتبارسنجی در اختیار پژوهشگران قرار گیرد. کلیه روش های مورد بررسی در ادامه ی نوشتار حاضر، بر روی مثال مورد بررسی پیاده شده و مجموع کوتاه شدگی خزشی و آبرفتگی ستون مورد نظر مقایسه شده است. جهت اعتبارسنجی مقایسه ی انجام شده فرض شده است که مدول کشسانی بتن برای کلیه روش های مورد بررسی، مقداری ثابت داشته و فقط تغییر شکل های خزش و آبرفتگی مدنظر بوده است. مشخصات مثال مورد بررسی به این قرار است: ستون داخلی سازه یی با ابعاد  $0.75 \times 1.25$  مترمربع و ارتفاع طبقه  $2.74$  متر با  $58$  عدد میلگرد طولی ( $f_y = 517.11 \text{ MPa}$ ) به قطر  $24$  میلی متر و مدول کشسانی  $206460$  مگاپاسکال مدنظر است. بار مرده ی محوری ستون ها در کلیه طبقات  $165$  کیلونیوتن، مدول کشسانی بتن برابر  $27900$  مگاپاسکال، و مقاومت فشاری مشخصه ی بتن  $35$  مگاپاسکال بوده است. مدت زمان ساخت طبقات ۸ روز، رطوبت محیط  $50\%$  و نتایج آزمایشگاهی برای کرنش آبرفتگی  $90$  روزی بتن  $10^{-6} \times 630$  و محاسبه ی کوتاه شدگی ستون مذکور ناشی از آثار خزش و آبرفتگی در روز  $10^6$  ام ساخت مدنظر است.

### ۳.۱.۱. حل به روش فینتل و خان

با توجه به مدت زمان ساخت یکسان ۸ روزه ی طبقات و با فرض اعمال بارها در زمان های مساوی، مقدار  $\lambda_{ave}$  برای مدت زمان ساخت  $38 \times 8 = 288$  روزه و با استفاده از گراف مرتبط برابر  $0.7$ ،  $\lambda_s$  و  $\lambda_c$  نیز با توجه به نسبت حجم به سطح جانبی ستون مذکور و گراف های مرتبط به ترتیب برابر  $0.56$  و  $0.06$  محاسبه شدند. مقادیر  $\lambda_t$  برای سن بارگذاری یکایک طبقات با استفاده از گراف مرتبط مطابق مقادیر مندرج در جدول های ۴ و ۵ محاسبه شده است. خزش ویژه ی ۲۸ روزه و نهایی ( $\epsilon'_{c,28}$  و  $\epsilon'_c$ ) بر حسب مدول کشسانی، از گراف های مرتبط به ترتیب برابر  $10^{-6} \times 0.48$  و  $10^{-6} \times 0.356$  بودند. کرنش نهایی آبرفتگی  $\epsilon_s$  با تقسیم مقدار آبرفتگی  $90$  روزه ی نمونه ی آزمایشگاهی بر ضریب تبدیل  $0.608 = 0.89$ ، برابر  $10^{-6} \times 1036$  محاسبه شده است. با توجه به مقادیر مذکور، جدول قبل از ساخت طبقه ی ۳۶ و جدول بعد از ساخت طبقه ی ۳۶ در روز  $10^6$  ام ساخت، به ترتیب مطابق جدول های ۴ و ۵ تشکیل شده است. مقادیر کوتاه شدگی های خزشی یا آبرفتگی جدول های مورد بررسی ( $\Delta \epsilon_{cr,sh}$ )، از ضرب کرنش های خام خزشی یا آبرفتگی ( $\sum \epsilon_{cr,sh}$ ) در ضریب کاهنده ی اثر فولاد مقطع و ارتفاع طبقه بر حسب متر حاصل می شوند. کلیه ضرایب  $(1 - \lambda_t)$  در روابط مرتبط تبدیل به ۱ شده و در انتهای کار و پس از حصول کرنش های خزشی و آبرفتگی حاصل از جدول های ۴ و ۵، کرنش های خزشی طبقات دو جدول مذکور (ستون سبز رنگ) با یکدیگر جمع و کرنش آبرفتگی طبقات جدول ۴ (ستون نارنجی رنگ) از مقادیر نظیر جدول ۵ کسر شده تا اثر  $(1 - \lambda_t)$  و آبرفتگی بی اهمیت رخ داده تا قبل از ساخت طبقه ی مورد نظر (طبقه ی آخر) اعمال شود. پس از حصول کوتاه شدگی های جدول های مذکور، مقادیر نهایی کوتاه شدگی آبرفتگی و خزشی، چنانکه ذکر شد، مطابق جدول ۶ به دست می آیند.

### ۳.۱.۲. حل مثال با سایر روش ها

اطلاعات مورد نیاز برای مثال مذکور جهت استفاده ی سایر روش های یاد شده ی پژوهش حاضر به این قرار فرض شده است: سیمان مصرفی از نوع تیپ III در ACI و معادل نوع  $42.5N$  روش CEB است. مدت زمان بارگذاری برای سازه در مرحله ی آنالیز متداول یک مرحله یی  $(t_s)$ ، ۲۸۸ روز و شروع آبرفتگی با پایان دوره ی عمل آوری مرطوب  $(t_s)$  برابر ۱۰ روز انتخاب شده است. وزن حجمی بتن  $2400$  کیلوگرم بر مترمکعب، عیار سیمان برابر  $470$  کیلونیوتن بر مترمکعب،

جدول ۴. تشکیل جدول‌های محاسبه‌ی خزش و آب‌رفتگی به روش فینتل و خان برای قبل از بتن‌ریزی آخرین تراز.

