فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
زمستان ۱۳۸۶، شماره‌ی چهلم، ص. ۴۳-۵۰

محاسبه‌ی وارفتگی و افت در سازه‌های بلند بتنی با استفاده از آنالیز مراحل ساخت غیرخطی

محسن قبدیان (کارشناس ارشد)
ابوالحسن وفائی (استاد)
همایون اسمعیل‌پوراستکانچی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار کوتاه شدگی ستون‌ها و همچنین اختلاف کوتاه شدگی بین دیوار و ستون در قاب‌های بتن آرمه با دیوار برشی با استفاده از روش‌های آنالیز غیرخطی مرحله به مرحله و نیز با استفاده از روش‌های انتگرال‌گیری مستقیم و سری دیریکله، و با در نظر گرفتن تغییرات هر پارامتر به‌صورت جداگانه، محاسبه شده است. تعدادی قاب دوبعدی که از سازه‌های واقعی سه بعدی استخراج شده‌اند و از ۱۵ تا ۴۵ طبقه‌اند، مورد مطالعه قرارگرفته‌اند. نتایج این کار می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای تخمین و درک چگونگی تأثیر مسئله‌ی وارفتگی (خزش) و افت (آبرفتگی) در رفتار سازه‌های بتنی به‌کار رود.

۱. مقدمه

تعیین کرنش واقعی به‌وجود آمده در ستون‌های یک سازه‌ی بتنی، ناشی از وارفتگی و افت و اثر آن بر توزیع نیروهای داخلی همواره مسئله‌یی پیچیده بوده است. محاسبه‌ی دقیق این نوع افت به دلیل وابستگی شدید به پارامترهای مختلف ــ نظیر نوع بتن، مقاومت بتن، طول بازه‌های زمانی ساخت، نوع سازه و کاربرد آن، میزان فولاد موجود در بتن، آب و هوای محل ساخت، مقاطع مورد استفاده در سازه و نیز به‌دلیل در اختیار نبودن مقادیر دقیق بعضی از این پارامترها، بسیار مشکل است. وقتی که یک سازه‌ی بتنی تحت تأثیر نیرویی ثابت قرار می‌گیرد، پاسخ نمونه هم به شکل آنی و هم وابسته به زمان می‌باشد. تحت تأثیر چنین نیرویی، و بر اثر گذشت زمان، تغییر شکل سازه افزایش پیدا می‌کند و در نهایت از تغییر شکل اولیه بزرگ‌تر می‌شود. اگر در چنین حالتی دما و تنش در سازه ثابت بماند ولی کرنش به‌صورت منظم افزایش یابد، این کرنش ناشی از وارفتگی و افت خواهد بود. معمولاً تغییر شکل‌های موجود در سازه، به جز تغییر مکان‌های ناشی از بارهای سرویس، به‌دلیل وارفتگی و افت هستند. برای تعیین دقیق و کاربردی میزان کرنش وارفتگی و افت باید اولاً داده‌های مناسبی از مشخصات بتن مورد استفاده، و پارامترهای مربوط به وارفتگی و افت در اختیار باشند، ثانیاً برای آنالیز سازه‌یی، چنان که تأثیر عوامل زمانی را در نظر بگیرد، از روش‌های معتبر و قابل کاربرد استفاده شود. در این نوشتار پارامترهای وارفتگی با استفاده از آئین نامه‌ی CEB-۱۹۹۰ FIPتعیین شده‌اند. همچنین برای حل و آنالیز سازه از روش سری دیریکله همراه با روش اجزاء محدود، به‌کمک نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ استفاده شده است. برای حل مسائل شامل وارفتگی و آبرفتگی باید پارامترهای مختلفی مانند سرعت ساخت سازه، درصد رطوبت هوا، شکل، اندازه و نوع سازه‌ی مورد استفاده، و غیره، را در نظر گرفت. در این نوشتار سعی بر این است که تأثیر بعضی از این عوامل بر کرنش ناشی از وارفتگی و افت بررسی شود. در انتها ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که مسئله‌ی وارفتگی وافت بیشتر در مورد سازه‌های حساس به کرنش‌های کوچک ـ مثل حائل‌های بتنی، پوسته‌هایی که در عمق زیاد مدفون شده‌اند و پل‌های با دهانه بزرگ ـ اهمیت خاصی می‌یابد، ولی به هر حال در مورد سازه‌های بلند بتنی که مورد بحث در این نوشتار است کوتاه شدگی ستون‌ها و تأثیر آن بر توزیع نیروها و تغییر مکان در دیوارها و تیرها و سرویس‌دهی سازه مسائل مهمی هستند که نیاز به تجزیه و تحلیل دارند.

۲. انواع کرنش در بتن

در هر زمان t میزان کرنش بتن $\epsilon(t)$ شامل چند مؤلفه است. این اجزا شامل کرنش لحظه‌یی یا کشسانی بتن $\epsilon_e(t)$، کرنش ناشی از وارفتگی $\epsilon_c(t)$، کرنش ناشی از افت بتن $\epsilon_{sh}(t)$ و کرنش ناشی از تغییرات دمای $\epsilon_t(t)$ است. بنابراین برای کرنش بتن در لحظه‌ی t می‌توان نوشت:

$$\epsilon(t) = \epsilon_e(t) + \epsilon_c(t) + \epsilon_{sh}(t) + \epsilon_t(t) \qquad (۱)$$

کرنش کشسانی را می‌توان چنین نوشت:

$$\epsilon_e(t) = \sigma_\circ / E_c(t) \qquad (۲)$$

Archive of SID

www.SID.ir

که $E_c(t)$ در طول زمان قابل تغییر است. کرنش وارفتگی را هم می‌توان چنین تعریف کرد:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_d(t) + \varepsilon_f(t) \qquad (۳)$$