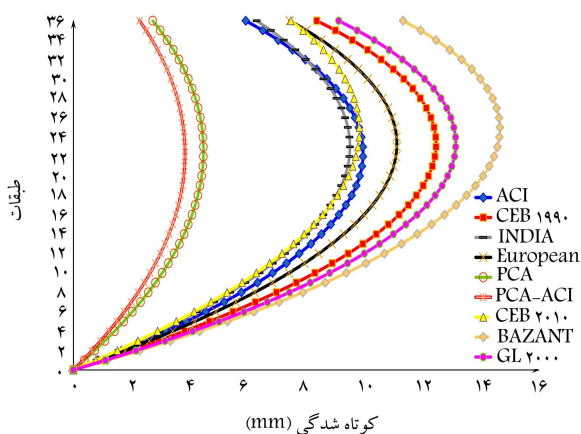
قبل از بتن‌ریزی طبقه‌ی ۳۶										
$\Delta_{sh}^{After}$ (m)	$\Delta_{cr}^R$ (m)	ضریب اثر میلگرد	$\sum \epsilon_{sh}$	$\epsilon_{sh}$	$\sum \epsilon_{cr}^R$	$\epsilon_{cr}^R$	$\sigma_c$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\lambda_t$	سن (روز)	طبقه
۰٫۰۱۹۰۳۷	۰٫۰۰۴۹۹۷	۰٫۵۳۹	۰٫۱۲۸۹۶۰۳۴	۰٫۰۰۰۱۳۳۴۶۱	۰٫۰۰۰۳۳۸۴۸۴۲	۰٫۰۰۰۰۰۱۷۰۵	۲۰۸	۰٫۲۳۰	۸	۳۶
۰٫۰۱۸۸۱۲	۰٫۰۰۴۹۸۷	۰٫۵۳۸	۰٫۱۲۷۶۲۵۷۴	۰٫۰۰۰۱۸۵۶۸۴	۰٫۰۰۰۳۳۸۳۱۳۸	۰٫۰۰۰۰۰۴۷۴۳	۴۱۶	۰٫۳۲۰	۱۶	۳۵
۰٫۰۱۸۴۹۸	۰٫۰۰۴۹۶۹	۰٫۵۳۷	۰٫۱۲۵۷۶۸۹۰	۰٫۰۰۰۲۱۶۶۳۲	۰٫۰۰۰۳۳۷۸۳۹۵	۰٫۰۰۰۰۰۸۳۰۱	۶۲۴	۰٫۳۷۳	۲۴	۳۴
۰٫۰۱۸۱۳۳	۰٫۰۰۴۹۴۴	۰٫۵۳۵	۰٫۱۲۳۶۰۲۵۸	۰٫۰۰۰۲۳۹۳۵۹	۰٫۰۰۰۳۳۷۰۰۹۴	۰٫۰۰۰۰۱۲۲۲۹	۸۳۲	۰٫۴۱۳	۳۲	۳۳
۰٫۰۱۷۷۳۳	۰٫۰۰۴۹۱۳	۰٫۵۳۴	۰٫۱۲۱۲۰۹۰۰	۰٫۰۰۰۲۵۳۸۶۵	۰٫۰۰۰۳۳۵۷۸۶۵	۰٫۰۰۰۰۱۶۲۱۲	۱۰۴۰	۰٫۴۳۸	۴۰	۳۲
۰٫۰۱۷۳۱۱	۰٫۰۰۴۸۷۵	۰٫۵۳۲	۰٫۱۱۸۶۷۰۳۴	۰٫۰۰۰۲۶۸۳۷۲	۰٫۰۰۰۳۳۴۱۶۵۳	۰٫۰۰۰۰۲۰۵۶۶	۱۲۴۹	۰٫۴۶۳	۴۸	۳۱
۰٫۰۱۶۸۷۰	۰٫۰۰۴۸۳۰	۰٫۵۳۱	۰٫۱۱۵۹۸۶۶۳	۰٫۰۰۰۲۸۲۸۷۸	۰٫۰۰۰۳۳۲۱۰۸۷	۰٫۰۰۰۰۲۵۲۹۱	۱۴۵۷	۰٫۴۸۸	۵۶	۳۰
۰٫۰۱۶۴۰۸	۰٫۰۰۴۷۷۹	۰٫۵۲۹	۰٫۱۱۳۱۵۷۸۴	۰٫۰۰۰۲۹۷۳۸۵	۰٫۰۰۰۳۳۰۵۷۹۵	۰٫۰۰۰۰۳۰۳۸۶	۱۶۶۵	۰٫۵۱۳	۶۴	۲۹
۰٫۰۱۵۹۲۷	۰٫۰۰۴۷۲۰	۰٫۵۲۸	۰٫۱۱۰۱۸۴۰۰	۰٫۰۰۰۳۱۱۸۹۱	۰٫۰۰۰۳۲۹۵۴۰۹	۰٫۰۰۰۰۳۵۸۵۲	۱۸۷۳	۰٫۵۳۸	۷۲	۲۸
۰٫۰۱۵۴۲۷	۰٫۰۰۴۶۵۳	۰٫۵۲۶	۰٫۱۰۷۰۶۵۰۸	۰٫۰۰۰۳۲۶۳۹۸	۰٫۰۰۰۳۲۷۹۵۵۷	۰٫۰۰۰۰۴۱۶۸۹	۲۰۸۱	۰٫۵۶۳	۸۰	۲۷
۰٫۰۱۴۹۰۷	۰٫۰۰۴۵۷۸	۰٫۵۲۴	۰٫۱۰۳۸۰۱۱۰	۰٫۰۰۰۳۴۰۹۰۵	۰٫۰۰۰۳۱۸۷۸۶۸	۰٫۰۰۰۰۴۷۸۹۶	۲۲۸۹	۰٫۵۸۸	۸۸	۲۶
۰٫۰۱۴۳۷۰	۰٫۰۰۴۴۹۵	۰٫۵۲۲	۰٫۱۰۰۳۹۲۰۵	۰٫۰۰۰۳۵۶۳۳۴	۰٫۰۰۰۳۱۳۹۹۷۲	۰٫۰۰۰۰۵۴۶۱۵	۲۴۹۷	۰٫۶۱۴	۹۶	۲۵
۰٫۰۱۳۸۱۳	۰٫۰۰۴۴۰۱	۰٫۵۲۱	۰٫۰۹۶۸۲۸۷۲	۰٫۰۰۰۳۶۰۱۰۳	۰٫۰۰۰۳۰۸۵۳۵۸	۰٫۰۰۰۰۵۹۷۹۲	۲۷۰۵	۰٫۶۲۱	۱۰۴	۲۴
۰٫۰۱۳۲۵۶	۰٫۰۰۴۳۰۲	۰٫۵۱۹	۰٫۰۹۳۲۲۷۶۸	۰٫۰۰۰۳۶۳۸۷۳	۰٫۰۰۰۳۰۲۵۵۶۶	۰٫۰۰۰۰۶۵۰۶۵	۲۹۱۳	۰٫۶۲۷	۱۱۲	۲۳
۰٫۰۱۲۶۹۸	۰٫۰۰۴۱۹۶	۰٫۵۱۷	۰٫۰۸۹۵۸۸۹۵	۰٫۰۰۰۳۶۷۶۴۲	۰٫۰۰۰۲۹۶۰۵۰۱	۰٫۰۰۰۰۷۰۴۳۵	۳۱۲۱	۰٫۶۳۴	۱۲۰	۲۲
۰٫۰۱۲۱۳۹	۰٫۰۰۴۰۸۴	۰٫۵۱۶	۰٫۰۸۵۹۱۲۵۳	۰٫۰۰۰۳۷۱۴۱۲	۰٫۰۰۰۲۸۹۰۰۶۶	۰٫۰۰۰۰۷۵۹۰۱	۳۳۲۹	۰٫۶۴۰	۱۲۸	۲۱
۰٫۰۱۱۵۸۰	۰٫۰۰۳۹۶۵	۰٫۵۱۴	۰٫۰۸۲۱۹۸۴۱	۰٫۰۰۰۳۷۵۱۸۱	۰٫۰۰۰۲۸۱۴۱۶۵	۰٫۰۰۰۰۸۱۴۶۳	۳۵۳۸	۰٫۶۴۷	۱۳۶	۲۰
۰٫۰۱۱۰۲۱	۰٫۰۰۳۸۳۹	۰٫۵۱۳	۰٫۰۷۸۴۴۶۶۰	۰٫۰۰۰۳۷۸۹۵۱	۰٫۰۰۰۲۷۳۲۷۰۲	۰٫۰۰۰۰۸۷۱۲۲	۳۷۴۶	۰٫۶۵۳	۱۴۴	۱۹
۰٫۰۱۰۴۶۱	۰٫۰۰۳۷۰۷	۰٫۵۱۱	۰٫۰۷۴۶۵۷۰۹	۰٫۰۰۰۳۸۲۷۲۱	۰٫۰۰۰۲۶۴۵۵۸۰	۰٫۰۰۰۰۹۲۸۷۷	۳۹۵۴	۰٫۶۶۰	۱۵۲	۱۸
۰٫۰۰۹۹۰۱	۰٫۰۰۳۵۶۸	۰٫۵۱۰	۰٫۰۷۰۷۰۸۲۹۸۸	۰٫۰۰۰۳۸۶۴۹۰	۰٫۰۰۰۲۵۵۲۷۰۳	۰٫۰۰۰۰۹۸۷۲۸	۴۱۶۲	۰٫۶۶۶	۱۶۰	۱۷
۰٫۰۰۹۳۴۰	۰٫۰۰۳۴۲۳	۰٫۵۰۹	۰٫۰۶۶۹۶۴۹۸	۰٫۰۰۰۳۹۰۲۶۰	۰٫۰۰۰۲۴۵۳۹۷۶	۰٫۰۰۰۱۰۴۶۷۵	۴۳۷۰	۰٫۶۷۳	۱۶۸	۱۶
۰٫۰۰۸۷۷۹	۰٫۰۰۳۲۷۱	۰٫۵۰۸	۰٫۰۶۳۰۶۲۳۸	۰٫۰۰۰۳۹۴۰۲۹	۰٫۰۰۰۲۳۴۹۳۰۰	۰٫۰۰۰۱۱۰۷۱۹	۴۵۷۸	۰٫۶۷۹	۱۷۶	۱۵
۰٫۰۰۸۲۱۸	۰٫۰۰۳۱۱۲	۰٫۵۰۷	۰٫۰۵۹۱۲۲۰۹	۰٫۰۰۰۳۹۷۷۹۹	۰٫۰۰۰۲۲۳۸۵۸۲	۰٫۰۰۰۱۱۶۸۵۹	۴۷۸۶	۰٫۶۸۶	۱۸۴	۱۴
۰٫۰۰۷۶۵۶	۰٫۰۰۲۹۴۶	۰٫۵۰۷	۰٫۰۵۵۱۴۴۱۱	۰٫۰۰۰۴۰۱۵۶۸	۰٫۰۰۰۲۱۲۱۷۲۳	۰٫۰۰۰۱۲۳۰۹۵	۴۹۹۴	۰٫۶۹۲	۱۹۲	۱۳
۰٫۰۰۷۰۹۵	۰٫۰۰۲۷۷۳	۰٫۵۰۶	۰٫۰۵۱۱۲۸۴۲	۰٫۰۰۰۴۰۵۳۳۸	۰٫۰۰۰۱۹۹۸۶۲۷	۰٫۰۰۰۱۲۹۴۲۸	۵۲۰۲	۰٫۶۹۹	۲۰۰	۱۲
۰٫۰۰۶۵۳۳	۰٫۰۰۲۵۹۴	۰٫۵۰۶	۰٫۰۴۷۰۷۵۰۵	۰٫۰۰۰۴۰۹۱۰۷	۰٫۰۰۰۱۸۶۹۱۹۹	۰٫۰۰۰۱۳۵۸۵۷	۵۴۱۰	۰٫۷۰۵	۲۰۸	۱۱
۰٫۰۰۵۹۷۱	۰٫۰۰۲۴۰۸	۰٫۵۰۷	۰٫۰۴۲۹۸۳۹۷	۰٫۰۰۰۴۱۲۸۷۷	۰٫۰۰۰۱۷۳۳۳۴۲	۰٫۰۰۰۱۴۲۳۸۲	۵۶۱۸	۰٫۷۱۲	۲۱۶	۱۰
۰٫۰۰۵۴۰۹	۰٫۰۰۲۲۱۵	۰٫۵۰۸	۰٫۰۳۸۸۵۵۲۰	۰٫۰۰۰۴۱۶۶۴۶	۰٫۰۰۰۱۵۹۰۹۶۰	۰٫۰۰۰۱۴۹۰۰۴	۵۸۲۷	۰٫۷۱۸	۲۲۴	۹
۰٫۰۰۴۸۴۷	۰٫۰۰۲۰۱۵	۰٫۵۱۰	۰٫۰۳۴۶۸۸۷۴	۰٫۰۰۰۴۲۰۴۱۶	۰٫۰۰۰۱۴۴۱۹۵۷	۰٫۰۰۰۱۵۵۷۲۱	۶۰۳۵	۰٫۷۲۵	۲۳۲	۸
۰٫۰۰۴۲۸۴	۰٫۰۰۱۸۰۸	۰٫۵۱۳	۰٫۰۳۰۴۸۴۵۸	۰٫۰۰۰۴۲۴۱۸۵	۰٫۰۰۰۱۲۸۶۲۳۶	۰٫۰۰۰۱۶۲۵۳۵	۶۲۴۳	۰٫۷۳۱	۲۴۰	۷
۰٫۰۰۳۷۲۲	۰٫۰۰۱۵۹۴	۰٫۵۱۸	۰٫۰۲۶۲۴۲۷۳	۰٫۰۰۰۴۲۷۹۵۵	۰٫۰۰۰۱۱۲۳۷۰۰	۰٫۰۰۰۱۶۹۴۴۶	۶۴۵۱	۰٫۷۳۸	۲۴۸	۶
۰٫۰۰۳۱۶۰	۰٫۰۰۱۳۷۳	۰٫۵۲۵	۰٫۰۲۱۹۶۳۱۸	۰٫۰۰۰۴۳۱۷۲۴	۰٫۰۰۰۹۵۴۲۵۴	۰٫۰۰۰۱۷۶۴۵۲	۶۶۵۹	۰٫۷۴۴	۲۵۶	۵
۰٫۰۰۲۵۹۷	۰٫۰۰۱۱۴۵	۰٫۵۳۷	۰٫۰۱۷۶۴۵۹۳	۰٫۰۰۰۴۳۵۴۹۴	۰٫۰۰۰۷۷۷۸۰۲	۰٫۰۰۰۱۸۳۵۵۵	۶۸۶۷	۰٫۷۵۱	۲۶۴	۴
۰٫۰۰۲۰۳۵	۰٫۰۰۰۹۱۰	۰٫۵۵۹	۰٫۰۱۳۲۹۰۹۹	۰٫۰۰۰۴۳۹۲۶۴	۰٫۰۰۰۵۹۴۲۴۷	۰٫۰۰۰۱۹۰۷۵۵	۷۰۷۵	۰٫۷۵۷	۲۷۲	۳
۰٫۰۰۱۴۷۳	۰٫۰۰۰۶۶۸	۰٫۶۰۴	۰٫۰۰۸۸۹۸۳۶	۰٫۰۰۰۴۴۳۰۳۳	۰٫۰۰۰۴۰۳۴۹۲	۰٫۰۰۰۱۹۸۰۵۰	۷۲۸۳	۰٫۷۶۴	۲۸۰	۲
۰٫۰۰۰۹۱۱	۰٫۰۰۰۴۱۹	۰٫۷۴۴	۰٫۰۰۴۴۶۸۰۳	۰٫۰۰۰۴۴۶۸۰۳	۰٫۰۰۰۲۰۵۴۴۲	۰٫۰۰۰۲۰۵۴۴۲	۷۴۹۱	۰٫۷۷۰	۲۸۸	۱