که در آن $\epsilon_f(t)$ معروف به کرنش جریان (flow strain) است که خود شامل سه بخش: کرنش وارفتگی پایه $\epsilon_{fb}(t)$، کرنش خشک شدگی $\epsilon_{fd}(t)$ و کرنش کشسانی به تأخیر افتاده $\epsilon_{fi}(t)$ است. برای کرنش وارفتگی کل می‌توان نوشت:

$$\epsilon_c(t) = \phi(t)\epsilon_e \qquad (۴)$$

که در آن $\phi(t)$ را می‌توان نسبت کرنش ناشی از وارفتگی به کرنش کشسان، ظرفیت وارفتگی بتن یا ضریب وارفتگی نامید. کرنش ناشی از افت یا $\epsilon_{sh}(t)$ هم برابر است با:

$$\epsilon_{sh}(t, t_\circ) = \epsilon_{sho}\beta_s(t - t_\circ) \qquad (۵)$$

$$\epsilon_{sho} = \epsilon_s(fcm)\beta_{RH} \qquad (۶)$$

$$\epsilon_s(fcm) = [۱۶۰ + ۱۰B_{sc}(۹ - fcm/fcmo)] * ۱۰^{-۶}$$

$$\beta_{RH} = -۱/۵۵[۱ - (RH/۱۰۰)^۳] \quad ٪۴۰ \le RH \le ٪۹۹$$

$$\beta_{RH} = ۰/۲۵ \quad RH > ٪۹۹ \qquad (۷)$$

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{(t - t_s)/t_۱}{۳۵۰/(h/h_\circ)^۲ + (t - t_s)/t_۱}\right]^{۰/۵} \qquad (۸)$$

البته در این معادلات:

t = سن بتن (بر حسب روز)؛

t_s = سن بتن (برحسب روز) در هنگام شروع جمع‌شدگی؛

$t_۱$ = ۱ روز؛

$h_\circ = ۱۰۰mm$؛

f_{cm} = مقاومت فشاری میانگین بتن در سن ۲۸ روز (بر حسب MPa)؛

$f_{cmo} = ۱۰MPa$؛

RH = درصد رطوبت نسبی؛

B_{Sc} ضریبی است که مقدار آن برای سیمان‌های کندگیر برابر با ۴، برای سیمان‌های معمولی با سرعت گیرش متعارف یا سیمان‌های تندگیر برابر با ۵، و برای سیمان‌های پرمقاومت تندگیر برابر با ۸ است.[۱]

۳. روش‌های مختلف تحلیل وارفتگی

پیش‌بینی کوتاه شدگی ناشی از وارفتگی و افت به‌واسطه‌ی این که وارفتگی و افت تابعی غیرخطی از ماده، بارگذاری و پارامترهای طراحی مثل درصد رطوبت نسبی، ضریب حجم به سطح، درصد فولاد، تاریخچه‌ی بارگذاری، مقاومت فولاد و غیره است، کاری بسیار مشکل است. در سال‌های اخیر بسیاری از محققان، مطالعاتی برای پیش‌بینی رفتار وارفتگی و افت بتن انجام داده‌اند، نظیر فینتل وخان (۱۹۶۹)، برادفوردوگااو (۱۹۹۳)، راسل ولارسن (۱۹۸۹)، سامرا (۱۹۹۵).[۲-۵] همچنین روش‌های مختلفی برای آنالیز سازه‌ها با توجه به رفتار وابسته به زمان وجود دارد که از آن میان می‌توان به روش‌های EMM، RCM، AEMM، IDM اشاره کرد. روش EMM که به‌وسیله‌ی فابر (۱۹۲۷) پیشنهاد شد، در واقع ساده‌ترین و قدیمی‌ترین روش برای لحاظ کردن اثرات وارفتگی است.[۶]

روش AEMM ابتدا به‌وسیله‌ی تروست (۱۹۶۷) ابداع شد و سپس به‌وسیله باژانت (۱۹۷۲)[۷و۸] تکمیل شد. روش RCM به‌وسیله‌ی گلانویل (۱۹۳۰) پیشنهاد، و سپس به‌وسیله‌ی ویتنی (۱۹۳۲) تکمیل شد.[۹] روش IDM هم که در واقع یک روش بهبود یافته برای پیش‌بینی دقیق‌تر رفتارهای طولانی‌مدت سازه است، به‌وسیله‌ی نیلسن (۱۹۷۰) ارائه شد.[۱۰]

همچنین روش‌هایی توسط مؤسسه‌ی بتن آمریکا (۱۹۹۲) وکمیته‌ی بین‌المللی بتن اروپا (۱۹۹۰) ارائه شده‌است.[۱۱و۱۲] روش دیگر برای آنالیز زمانی سازه‌ها روش سری دیریکله است که توسط باژانت (۱۹۷۳) پیشنهاد شد.[۱۳] در این روش با تعریف $J(t, t')$، به‌عنوان تابع وارفتگی و تخمین آن با یک سری مخصوص، موسوم به سری دیریکله، و با بسط این روش به یک روش مرحله به مرحله برای استفاده در محاسبات رایانه‌یی می‌توان مسائل مربوط به وارفتگی را حل کرد. مسئله‌ی مربوط به افت هم با استفاده از فرضیات آیین‌نامه کمیته‌ی بین‌المللی بتنی اروپا (۱۹۹۰) CEB - FIP برای کرنش ناشی از افت قابل حل است.

۴. روش آنالیز غیرخطی مرحله به‌مرحله[۱]

این روش حالت خاصی از آنالیز استاتیکی غیرخطی است که دارای امکان ساخت مرحله به مرحله با در نظرگرفتن خواص وابسته به زمان مواد است. به‌دلیل اینکه سازه در طول آنالیز در حال تغییر است این آنالیز از نوع آنالیز استاتیکی غیرخطی است. برای هر آنالیز از این نوع می‌توان تعدادی مرحله‌ی ساخت زمانی تعریف کرد که برای سازه‌های ما هر مرحله، شامل ساخت یک طبقه در ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۳۵ روز است و در انتهای ساختِ کلِ سازه هم تعدادی مرحله‌ی زمانی برای لحاظ رفتار زمانی مواد تعریف شده است. با توجه به این نکته که این نوع آنالیز مختص مسائل ناشی از وارفتگی و افت نیست و توضیح کامل مدل‌کردن سازه‌ها توسط این روش در این مجال نمی‌گنجد، برای فهم بهتر می‌توان به بخش آنالیز استاتیکی غیرخطی در راهنمای نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ مراجعه کرد.

Archive of SID
www.SID.ir

۵. بررسی ستون ساده

برای تأیید روش حل با نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰، با کاربرد آن در یک مورد نمونه‌یی ساده و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با نتایج به دست آمده از روش‌های IDM, RCM, EMM, AEMM درستی عملکرد نرم‌افزار حاصل شد. مشخصات ستونی به‌طول ۶ متر که تحت تأثیر نیروی ثابت ۱۰۰۰KN قرارگرفته است، در جدول ۱ آورده شده است.