جدول ۵. تشکیل جدول‌های محاسبه‌ی خزش و آب‌رفتگی به روش فینتل و خان برای بعد از بتن‌ریزی آخرین تراز.

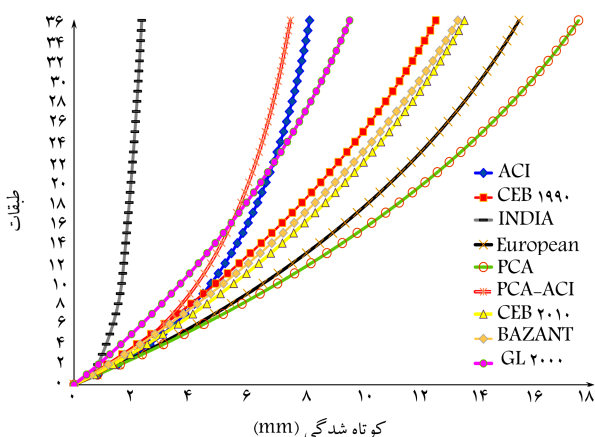
بعد از بتن‌ریزی طبقه‌ی ۳۶										
$\Delta_{sh}^{After}$ (m)	$\Delta_{cr}^R$ (m)	ضریب اثر میلگرد	$\sum \epsilon_{sh}$	$\epsilon_{sh}$	$\sum \epsilon_{cr}^R$	$\epsilon_{cr}^R$	$\sigma_c$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\lambda_t$	سن (روز)	طبقه
۰٫۰۲۸۰۰۱	۰٫۰۰۰۶۶۴۱	۰٫۵۵۰	۰٫۱۸۵۹۱۶۳۲	۰٫۰۰۰۵۱۰۶۳۲	۰٫۰۰۰۴۴۰۹۴۴۳	۰٫۰۰۰۰۰۶۵۲۲	۲۰۸	۰٫۸۸۰	۷۲۰	۳۶
۰٫۰۲۷۱۰۵	۰٫۰۰۰۶۶۰۰	۰٫۵۴۷	۰٫۱۸۰۸۱۰۰۰	۰٫۰۰۰۵۱۰۹۶۳	۰٫۰۰۰۴۴۰۲۹۲۱	۰٫۰۰۰۰۰۱۳۰۵۲	۴۱۶	۰٫۸۸۱	۷۲۸	۳۵
۰٫۰۲۶۲۱۷	۰٫۰۰۰۶۵۵۰	۰٫۵۴۵	۰٫۱۷۵۷۰۰۳۷	۰٫۰۰۰۵۱۱۲۹۵	۰٫۰۰۰۴۳۸۹۸۶۸	۰٫۰۰۰۰۰۱۹۵۹۱	۶۲۴	۰٫۸۸۱	۷۳۶	۳۴
۰٫۰۲۵۳۳۷	۰٫۰۰۰۶۴۹۱	۰٫۵۴۲	۰٫۱۷۰۵۸۷۴۲	۰٫۰۰۰۵۱۱۶۲۶	۰٫۰۰۰۴۳۷۰۲۷۷	۰٫۰۰۰۰۰۲۶۱۳۹	۸۳۲	۰٫۸۸۲	۷۴۴	۳۳
۰٫۰۲۴۴۶۶	۰٫۰۰۰۶۴۳۳	۰٫۵۴۰	۰٫۱۶۵۴۷۱۱۶	۰٫۰۰۰۵۱۱۹۵۸	۰٫۰۰۰۴۳۴۴۱۳۸	۰٫۰۰۰۰۰۳۲۶۹۵	۱۰۴۰	۰٫۸۸۲	۷۵۲	۳۲
۰٫۰۲۳۶۰۳	۰٫۰۰۰۶۳۴۶	۰٫۵۳۷	۰٫۱۶۰۳۵۱۵۸	۰٫۰۰۰۵۱۲۲۸۹	۰٫۰۰۰۴۳۱۱۴۴۴	۰٫۰۰۰۰۰۳۹۲۵۹	۱۲۴۹	۰٫۸۸۳	۷۶۰	۳۱
۰٫۰۲۲۷۴۹	۰٫۰۰۰۶۲۶۱	۰٫۵۳۵	۰٫۱۵۵۲۲۸۶۸	۰٫۰۰۰۵۱۲۶۲۱	۰٫۰۰۰۴۲۷۲۱۸۵	۰٫۰۰۰۰۰۴۵۸۳۲	۱۴۵۷	۰٫۸۸۳	۷۶۸	۳۰
۰٫۰۲۱۹۰۲	۰٫۰۰۰۶۱۶۷	۰٫۵۳۳	۰٫۱۵۰۱۰۲۴۷	۰٫۰۰۰۵۱۲۹۵۳	۰٫۰۰۰۴۲۲۶۳۵۳	۰٫۰۰۰۰۰۵۲۴۱۳	۱۶۶۵	۰٫۸۸۴	۷۷۶	۲۹
۰٫۰۲۱۰۶۳	۰٫۰۰۰۶۰۶۴	۰٫۵۳۰	۰٫۱۴۴۹۷۲۹۵	۰٫۰۰۰۵۱۳۲۸۴	۰٫۰۰۰۴۱۷۳۹۴۰	۰٫۰۰۰۰۰۵۹۰۰۳	۱۸۷۳	۰٫۸۸۵	۷۸۴	۲۸
۰٫۰۲۰۲۳۱	۰٫۰۰۰۵۹۵۳	۰٫۵۲۸	۰٫۱۳۹۸۴۰۱۱	۰٫۰۰۰۵۱۳۶۱۶	۰٫۰۰۰۴۱۱۴۹۳۸	۰٫۰۰۰۰۰۶۵۶۰۱	۲۰۸۱	۰٫۸۸۵	۷۹۲	۲۷
۰٫۰۱۹۴۰۸	۰٫۰۰۰۵۸۳۴	۰٫۵۲۶	۰٫۱۳۴۷۰۳۹۵	۰٫۰۰۰۵۱۳۹۴۷	۰٫۰۰۰۴۰۴۹۳۳۷	۰٫۰۰۰۰۰۷۲۲۰۷	۲۲۸۹	۰٫۸۸۶	۸۰۰	۲۶
۰٫۰۱۸۵۹۱	۰٫۰۰۰۵۷۰۷	۰٫۵۲۴	۰٫۱۲۹۵۶۴۴۷	۰٫۰۰۰۵۱۴۲۷۹	۰٫۰۰۰۳۹۷۷۱۲۹	۰٫۰۰۰۰۰۷۸۸۲۳	۲۴۹۷	۰٫۸۸۶	۸۰۸	۲۵
۰٫۰۱۷۷۸۳	۰٫۰۰۰۵۵۷۲	۰٫۵۲۲	۰٫۱۲۴۴۲۱۶۸	۰٫۰۰۰۵۱۴۶۱۱	۰٫۰۰۰۳۹۱۸۳۰۷	۰٫۰۰۰۰۰۸۵۴۴۶	۲۷۰۵	۰٫۸۸۷	۸۱۶	۲۴
۰٫۰۱۶۹۸۱	۰٫۰۰۰۵۴۲۸	۰٫۵۲۰	۰٫۱۱۹۲۷۵۵۸	۰٫۰۰۰۵۱۴۹۴۲	۰٫۰۰۰۳۸۶۱۲۸۶۰	۰٫۰۰۰۰۰۹۲۰۷۸	۲۹۱۳	۰٫۸۸۷	۸۲۴	۲۳
۰٫۰۱۶۱۸۷	۰٫۰۰۰۵۲۷۷	۰٫۵۱۸	۰٫۱۱۴۱۲۶۱۶	۰٫۰۰۰۵۱۵۲۷۴	۰٫۰۰۰۳۸۰۳۷۸۲	۰٫۰۰۰۰۰۹۸۷۱۹	۳۱۲۱	۰٫۸۸۸	۸۳۲	۲۲
۰٫۰۱۵۴۰۰	۰٫۰۰۰۵۱۱۹	۰٫۵۱۶	۰٫۱۰۸۹۷۳۴۲	۰٫۰۰۰۵۱۵۶۰۵	۰٫۰۰۰۳۷۴۲۰۶۳	۰٫۰۰۰۰۰۱۰۵۳۶۸	۳۳۲۹	۰٫۸۸۹	۸۴۰	۲۱