همچنین سن بتن در هنگام شروع آبرفتگی برابر $\tau_\circ = ۱۰ day$ است. برای ضریب وارفتگی هم مقادیر زیر فرض شده است:

$$(t-\tau_\circ) = \circ day; \phi = \circ/\circ; E_{sh}(t-\tau_\circ) * ۱\circ^{-۶} = \circ/\circ$$

$$(t-\tau_\circ) = ۲۵ day; \phi = ۱/\circ; E_{sh}(t-\tau_\circ) * ۱\circ^{-۶} = ۲\circ\circ$$

$$(t-\tau_\circ) = ۱\circ\circ day; \phi = ۲/\circ; E_{sh}(t-\tau_\circ) * ۱\circ^{-۶} = ۴\circ\circ$$

$$(t-\tau_\circ) = ۱\circ\circ\circ\circ day; \phi = ۳/\circ; E_{sh}(t-\tau_\circ) * ۱\circ^{-۶} = ۶\circ\circ$$

نتایج حاصل از مقایسه‌ی روش‌های مختلف همراه با نتایج حاصل از نرم‌افزار، در شکل ۱ نشان داده شده است.

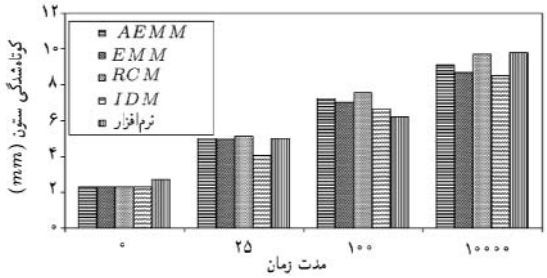
چنان‌که ملاحظه می‌شود تطابق خوبی بین نتایج ملاحظه می‌شود و اختلاف مشاهده شده عمدتاً به‌دلیل تفاوت بین مدل تحلیل در نرم‌افزار و پیش‌فرض‌های انجام شده در محاسبات مربوط به روش‌های دستی است. تجربه نشان داده است که روش EMM معمولاً کمینه‌ی مقدار کرنش وارفتگی را ارائه می‌دهد. برای محاسبات دستی روش AEMM توصیه می‌شود؛ زیرا هم دقت کافی و کارایی و سادگی لازم را دارد، و هم می‌توان این روش را به نرم‌افزارهای مختلف محاسبات سازه‌یی وارد کرد. در بسیاری از حالات، روش IDM هم بیان ساده‌یی از رفتار بلندمدت سازه در تجزیه و تحلیل آن در اختیار می‌گذارد. البته روش IDM، به‌لحاظ طبیعت فرمول‌بندی‌اش، در حالاتی که زمان بارگذاری کم‌تر از ۱۰۰ روز است، جواب‌های پیش‌بینی نشده‌یی می‌دهد.[۱۴]

۶. طراحی مدل‌های سازه

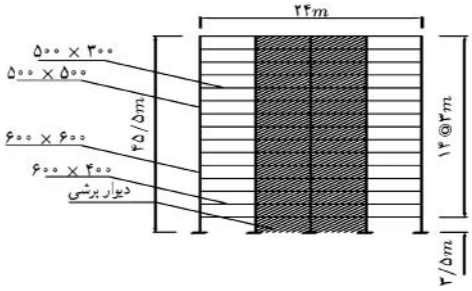
چند نمونه سازه‌ی بتنی در ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ طبقه انتخاب شده‌اند. سازه‌های ۱۵ و ۲۰ طبقه چهار دهانه دارند که در دهانه‌های دوم و سوم از دیوارهای برشی استفاده شده است. ارتفاع طبقه‌ی همکف ۳/۵ متر و بقیه‌ی طبقات ۳ متر است (شکل ۲). سازه‌های ۲۵، ۳۰، ۴۰ و۴۵ طبقه هم دارای ۷ دهانه‌اند که در دهانه‌های دوم و سوم و پنجم و ششم از دیوار برشی استفاده شده است. ارتفاع تمامی طبقات ۳/۵متر است و طول دهانه در تمامی مدل‌ها ۶ متر است. در این نوشتار از مدل‌های دوبعدی، که از سازه‌های سه‌بعدی استخراج شده‌اند، استفاده شده است و مقاطع مورد استفاده در آنها مقاطعی واقعی است که از طراحی بهینه‌ی سازه‌ها به‌دست آمده‌اند. در تمامی سازه‌ها مقادیر

جدول ۱. مشخصات ستون مورد استفاده.

ρ	$A_S(mm^۲)$	$A_C(mm^۲)$	$E_S(GPa)$	$E_C(\tau_\circ)(GPa)$
۰/۰۲	۱۸۰۰	۹۰۰۰۰	۲۰۰	۲۵



شکل ۱. نتایج مقایسه‌ی روش‌های IDM, RCM, EMM, AEMM با نتایج حاصل از نرم‌افزار.



شکل ۲. مشخصات نمونه‌یی از قاب‌های مورد مطالعه.

اولیه برای محاسبات وارفتگی و افت با در نظرگرفتن پارامترهایی مثل «درصد رطوبت نسبی»، «ضخامت نسبی»، «ضریب مربوط به افت (BSC)» و «سن بتن» در آغاز افت تعیین شده‌اند. همچنین برای تجزیه و تحلیل وارفتگی از روش سری دیریکله و روش انتگرال‌گیری مستقیم استفاده شده است. برای تمامی مدل‌ها پارامترهای اولیه‌ی وارفتگی و افت و نیز مشخصات عمومی سازه به شرح زیر انتخاب شده است:

سرعت ساخت طبقات = ۷ روز برای هر طبقه و $f'_c \cong ۲۸MPa$ (مقاومت فشاری بتن)

سن بتن در شروع افت = ۱۰ روز و رطوبت نسبی (h) = ٪۷۰

۷. نتایج به دست آمده

در این قسمت به بررسی نتایج به دست آمده در سازه‌های مورد مطالعه می‌پردازیم. در جدول ۲ مقاطع تیر و ستون در سازه‌های مختلف نشان داده شده است.

۱.۷. تأثیر سرعت ساخت

سرعت ساخت قسمت‌های مختلف سازه در مقادیرکوتاه‌شدگی ستون‌ها و اختلاف بین کوتاه‌شدگی ستون و دیوار نقش مهمی دارد. نتایج مربوط

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. مقاطع مورد استفاده در سازه‌های مورد مطالعه.

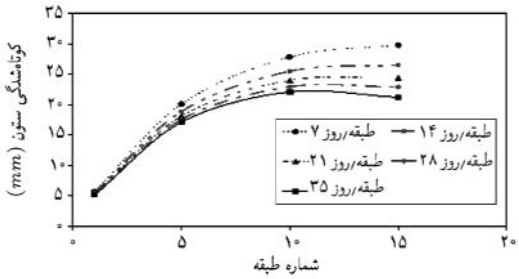
تعداد طبقات	مقاطع مورد استفاده در تیرها (mm)	مقاطع مورد استفاده در ستون‌ها (mm)
۱۵	۶۰۰ × ۴۰۰(۱ − ۹); ۵۰۰ × ۳۰۰(۹ − ۱۵)	۶۰۰ × ۶۰۰(۱ − ۸); ۵۰۰ × ۵۰۰(۸ − ۱۵)
۲۰	۸۰۰ × ۸۰۰(۱ − ۱۳); ۶۰۰ × ۴۰۰(۱۳ − ۲۰)	۸۰۰ × ۸۰۰(۱ − ۱۳); ۶۰۰ × ۶۰۰(۱۳ − ۲۰)
۲۵	۸۰۰ × ۸۰۰(۱ − ۱۵); ۸۰۰ × ۵۰۰(۱۵ − ۲۵)	۱۰۰۰ × ۱۰۰۰(۱ − ۱۵); ۸۰۰ × ۸۰۰(۱۵ − ۲۵)
۳۰	۸۰۰ × ۹۵۰(۱ − ۱۴); ۸۰۰ × ۸۰۰(۱۴ − ۲۳); ۶۰۰ ×۶۰۰(۲۳ − ۳۰)	۱۱۰۰ × ۱۱۰۰(۱ − ۱۴); ۸۰۰ × ۸۰۰(۱۴ − ۲۳); ۶۰۰ ×۶۰۰(۲۳ − ۳۰)
۴۰	۱۱۰۰ × ۱۱۰۰(۱ − ۱۵); ۱۰۰۰ × ۱۰۰۰(۱۵ − ۲۵); ۸۰۰ ×۸۰۰(۲۵ − ۳۳); ۷۰۰ × ۷۰۰(۳۳ − ۴۰)	۱۵۰۰ × ۱۵۰۰(۱ − ۱۵); ۱۲۵۰ × ۱۲۵۰(۱۵ − ۲۵); ۱۰۰۰ ×۱۰۰۰(۲۵ − ۳۲); ۷۰۰ × ۷۰۰(۳۲ − ۴۰)
۴۵	۱۱۰۰ × ۱۱۰۰(۱ − ۱۵); ۱۰۰۰ × ۱۰۰۰(۱۵ − ۲۵); ۸۰۰ ×۸۰۰(۲۵ − ۳۳); ۷۰۰ × ۷۰۰(۳۳ − ۴۵)	۱۵۰۰ × ۱۵۰۰(۱ − ۱۵); ۱۲۵۰ × ۱۲۵۰(۱۵ − ۲۵); ۱۰۰۰ ×۱۰۰۰(۲۵ − ۳۲); ۷۵۰ × ۷۵۰(۳۲ − ۴۵)

به بررسی کوتاه شدگی ستون‌ها برای سرعت ساخت‌های مختلف در سازه‌های ۱۵ و ۴۰ طبقه در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.

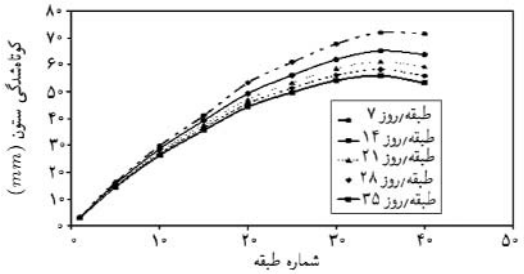
با افزایش مدت‌زمان ساخت هر طبقه در سازه، میزان کوتاه‌شدگی ستون‌های طبقات کاهش می‌یابد. یکی از عوامل مهم در مورد مسائل وارفتگی و افت مسئله اختلاف کوتاه‌شدگی بین ستون و دیوار برشی برای سرعت ساخت‌های مختلف است. مقادیر مختلف کوتاه‌شدگی بین ستون و دیوار در طبقات مختلف سازه‌ی ۱۵ طبقه در جدول ۳ ارائه شده است.

همچنین در شکل‌های ۵ و ۶ اختلاف کوتاه‌شدگی برای طبقات مختلف سازه‌های ۲۵ و ۴۵ طبقه نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت ساخت سازه، اختلاف کوتاه شدگی نیز کاهش می‌یابد. البته مقدار این اختلاف چندان محسوس نیست و معمولاً از ۳ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند.

لازم به ذکر است که بیشینه‌ی اختلاف کوتاه شدگی در میانه‌ی رو به بالای سازه اتفاق می‌افتد که این نتیجه با نتایج موجود از تحقیقات انجام شده‌ی قبلی تطابق دارد.[۱۵و۱۶] همچنین می‌توان از نتایج به دست آمده چنین استنباط کرد که دیوارهای برشی در پایان عمر مفید سازه بیش از ستون‌ها افت پیدا می‌کنند و سازه حالت مقعّر به‌خود می‌گیرد. این نتیجه‌گیری نیز با نتایجی که محققان ارائه کرده‌اند مطابقت دارد.



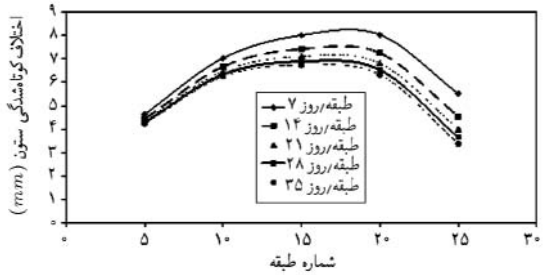
شکل ۳. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون نسبت به سرعت ساخت‌های مختلف در سازه‌ی ۱۵ طبقه.



شکل ۴. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون نسبت به سرعت ساخت‌های مختلف در سازه‌ی ۴۰ طبقه.