۰٫۰۱۴۶۱۹	۰٫۰۰۰۴۹۵۲	۰٫۵۱۴	۰٫۱۰۳۸۱۷۳۷	۰٫۰۰۰۵۱۵۹۳۷	۰٫۰۰۰۳۶۸۱۶۶۹۵	۰٫۰۰۰۰۰۱۱۲۰۲۵	۳۵۳۸	۰٫۸۸۹	۸۴۸	۲۰
۰٫۰۱۳۸۴۶	۰٫۰۰۰۴۷۷۸	۰٫۵۱۲	۰٫۰۹۸۶۵۸۰۰	۰٫۰۰۰۵۱۶۲۶۸	۰٫۰۰۰۳۶۰۴۶۷۰	۰٫۰۰۰۰۰۱۱۸۶۹۱	۳۷۴۶	۰٫۸۹۰	۸۵۶	۱۹
۰٫۰۱۳۰۸۰	۰٫۰۰۰۴۵۹۷	۰٫۵۱۱	۰٫۰۹۳۴۹۵۳۲	۰٫۰۰۰۵۱۶۶۰۰	۰٫۰۰۰۳۵۳۸۵۹۷۹	۰٫۰۰۰۰۰۱۲۵۳۶۶	۳۹۵۴	۰٫۸۹۰	۸۶۴	۱۸
۰٫۰۱۲۳۲۰	۰٫۰۰۰۴۴۰۸	۰٫۵۰۹	۰٫۰۸۸۳۲۹۳۲	۰٫۰۰۰۵۱۶۹۳۲	۰٫۰۰۰۳۴۷۰۶۱۳	۰٫۰۰۰۰۰۱۳۲۰۴۹	۴۱۶۲	۰٫۸۹۱	۸۷۲	۱۷
۰٫۰۱۱۵۶۷	۰٫۰۰۰۴۲۱۲	۰٫۵۰۸	۰٫۰۸۳۱۶۰۰۰	۰٫۰۰۰۵۱۷۲۶۳	۰٫۰۰۰۳۴۰۲۸۵۶۴	۰٫۰۰۰۰۰۱۳۸۷۴۰	۴۳۷۰	۰٫۸۹۱	۸۸۰	۱۶
۰٫۰۱۰۸۲۰	۰٫۰۰۰۴۰۰۹	۰٫۵۰۶	۰٫۰۷۷۹۸۷۳۷	۰٫۰۰۰۵۱۷۵۹۵	۰٫۰۰۰۳۳۳۸۱۲۴	۰٫۰۰۰۰۰۱۴۵۴۴۰	۴۵۷۸	۰٫۸۹۲	۸۸۸	۱۵
۰٫۰۱۰۰۸۰	۰٫۰۰۰۳۷۹۹	۰٫۵۰۵	۰٫۰۷۲۸۱۱۴۲	۰٫۰۰۰۵۱۷۹۲۶	۰٫۰۰۰۳۲۷۴۳۸۴	۰٫۰۰۰۰۰۱۵۲۱۴۸	۴۷۸۶	۰٫۸۹۳	۸۹۶	۱۴
۰٫۰۰۹۳۴۶	۰٫۰۰۰۳۵۸۲	۰٫۵۰۴	۰٫۰۶۷۶۳۲۱۶	۰٫۰۰۰۵۱۸۲۵۸	۰٫۰۰۰۳۲۱۹۲۳۶	۰٫۰۰۰۰۰۱۵۸۸۶۵	۴۹۹۴	۰٫۸۹۳	۹۰۴	۱۳
۰٫۰۰۸۶۱۹	۰٫۰۰۰۳۳۵۸	۰٫۵۰۴	۰٫۰۶۲۴۴۹۵۸	۰٫۰۰۰۵۱۸۵۸۹	۰٫۰۰۰۳۱۶۳۳۷۱	۰٫۰۰۰۰۰۱۶۵۵۹۰	۵۲۰۲	۰٫۸۹۴	۹۱۲	۱۲
۰٫۰۰۷۸۹۷	۰٫۰۰۰۳۱۲۸	۰٫۵۰۳	۰٫۰۵۷۲۶۳۶۸	۰٫۰۰۰۵۱۸۹۲۱	۰٫۰۰۰۳۱۰۶۷۷۸۱	۰٫۰۰۰۰۰۱۷۲۳۲۴	۵۴۱۰	۰٫۸۹۴	۹۲۰	۱۱
۰٫۰۰۷۱۸۲	۰٫۰۰۰۲۸۹۰	۰٫۵۰۳	۰٫۰۵۲۰۷۴۴۷	۰٫۰۰۰۵۱۹۲۵۳	۰٫۰۰۰۳۰۴۹۵۴۵۷	۰٫۰۰۰۰۰۱۷۹۰۶۶	۵۶۱۸	۰٫۸۹۵	۹۲۸	۱۰
۰٫۰۰۶۴۷۳	۰٫۰۰۰۲۶۴۶	۰٫۵۰۴	۰٫۰۴۶۸۸۱۹۵	۰٫۰۰۰۵۱۹۵۸۴	۰٫۰۰۰۲۹۹۶۳۹۱	۰٫۰۰۰۰۰۱۸۵۸۱۷	۵۸۲۷	۰٫۸۹۵	۹۳۶	۹
۰٫۰۰۵۷۷۰	۰٫۰۰۰۲۳۹۵	۰٫۵۰۵	۰٫۰۴۱۶۸۶۱۱	۰٫۰۰۰۵۱۹۹۱۶	۰٫۰۰۰۲۹۳۰۵۷۴	۰٫۰۰۰۰۰۱۹۲۵۷۶	۶۰۳۵	۰٫۸۹۶	۹۴۴	۸
۰٫۰۰۵۰۷۲	۰٫۰۰۰۲۱۳۸	۰٫۵۰۷	۰٫۰۳۶۴۸۶۹۵	۰٫۰۰۰۵۲۰۲۴۷	۰٫۰۰۰۲۸۷۹۹۸	۰٫۰۰۰۰۰۱۹۹۳۴۳	۶۲۴۳	۰٫۸۹۷	۹۵۲	۷
۰٫۰۰۴۳۸۱	۰٫۰۰۰۱۸۷۴	۰٫۵۱۱	۰٫۰۳۱۲۸۴۴۷	۰٫۰۰۰۵۲۰۵۷۹	۰٫۰۰۰۲۸۳۸۶۵۵	۰٫۰۰۰۰۰۲۰۶۱۲۰	۶۴۵۱	۰٫۸۹۷	۹۶۰	۶
۰٫۰۰۳۶۹۵	۰٫۰۰۰۱۶۰۴	۰٫۵۱۷	۰٫۰۲۶۰۷۸۶۸	۰٫۰۰۰۵۲۰۹۱۱	۰٫۰۰۰۲۷۹۲۵۳۵	۰٫۰۰۰۰۰۲۱۲۹۰۴	۶۶۵۹	۰٫۸۹۸	۹۶۸	۵
۰٫۰۰۳۰۱۴	۰٫۰۰۰۱۳۲۸	۰٫۵۲۷	۰٫۰۲۰۸۶۹۵۸	۰٫۰۰۰۵۲۱۲۴۲	۰٫۰۰۰۲۷۵۱۹۶۳۱	۰٫۰۰۰۰۰۲۱۹۶۹۷	۶۸۶۷	۰٫۸۹۸	۹۷۶	۴
۰٫۰۰۲۳۴۰	۰٫۰۰۰۱۰۴۶	۰٫۵۴۵	۰٫۰۱۵۶۵۷۱۶	۰٫۰۰۰۵۲۱۵۷۴	۰٫۰۰۰۲۶۹۹۹۳۴	۰٫۰۰۰۰۰۲۲۶۴۹۹	۷۰۷۵	۰٫۸۹۹	۹۸۴	۳
۰٫۰۰۱۶۷۱	۰٫۰۰۰۰۷۵۷	۰٫۵۸۴	۰٫۰۱۰۴۴۱۴۲	۰٫۰۰۰۵۲۱۹۰۵	۰٫۰۰۰۲۶۳۴۳۶	۰٫۰۰۰۰۰۲۳۳۳۰۹	۷۲۸۳	۰٫۸۹۹	۹۹۲	۲
۰٫۰۰۱۰۰۷	۰٫۰۰۰۰۴۶۳	۰٫۷۰۴	۰٫۰۰۵۲۲۲۳۷	۰٫۰۰۰۵۲۲۲۳۷	۰٫۰۰۰۲۴۰۱۲۷	۰٫۰۰۰۰۰۲۴۰۱۲۷	۷۴۹۱	۰٫۹۰۰	۱۰۰۰	۱