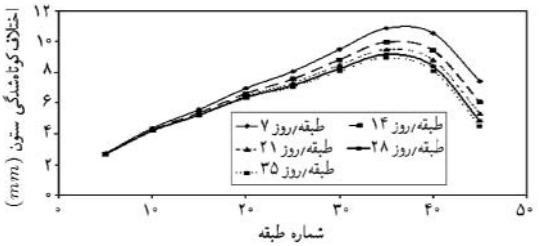
جدول ۳. اختلاف کوتاه‌شدگی بین ستون و دیوار در طبقات مختلف سازه ۱۵ طبقه.

سرعت‌ساخت	شماره طبقه			
	۱۵	۱۰	۵	۱
۷	۸٫۱۵	۸٫۷۳	۱۰٫۰۰	۳٫۲۷
۱۴	۶٫۷۷	۹٫۶۲	۹٫۳۴	۳٫۱
۲۱	۵٫۹۶	۸٫۹۶	۸٫۹۶	۳٫۰۱
۲۸	۵٫۷	۸٫۵	۸٫۶۸	۲٫۹۵
۳۵	۵٫۴	۸٫۱۵	۸٫۴۷	۲٫۸۹

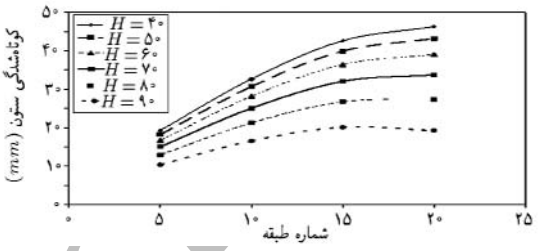


شکل ۵. مقادیر اختلاف کوتاه‌شدگی بین ستون و دیوار نسبت به تغییرات سرعت ساخت برای سازه ۲۵ طبقه.

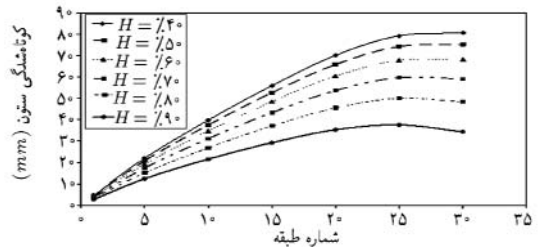
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۶. مقادیر اختلاف کوتاه‌شدگی نسبت به تغییرات سرعت ساخت برای سازه‌ی ۴۵ طبقه.



شکل ۷. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون ها نسبت به تغییرات درصد رطوبت نسبی برای سازه‌ی ۲۰ طبقه.



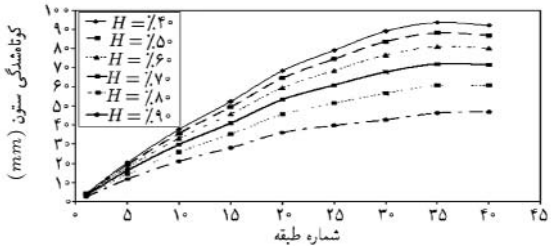
شکل ۸. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون‌ها نسبت به تغییرات درصد رطوبت نسبی برای سازه ۳۰ طبقه.

۲.۷. تأثیر درصد رطوبت نسبی

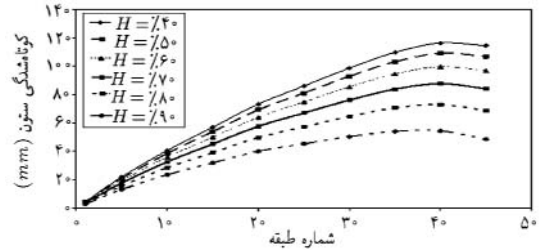
«درصد رطوبت نسبی» عاملی است که هم در تعیین کرنش ناشی از وارفتگی، و هم در مقادیرکرنش ناشی از افت مؤثر است. در شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ مقادیرکوتاه‌شدگی ستون‌ها برای سازه‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ طبقه با توجه به تغییرات درصد رطوبت نسبی نشان داده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود با توجه به تفاوت درصد رطوبت نسبی در مناطق مختلف، تغییرات کرنش ناشی از وارفتگی و افت نسبت به این پارامتر کاملاً محسوس است. مثلاً مقادیر کوتاه‌شدگی و درصد تغییرات آن‌ها در طبقه‌های دهم و پانزدهم سازه‌ی ۲۵ طبقه در جدول ۴ ارائه شده است.

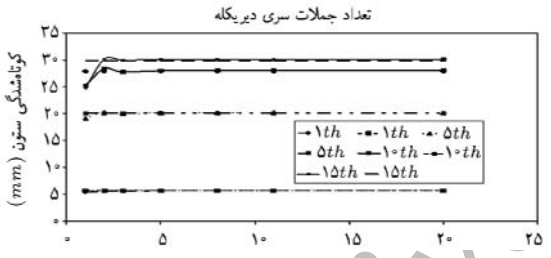
توجه به مسئله‌ی وارفتگی در نرم‌افزار توسط دو روش انتگرال‌گیری مستقیم و روش سری دیریکله انجام می‌پذیرد. مقادیرکوتاه شدگی ستون با استفاده از این دو روش برای دو سازه‌ی ۲۰ و ۳۰ طبقه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۹. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون‌ها نسبت به تغییرات درصد رطوبت نسبی برای سازه ۴۰ طبقه.



شکل ۱۰. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون‌ها نسبت به تغییرات درصد رطوبت نسبی برای سازه‌ی ۴۵ طبقه.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی دو روش سری دیریکله و انتگرال‌گیری مستقیم در سازه‌ی ۱۵ طبقه.

چنان که ملاحظه می‌شود مقادیر دو روش تقریباً از جمله سوم یا چهارم سری دیریکله به هم نزدیک می‌شوند و از این نکته می‌توان برای محاسبات استفاده کرد.