جدول ۶. مقادیر نهایی کوتاه‌شدگی به روش فینتل و خان.

طبقه	$\Delta N_{cr} + \Delta R_{cr} (m)$	$\Delta_{sh}^{After} - \Delta_{sh}^{Before} (m)$
۳۶	۰٫۰۱۱۶۳۸	۰٫۰۰۸۹۶۴
۳۵	۰٫۰۱۱۵۸۷	۰٫۰۰۸۲۹۳
۳۴	۰٫۰۱۱۵۱۹	۰٫۰۰۷۷۱۹
۳۳	۰٫۰۱۱۴۳۵	۰٫۰۰۷۲۰۴
۳۲	۰٫۰۱۱۳۳۶	۰٫۰۰۶۷۳۴
۳۱	۰٫۰۱۱۲۲۱	۰٫۰۰۶۲۹۲
۳۰	۰٫۰۱۱۰۹۱	۰٫۰۰۵۸۷۹
۲۹	۰٫۰۱۰۹۴۶	۰٫۰۰۵۴۹۴
۲۸	۰٫۰۱۰۷۸۴	۰٫۰۰۵۱۳۶
۲۷	۰٫۰۱۰۶۰۷	۰٫۰۰۴۸۰۵
۲۶	۰٫۰۱۰۴۱۲	۰٫۰۰۴۵۰۰
۲۵	۰٫۰۱۰۲۰۱	۰٫۰۰۴۲۲۱
۲۴	۰٫۰۰۹۹۷۳	۰٫۰۰۳۹۶۹
۲۳	۰٫۰۰۹۷۳۰	۰٫۰۰۳۷۲۵
۲۲	۰٫۰۰۹۴۷۳	۰٫۰۰۳۴۸۹
۲۱	۰٫۰۰۹۲۰۲	۰٫۰۰۳۲۶۰
۲۰	۰٫۰۰۸۹۱۷	۰٫۰۰۳۰۳۹
۱۹	۰٫۰۰۸۶۱۷	۰٫۰۰۲۸۲۵
۱۸	۰٫۰۰۸۳۰۴	۰٫۰۰۲۶۱۹
۱۷	۰٫۰۰۷۹۷۶	۰٫۰۰۲۴۱۹
۱۶	۰٫۰۰۷۶۳۵	۰٫۰۰۲۲۲۷
۱۵	۰٫۰۰۷۲۸۰	۰٫۰۰۲۰۴۱
۱۴	۰٫۰۰۶۹۱۱	۰٫۰۰۱۸۶۲
۱۳	۰٫۰۰۶۵۲۸	۰٫۰۰۱۶۹۰
۱۲	۰٫۰۰۶۱۳۲	۰٫۰۰۱۵۲۴
۱۱	۰٫۰۰۵۷۲۲	۰٫۰۰۱۳۶۴
۱۰	۰٫۰۰۵۲۹۸	۰٫۰۰۱۲۱۱
۹	۰٫۰۰۴۸۶۱	۰٫۰۰۱۰۶۴
۸	۰٫۰۰۴۴۱۰	۰٫۰۰۰۹۲۳
۷	۰٫۰۰۳۹۴۶	۰٫۰۰۰۷۸۸
۶	۰٫۰۰۳۴۶۸	۰٫۰۰۰۶۵۸
۵	۰٫۰۰۲۹۷۷	۰٫۰۰۰۵۳۵
۴	۰٫۰۰۲۴۷۳	۰٫۰۰۰۴۱۷
۳	۰٫۰۰۱۹۵۶	۰٫۰۰۰۳۰۵
۲	۰٫۰۰۱۴۲۵	۰٫۰۰۰۱۹۸
۱	۰٫۰۰۰۸۸۲	۰٫۰۰۰۰۹۶



شکل ۳. کوتاه‌شدگی ستون مورد بررسی ناشی از آثار خزش.