۳.۷. تأثیر وارفتگی و افت بر نیروهای داخلی

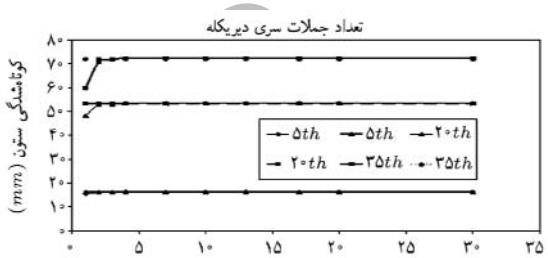
معمولاً در طراحی سازه‌ها مسئله‌ی تأثیر وارفتگی و افت مورد توجه قرار نمی‌گیرد و مقادیر نیروهای داخل اعضای سازه براساس تجزیه و تحلیل‌هایی تعیین می‌شود که رفتار غیرخطی مواد در طول زمان به‌دلیل وجود وارفتگی و افت، در آنها تأثیری ندارد. در جداول ۵ و ۶ ممان و برش به‌دست آمده در بعضی از تیرها، که براساس تجزیه و تحلیل‌های مختلف به دست آمده است، با هم مقایسه می‌شوند.

با توجه به نتایج به دست آمده، به نظر می‌رسد برای تعیین مقدار صحیح نیروها، تجزیه و تحلیل وارفتگیِ سازه لازم و ضروری است ــ به‌خصوص در تیرها که توزیع ممان در آنها در حالت آنالیز

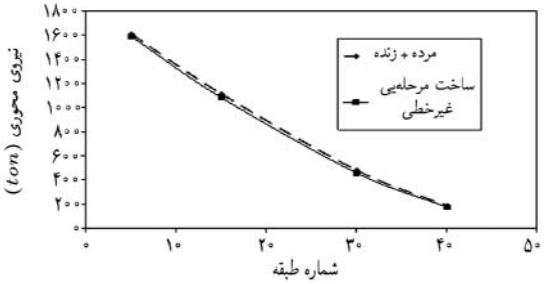
Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۴. مقادیر کوتاه‌شدگی و درصد تغییر آنها در طبقات ۱۰، ۱۵ و ۲۰ از سازه‌ی ۲۵ طبقه.

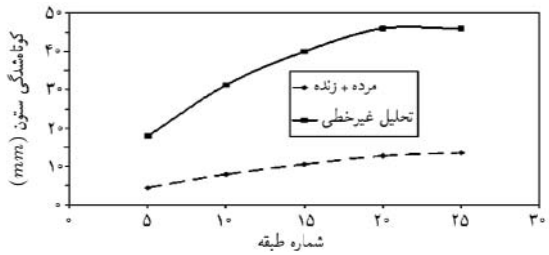
طبقه بیستم		طبقه پانزدهم		طبقه دهم		
درصد تغییرات	کوتاه‌شدگی	درصد تغییرات	کوتاه‌شدگی	درصد تغییرات	کوتاه‌شدگی	درصد رطوبت نسبی (h)
-	۶۱٫۶۸	-	۵۲٫۹۳	-	۴۰٫۸۳	۴۰
۶٫۵۳	۵۷٫۶۵	۶٫۴	۴۹٫۵۷	۶٫۲۶	۳۸٫۲۷	۵۰
۱۴٫۹	۵۲٫۴۸	۱۴٫۴۷	۴۵٫۲۷	۱۴٫۰۱	۳۵٫۱۱	۶۰
۲۵٫۴۴	۴۵٫۹۹	۲۴٫۴۷	۳۹٫۹۸	۲۳٫۴۹	۳۱٫۲۴	۷۰
۳۸٫۰۵	۳۸٫۲۱	۳۶٫۴۶	۳۳٫۶۳	۳۴٫۸۵	۲۶٫۶	۸۰
۵۳٫۱۱	۲۸٫۹۲	۵۰٫۷۴	۲۶٫۰۷	۴۸٫۳۹	۲۱٫۰۷	۹۰



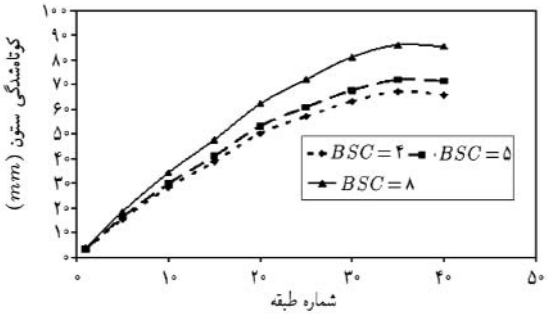
شکل ۱۲. مقایسه‌ی دو روش سری دیریکله و انتگرال‌گیری مستقیم در سازه‌ی ۳۰ طبقه.



شکل ۱۳. مقادیر نیروی محوری موجود در ستون با توجه به تجزیه و تحلیل‌های مختلف.



شکل ۱۴. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون ناشی از آنالیزهای مختلف.



شکل ۱۵. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون تحت تأثیر BSCهای مختلف.

وارفتگی با آنالیز معمول سازه تفاوت دارد. البته بدیهی است که این مسئله نتایج تجزیه و تحلیل‌های مختلفی مثل تجزیه و تحلیل‌های دینامیکی را هم که روی سازه انجام می‌شود تغییر می‌دهد و بنابراین بحرانی‌ترین حالت را باید مد نظر قرار داد. مقادیر برش در تیرها تحت تأثیر اثرات زمانی تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین مقادیر نیروی محوری موجود در ستون‌ها هم چندان متأثر از وارفتگی و افت نیست. در شکل ۱۳ این موضوع نشان داده شده است.

۴.۷. تأثیر آنالیز وارفتگی در کوتاه‌شدگی ستون‌ها

برای به‌دست آوردن کوتاه شدگی ستون‌ها حتماً باید آنالیزهای مدت‌دار را که اثرات وارفتگی و افت را لحاظ می‌کند مورد استفاده قرار داد. در شکل ۱۴ این موضوع نشان داده شده است.

۵.۷. اثر پارامتر BSC مربوط به آبرفتگی در کوتاه‌شدگی ستون‌ها

در این بخش تأثیر تغییر پارامتر BSC ــ مربوط به نوع سیمان مورد استفاده در بتن ــ روی کوتاه شدگی ستونی در سازه‌ی ۴۰ طبقه بررسی می‌شود. نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

۶.۷. تأثیر f'_c بتن بر کوتاه‌شدگی ستون‌ها

نتایج آیین‌نامه‌ی CEB - FIP(۱۹۹۰) برای بتن‌های تا مقاومت ۲۸ روزه ۸۵MPa معتبر است. در این بخش تأثیرات این پارامتر مقاومتی بر کوتاه شدگی ستون‌ها، و نیز اختلاف کوتاه شدگی بین ستون و دیوار بررسی می‌شود. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ این تغییرات نشان داده شده است.

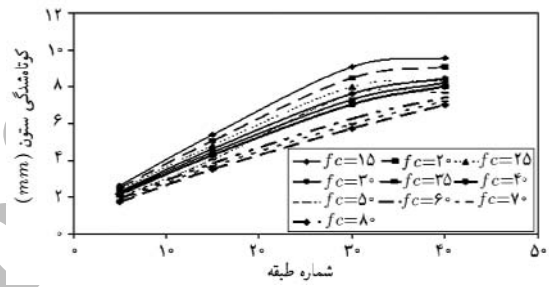
www.SID.ir

جدول ۵. مقادیر ممان برحسب تن ـ متر در تیرهای سازه‌ی ۴۵ طبقه با توجه به تجزیه و تحلیل‌های مختلف و برای درصد رطوبت نسبی ۷۰ درصد و سرعت ساخت ۱۴ روز برای هر طبقه.

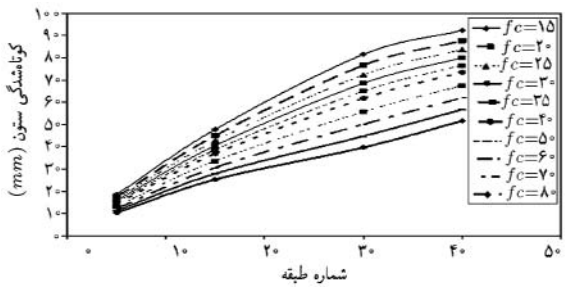
طبقه	بارمرده (استاتیکی خطی)	مرده + زنده (استاتیکی خطی)	ساخت مرحله‌یی غیرخطی
۵	$M^- = ۲۵/۲۲$ $M^+ = ۸/۶۴$	$M^- = ۲۸/۴$ $M^+ = ۹/۷۱$	$M^- = ۲۴/۷۱$ $M^+ = ۱۴/۲۷$
۱۵	$M^- = ۳۰/۹۳$ $M^+ = ۱۱/۱۳$	$M^- = ۳۵/۰۴$ $M^+ = ۱۲/۶۲$	$M^- = ۲۷/۸۱$ $M^+ = ۱۹/۱۹$
۳۰	$M^- = ۲۵/۰۳$ $M^+ = ۹/۱۵$	$M^- = ۲۹/۱۲$ $M^+ = ۱۰/۶۴$	$M^- = ۱۸/۳۲$ $M^+ = ۱۷/۰۲$
۴۰	$M^- = ۱۹/۴۸$ $M^+ = ۶/۹۲$	$M^- = ۲۲/۹۷$ $M^+ = ۸/۱۵$	$M^- = ۱۲/۶۵$ $M^+ = ۱۳/۸۱$

جدول ۶. مقادیر برش برحسب تن در تیر در سازه‌ی ۲۵ طبقه با توجه به تجزیه و تحلیل‌های مختلف.

	شماره طبقه				
نوع آنالیز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
مرده	۱۴/۸۵	۱۶/۸	۱۴/۰۰	۱۴/۶۲	۱۲/۹۶
مرده + زنده	۲۰/۴۲	۲۳/۱۶	۱۹/۹۷	۲/۰۸۸	۱۸/۵۳
ساخت مرحله‌یی غیرخطی	۲۰/۸۶	۲۲/۹۲	۱۹/۷۲	۱۹/۶۲	۱۸/۱۹



شکل ۱۶. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون نسبت به تغییرات f'_c در سازه ۴۰ طبقه.



شکل ۱۷. مقادیر کوتاه‌شدگی ستون نسبت به تغییرات f'_c در سازه ۴۵ طبقه.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده هرچه سرعت ساخت سازه کم‌تر باشد، کوتاه‌شدگی ستون‌ها و نیز اختلاف کوتاه‌شدگی بین ستون و دیوار کاهش می‌یابد. نکته‌ی قابل توجه این که هر چه به سمت طبقات بالای سازه برویم درصد تغییرات کوتاه‌شدگی نسبت به سرعت ساخت افزایش خواهد یافت. این مسئله در مورد اختلاف کوتاه‌شدگی بین ستون و دیوار نیز صادق است. مثلاً برای سازه‌ی ۴۵ طبقه با سرعت ساخت‌های مختلف بین ۷ تا ۳۵ روز برای هر طبقه، حداکثر درصد تغییرات کوتاه‌شدگی در طبقات ۱۰، ۲۵ و ۴۰ به ترتیب برابر است با ۱۲/۴۷، ۱۷/۷ و ۲۳/۸۶. همچنین برای سازه‌ی ۳۰ طبقه با همان بازه‌ی سرعت ساخت، و برای طبقات ۵، ۲۰ و ۳۰ حداکثر درصد تغییرات کوتاه شدگی به‌ترتیب برابر است با ۱۰/۷۲، ۱۶/۲۸ و ۲۶/۴۸. به‌عنوان راهکاری برای ساخت سازه‌ها می‌توان به این نکته اشاره کرد که قسمت‌های غیرسازه‌یی، ۳ یا ۶ ماه پس از ساخت سازه نصب یا اجرا شوند تا از میزان درگیری بین اجزای سازه‌یی که علت اصلی مسائل به‌وجود آمده‌ی ناشی از وارفتگی و افت است، کاسته شود. همچنین ایجاد تأخیرهای متناسب با شرایط آب و هوایی، می‌تواند تأثیر به‌سزایی برکاهش تنش‌های ناخواسته بگذارد. در پایان عمر مفید سازه این نتیجه به دست آمد که دیوارهای برشی بیش‌تر از ستون‌ها افت پیدا کردند. حداکثر این اختلاف معمولاً در نیمه‌ی بالایی و نزدیک به بالای سازه اتفاق می‌افتد. مثلاً برای سازه‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ طبقه در طبقات بالایی سازه‌ها باید به‌ترتیب رواداری‌های ۱۰، ۸، ۸ ، ۱۰ و ۱۱ میلی‌متر رعایت شود تا از به وجود آمدن تنش‌های ناخواسته جلوگیری شود. در مورد تأثیر درصد رطوبت نسبی در سازه‌ها می‌توان گفت که برای سازه‌های مشابهی که در نقاط مختلف (از نظر درصد رطوبت نسبی) ساخته می‌شوند اختلاف چشم‌گیری بین ارقام کوتاه شدگی ستون‌ها و درصد تغییر آنها وجود دارد که البته این تفاوت برای اختلاف کوتاه شدگی به این شدت نیست. نکته‌ی قابل توجه این که در سازه‌های بلندمرتبه اختلاف مقادیر کوتاه‌شدگی در بازه‌ی درصد رطوبت نسبی ۴۰ تا ۹۰ درصد به بیش از ۵۰٪ می‌رسد. مثلاً برای سازه‌ی ۴۵ طبقه حداکثر درصد اختلاف بین بالاترین و پایین‌ترین کوتاه‌شدگی ستون‌ها در حضور درصد رطوبت‌های مختلف برای طبقات ۱، ۲۰، ۳۵ و ۴۰ به‌ترتیب برابر است با ۳۹/۵۱، ۴۴/۱۵، ۴۸/۹۹ و ۵۳/۳۱. چون لحاظ‌کردن آنالیزهایی که رفتار متکی بر زمان مواد را در نظر می‌گیرند باعث تغییر در توزیع