شکل ۴. کوتاه‌شدگی ستون مورد بررسی ناشی از آثار آب‌رفتگی.

مطابق شکل ۲ نشان می‌دهد که مدت زمان ۸ روز به‌عنوان سن بارگذاری یکسان برای کلیه طبقات سازه رعایت خواهد شد. شروع آب‌رفتگی با پایان عمل‌آوری مرطوب ( $t_s$ ) نیز برابر ۳ روز انتخاب شده است. از سوی دیگر، به منظور عملکرد صحیح و آنالیز درست نرم‌افزار در برآورد رفتار غیرخطی مرحله‌ی سازه، باید به تعداد طبقات سازه، منحنی زمان - خزش به‌عنوان ورودی نرم‌افزار تولید شود، که البته لزوم انجام آن در زمان استفاده از روش‌های از پیش تعریف‌شده و موجود در نرم‌افزار احساس نمی‌شود، چرا که نرم‌افزارهای مربوط، منحنی‌های خزش - زمان را براساس مراحل ساخت تعریف‌شده و ضوابط کد انتخابی به صورت خودکار تولید و وارد آنالیز می‌کنند، لیکن برای مدل‌های بازانت و GL 2000 که در نرم‌افزارهای مورد استفاده‌ی پژوهش حاضر موجود نیستند، تولید ۳۶ منحنی خزش مجزا برای هر یک از طبقات سازه با شرایط زمانی ساخت مختص هر طبقه برای هر یک از دو روش مذکور الزامی است، که پروسه‌ی زمان‌بر و مستلزم صرف وقت و دقت بسیار است. نتایج حاصل از مدل‌سازی، در قالب کوتاه‌شدگی ستون مورد بررسی ناشی از آثار خزش، آب‌رفتگی، و رشد مدول کشسانی به ترتیب در شکل‌های ۳ الی ۵ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل‌های ۳ الی ۵ مشاهده می‌شود، تقریباً در اغلب روش‌ها، بیشترین و کمترین مقادیر کوتاه‌شدگی ستون مورد بررسی به ترتیب تحت آثار آب‌رفتگی و تغییرات زمانی مدول کشسانی بتن رخ داده است. از طرفی اختلاف بین مقادیر کوتاه‌شدگی برآوردی روش‌های مختلف، تحت آثار خزش و آب‌رفتگی، شدت و وضوح

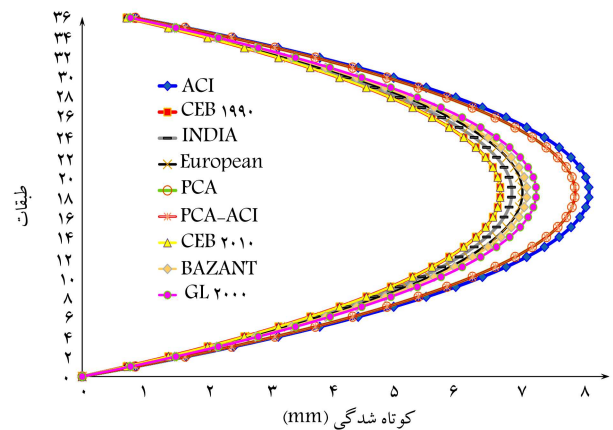
جهت سادگی روند مدل‌سازی به‌گونه‌ی فرض شده است که طول دوره‌ی ساخت هر طبقه، با سن بارگذاری آن یکسان باشد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مدت زمان ۸ روز، از زمان بتن‌ریزی طبقه‌ی اول در پایان روز ۱۸م از شروع ساخت تا بازکردن قالب‌های طبقه‌ی مذکور در روز ۱۶م، به‌عنوان سن بارگذاری طبقه‌ی اول شناخته می‌شود که این مقدار در نرم‌افزار Midas Gen<sup>[۲۱]</sup> به‌عنوان Member age و در نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۵<sup>[۲۱]</sup> به‌عنوان Age at add در تعریف مراحل ساخت در آنالیز غیرخطی مورد استفاده‌ی کاربر است. ادامه‌ی روند ذکرشده در خصوص سن بارگذاری طبقه‌ی اول برای سایر طبقات

دست‌آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از بررسی‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد:

- درخصوص محاسبه‌ی دستی کرنش‌های خزشی و آب‌رفتگی روش فینتل و خان، با تشکیل جدول‌های قبل و بعد از ساخت و جایگزینی ضریب ۱ به جای ضرایب  $(1 - \lambda_t)$  در روابط مرتبط و جمع کرنش‌های خزشی طبقات متناظر دو جدول و کسر کرنش آب‌رفتگی طبقات جدول قبل از ساخت از مقادیر نظیر جدول بعد از ساخت، بهترین انطباق بین کرنش‌ها و تغییرشکل‌های نهایی رخ داده‌ی حاصل از روش مذکور و مقادیر متناظر حاصل از روش فرموله‌شده‌ی فینتل و خان (PCA)، که قابلیت مدل‌سازی در نرم‌افزار را دارد، به دست آمده و آثار آب‌رفتگی بی‌اهمیت رخ داده تا قبل از ساخت طبقه‌ی موردنظر اعمال شده است. اندک خطای رخ داده در طبقات ۳۳ تا ۳۶ بین دو روش مذکور، به علت تقریبی بودن روش فینتل و خان در استفاده از گراف‌ها و استخراج چشمی  $\lambda_t$ ‌های مورد استفاده‌ی طبقات یاد شده است. مثال مورد بررسی می‌تواند به‌عنوان یک نمونه‌ی بسیار مناسب جهت صحت‌سنجی و کالیبراسیون خطا، مورد استفاده‌ی پژوهشگران این عرصه قرار گیرد.

- با استفاده از رابطه‌ی ۸۱ پیشنهادی پژوهش حاضر، امکان برآورد رفتار درازمدت بتن با روش جامع بازانت از طریق تهیه‌ی ضرایب خزش به‌عنوان ورودی مورد نیاز نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۵ فراهم شد و انطباق ۱۰۰ درصدی نتایج حاصل با خروجی‌های حاصل از نرم‌افزار Midas Gen ۲۰۱۵ مؤید صحت رابطه‌ی ۸۱ پیشنهادی است. اهمیت رابطه‌ی پیشنهادی در آنالیز مرحله‌ی توالی ساخت با توجه به عدم وجود روش بازانت به‌عنوان روش پیش‌فرض نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۵ و تهیه‌ی منحنی‌های خزش - زمان، به تعداد طبقات سازه نمایان‌تر می‌شود.