Archive of SID
www.SID.ir

ممان در تیرها می‌شود، توصیه می‌شود برای سازه‌های بلند بتنی که مسئله‌ی وارفتگی به‌دلیل کاربری آنها مسئله‌یی قابل تأمل است، حتماً یک نوع آنالیز زمانی سازه مثل آنالیزهای غیرخطی مرحله به مرحله با ملحوظ داشتن رفتار غیرخطی بتن در طول زمان، انجام گیرد.

درصورت به‌کارگیری آنالیزهای وارفتگی با استفاده از روش سری دیریکله، محاسبات در این نوشتار نشان می‌دهد که معمولاً استفاده از ۳ یا ۴ جمله‌ی ابتدایی سری دیریکله برای رسیدن به جواب قابل قبول کافی است. مسئله‌ی دیگری که بر اثر کرنش‌های ناشی از وارفتگی و افت اتفاق می‌افتد، تغییرات نیروهای فشاری در نمای ساختمان است. با توجه به اهمیت شکل ظاهری ساختمان، جلوگیری از این پدیده الزامی است. راه حلی که می‌توان در اینجا پیشنهاد کرد، ایجاد درز یا درزهای افقی در نما است.

اگر در تحلیل سازه برای وارفتگی و افت از آنالیز غیرخطی مراحل ساخت استفاده می‌شود، باید تغییرات پارامترهای زمانی مثل «درصد رطوبت نسبی» یا «سرعت ساخت» و غیره طبق مقادیر واقعی ملحوظ، و بحرانی‌ترین حالت انتخاب شود. بدیهی است که این مقادیر برای هر سازه متفاوت‌اند و نتایج طراحی هم به تبع آن یکسان نخواهند بود. در طراحی سازه‌ها بهتر است چنان عمل شود که در پارامترهایی از قبیل «سطح مقطع اعضا» و «درصد فولاد موجود در بتن» تغییرات ناگهانی ایجاد نشود و حتی‌الامکان این تغییرات به‌صورت مرحله به مرحله و به آهستگی انجام‌شود. بدین‌وسیله اختلاف کوتاه‌شدگی بین اعضای مجاور کاهش می‌یابد. در انتها یادآور می‌شود که توجه مهندسان به تغییرات ممان مثبت در تیرها ضروری است، و به دلیل اهمیت این موضوع بهتر است پیرامون اثرات آن در طراحی سازه‌ها مطالعاتی انجام گیرد.

پانوشت

1. nonlinear staged construction

منابع

1. Mehta. P.K. and Monteiro. P.J.M., "Concrete-Microstructure,Properties and Materials", Book In Byte Company (October 2001).
2. Fintel, M. and Khan, FR. Effects of Column Creep And Shrinkage In Tall Structure-P redic-tion of Inelastic Column Shortening. *ACI Journal*, **66**(12), pp. 957-967 (1969).
3. Gao, Z. and Bradford, MA. Time-dependent Shortening of Slender RC Columns, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* **119**(10) ,pp. 2036-2051 (1993).
4. Russel, HG. and Lason, SC. Thirteen Years of Deformation In Water Tower Place. *ACI Structural Journal,* **86**(2), pp. 182-191 (1989).
5. Samra, RM. New Analysis For Creep Behavior In Concrete Columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE* **121**(3), pp. 399-407 (1995).
6. Faber, O. Plastic Yield, Shrinkage And Other Problem of Concrete And Their Effects On Design, Minutes Of Proc.of The Inst.of Civil Engineers, 225, Part I, London, pp. 27-73 (1927).
7. Bazant, z.p., Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method, *ACI Journal*, **69**, pp. 212-217 (April 1972).
8. Dischinger, F., Untersuchungen über Die Knicksicherheit,Die Elastiche Verformung Und Das Kriechen Des Betons Bei Bogenbrücken,Der Baulngenleur, **18**(33/34) pp. 487-520 (1973).
9. Glanville, W.H., Studies In Reiforced Concrete-III, The Creep Or Flow Of Concrete Under Load,Building Research Technical Paper No. 12, Department of Scientific And Industrial Research, London, pp. 39-48 (1930).
10. Nielsen, L.F., Krichen Und Relaxation Des Beton, *Beton-und Stahlbetonbau*, **65,** pp. 272-275 (1970).
11. ACI (American Concrete Institute).Prediction of Creep,Shrinkage,and Temperature Effects in Concrete Structure, ACI, Detroit (MI 1992).
12. Comitee Euro-International Du Beton,CEB-FIP International Recommendation For The Design And Construction of Concrete Structures, Paris-London (1978, 1990).
13. Bazant, z.p. and Spencer, T. Wu. Dirichlet Series Creep Function For Aging Concrete. *Journal of The Engineering Mechanics Division.EM2,* pp. 367-387, (1973).
14. Gilbert. R.I., Time Effect In Concrete Structure, Elsevier Science Publishing Company Inc New York, (1988).
15. Jayasinghe, M. T. R. and Jayasena, W. M. V. P. K., "Effect of Axial Shortening of Columns on Design and Construction of Tall Reinforced Concrete Buildings", Practice Periodical on Structural Design and Construction, pp. 70-78 (May 2004).
16. Ghosh. S.K, "Estimation and Accommodation of Column Length Changes in Tall Building", Large Concrete Buildings, Longmans, London, (1996).

Archive of SID

www.SID.ir