- نتایج حاصل از آنالیز مرحله‌ی مثال مورد بررسی در روز ۱۰۰۰م ساخت نشان داد که در اغلب روش‌های مورد بررسی، مقادیر قابل ملاحظه‌ی کوتاه‌شدگی در وهله‌ی اول ناشی از آب‌رفتگی و سپس خزش و در نهایت تحت اثر تغییرات مدول کشسانی به وقوع پیوسته است. اختلاف مقادیر کوتاه‌شدگی بین روش‌های مختلف، تحت آثار خزش و آب‌رفتگی، بیشتر از آثار مدول کشسانی است و قسمت اعظم آن درخصوص خزش و مدول کشسانی در طبقات میانی سازه (۱۰ الی ۳۰) و درخصوص آب‌رفتگی در کلیه‌ی طبقات سازه به چشم می‌خورد. بیشترین مقادیر کوتاه‌شدگی ناشی از آثار خزش، آب‌رفتگی و مدول کشسانی، به ترتیب در روش‌های بازانت، PCA و ACI برآورد شده است.



شکل ۵. کوتاه‌شدگی ستون مورد بررسی ناشی از اثر تغییرات مدول کشسانی.

بیشتری نسبت به اختلاف مقادیر نظیر ناشی از آثار مدول کشسانی دارد. قسمت اعظم اختلاف ذکر شده درخصوص خزش و مدول کشسانی در طبقات میانی سازه (۱۰ الی ۳۰) به چشم می‌خورد (شکل‌های ۳ و ۵)، اما درخصوص آب‌رفتگی، اختلاف مقادیر روش‌های مختلف در کلیه‌ی طبقات سازه مشاهده می‌شود. به عبارتی دیگر، تغییرات میزان کوتاه‌شدگی ناشی از آب‌رفتگی ستون بین روش‌های مختلف، با بالا رفتن شماره‌ی طبقه، همواره سیر صعودی خود را حفظ می‌کند و تماس بر منحنی همواره یک علامت خواهد داشت (شکل ۴). موضوع مطرح شده با توجه به عدم وابستگی آب‌رفتگی به تنش‌های ناشی از بارگذاری مرحله‌ی قابل توجیه است. بیشترین مقادیر کوتاه‌شدگی ناشی از آثار خزش، آب‌رفتگی و مدول کشسانی به ترتیب در روش‌های بازانت، PCA و ACI برآورد شده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، مهم‌ترین روش‌های برآورد رفتار درازمدت بتن معرفی و نحوه‌ی برآورد پدیده‌های وابسته به زمان روش‌های مذکور، تحت آنالیز متداول یک مرحله‌ی و آنالیز غیرخطی مرحله‌ی بررسی و مقایسه شده است. نحوه‌ی محاسبه‌ی دستی آثار خزش و آب‌رفتگی مؤثر در تغییرشکل‌های محوری، در خصوص روش فینتل و خان انجام و به منظور صحت‌سنجی محاسبات و مدل‌سازی در نرم‌افزار، نتایج به

10. nonlinear sequential construction analysis

#### پانویس‌ها

1. notional size
2. compliance
3. exponential function
4. time ratio
5. hyperbolic equation
6. Gardner
7. Lockman
8. Fintel & Khan
9. portland cement association

#### منابع (References)

1. Kwak, H.G. and Kim, J.K. "Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences", *Building and Environment*, **41**(10), pp. 1423-1434 (2006).
2. Park, S.W., Choi, S.W. and Park, H.S. "Moving average

- correction method for compensation of differential column shortenings in high-rise buildings”, *Struct. Design Tall Spec. Build.*, **22**(9), pp. 718-728 (2013).
3. Kim, H.S. “Optimum distribution of additional reinforcement to reduce differential column shortening”, *Struct. Design Tall Spec. Build.*, **24**(10), pp. 724-738 (2015).
  4. Njomo, W.W. and Ozay, G. “Minimization of and shortening column differential sequential analysis of RC 3D-frames using ANN”, *Structural Engineering and Mechanics An International Journal*, **51**(6), pp. 989-100 (2014).
  5. Epackachi, S., Mirghaderi, R., Esmaili, O. and et al. “Seismic evaluation of a 56-story residential reinforced concrete high-rise building based on nonlinear dynamic time-history analyses”, *Struct. Design Tall Spec. Build.*, **21**(4), pp. 233-248 (2012).
  6. Esmaili, O., Epackachi, S., Mirghaderi, R. and et al. “Evaluation of the construction sequence loading effects on seismic performance of high-rise buildings with different structural systems”, *9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ottawa, Ontario, Canada (2007).
  7. Kheyroddin, A., Gholhaki, M., and Afshari, M.J. “Investigation of the exact sequential construction analysis in comparison in conventional analysis and the approximate CFM method”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32**(2), pp.81-92 (2017).
  8. CEB-FIP Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, Thomas Telford, Lausanne (1993).
  9. CEB-FIP Model Code 2010, Final Draft, Volume 1, Fib Bulletin 65, Lausanne, Switzerland (2012).
  10. ACI Committee 209, “Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures (ACI209R-92)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA (1997).
  11. Bazant, Z.P. and Baweja, S., *Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures (Model B3)*, ACI Special Publication (2000).
  12. Bazant, Z.P. and Wittmann, F.H., *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York (1982).
  13. Gardner, N.J. and Lockman, M.J. “Design provisions for drying shrinkage and creep of normal strength concrete”, *ACI Materials Jrn.*, **98**(2), pp. 159-167 (2001).
  14. Gardner, N.J. “Comparison of prediction provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concretes”, *Can. J. Civ. Eng.*, **31**(5), pp. 767-775 (2004).
  15. Fintel, M. and Khan, F.R. “Effects of column creep and shrinkage in tall structures-prediction of inelastic column shortening”, *American Concrete Institute ACI*, **66**(12), pp. 957-967 (1969).
  16. Fintel, M. and Khan, F.R. “Effect of column creep and shrinkage in tall structures -Analysis for differential shortening of columns and field observation of structures”, American Concrete Institute, ACI SP-27, pp. 95-119 (1971).
  17. Stafford Smith, B. and Coull, A., *Tall Building Structures: Analysis and Design*, John Wiley & Sons Inc., pp. 461-474 (1991).
  18. Fintel, M., Ghosh, S.K. and Iyengar, H. “Column shortening in tall structure-prediction and compensation”, (EB108.01D), Portland Cement Association, Skokie, IL (1987).
  19. IS 456-2000, *Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice*, Bureau of Indian Standards, 4th Revision, New Delhi (2000).
  20. CEN European Committee for Standardization, “Eurocode 2: Design of concrete structures”, European Standard pr-EN (July, 2004).
  21. Midas Information Technology Co. Ltd. “MIDAS GEN 2015- general structural design system software, analysis reference manual”, <http://www.midasit.com>.
  22. Computers and Structures Inc., “ETABS2015-integrated building design software, technical reference manual”, Berkeley, California (2015).