

# اثر ارتفاع ستونها بر ضریب بار کمانشی برجهای خنک کننده هیپربولیک بتنی

سعید صبوری و محمد قدسی

**چکیده:** در این تحقیق، آنالیز کمانش کلی برج خنک کننده شازند اراک تحت اثر فشار باد نامتقارن مورد بررسی قرار گرفته و جهت بارگذاری و کنترل ضرایب بار بدست آمده، از توصیه های آئین نامه VGB<sub>1990</sub> آلمان استفاده شده است. نرم افزار بکار رفته در این تحقیق انسیس نسخه ۵/۴ می باشد. بجز آئین نامه ACI، در آئین نامه های دیگر از اثر ستونها بر ضریب بار و شکل مود کمانش برج های خنک کننده هیپربولیک صرف نظر شده و فقط پوسته برج خنک کننده مورد بررسی قرار می گیرد. بر اساس تحقیق حاضر، ارتفاع زیاد ستونهای برج خنک کننده نه تنها باعث کاهش ضرایب اطمینان کمانشی می شوند بلکه در مود های پائین به جای پوسته برج خنک کننده، این ستونها هستند که کمانش می کنند.

**واژه های کلیدی:** برج خنک کننده، کمانش، ضرایب اطمینان، پوسته های بتنی، پایداری

## ۱. مقدمه

برجهای خنک کننده هیپربولیک بتنی یکی از بلندترین سازه های ساخته شده از بتن مسلح می باشند و در آینده با رشد و توسعه صنایع، کارخانجات و نیروگاهها ظرفیتهای خنک کنندگی بیشتری نیز مورد نیاز خواهد بود. این به معنای احداث برجهایی با ارتفاع بیشتر و قطر بزرگتر می باشد. یکی از مسائلی که با افزایش ابعاد برجهای خنک کننده، طراحان با آن مواجه میشوند مساله پایداری کمانشی برج های خنک کننده می باشد. بهنگام طراحی برجهای خنک کننده، فرض می شود که سازه بهنگام اعمال بار بر اثر جاری شدن فولادهای نصف النهایری پوسته خراب می شود و نه بر اثر کمانش و ناپایداری سازه. از این رو در آئین نامه ها برای آنالیز کمانشی برجهای خنک کننده، ضرایب اطمینان بزرگی در نظر گرفته می شود.

## ۲. بررسی روشهای مختلف در مورد محاسبه ضریب

### اطمینان در برابر کمانش

آئین نامه های مختلف روشهای گوناگونی را در رابطه با برآورد ضریب اطمینان در برابر کمانش برجهای خنک کننده بتنی ارائه کرده و هر کدام از آنها ضرایب اطمینان متفاوتی را پیشنهاد کرده اند. بررسی انجام شده توسط پروفیسور رائو<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۱ نشان داده است که ضرایب اطمینان در برابر کمانش برای یک برج خنک کننده با آئین نامه های مختلف بین ۲/۵ تا ۲۰ تغییر می کند [1]. از میان آئین نامه های معروف می توان به JASS، VGB آلمان، ACI و BS انگلستان اشاره کرد. از میان آنها آئین نامه های VGB آلمان و ACI بیشتر در کشور ما مورد استفاده می باشند که در ذیل به بررسی خلاصه وار روشهای آنالیز کمانش و ضرایب اطمینان پیشنهادی آنها پرداخته می شود:

## ۲-۱. روش آئین نامه VGB آلمان (روش کمانش

### موضعی) [2]

آئین نامه VGB روش کمانش موضعی یا BSS<sup>2</sup> را برای برآورد ضریب بار کمانش پیشنهاد می کند. این روش توسط مونگان<sup>۳</sup> در

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۳/۲۵ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۶/۱۵ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر سعید صبوری، استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی. [sabouri@kntu.ac.ir](mailto:sabouri@kntu.ac.ir)

محمد قدسی، کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی. [m\\_ghodsi2000@yahoo.com](mailto:m_ghodsi2000@yahoo.com)

<sup>1</sup> P.Srinivasa Rao

<sup>2</sup> Buckling Stress State

<sup>3</sup> Mungan

نماید، ضمن آنکه باید اثر ترک خوردگی پوسته نیز در آنالیز در نظر گرفته شود [4-1]. برای تأمین پایداری در برابر کمناش، آئین نامه ACI ضرایب بار زیر را پیشنهاد می کند:

$$1.0DL+2.0WL \quad (3)$$

از نظر تئوری این روش دقیق ترین روش می باشد اما عملیات محاسباتی مورد نیاز آن بسیار وقت گیر بوده و برای آنالیز سازه های بزرگ مانند برجهای خنک کننده با استفاده از کامپیوترهای معمولی نیاز به هفته ها وقت می باشد. این مساله هنگامی که نیاز به آنالیزهای متعددی وجود داشته باشد بیشتر مشکل زا می گردد.

### ۲-۳. آنالیز کمناش کلی الاستیک خطی

اییل<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۶ و راثو در سال ۱۹۹۱ [5] نشان دادند که آنالیز کمناش کلی غیر خطی کامل را می توان بصورت خطی تبدیل کرد که براساس نتایج بدست آمده از آنالیزهای مختلف، نتایج آنالیز کمناش کلاسیک با نتایج بدست آمده از آنالیز غیر خطی کامل بخوبی قابل مقایسه می باشد.

رابطه کمناش کلاسیک بصورت زیر است:

$$[K_e + \lambda K_{gl}] \{u_c\} = 0 \quad (4)$$

که در این رابطه:

$$k_e = \text{ماتریس سختی الاستیک}$$

$$K_{gl} = \text{ماتریس سختی هندسی خطی}$$

$$\lambda = \text{ضریب بار کمناش}$$

$$u_c = \text{بردارهای شکل مودی کمناش بحرانی}$$

رابطه فوق وقتی دارای جواب غیر صفر است که:

$$|k_e + \lambda k_{gl}| = 0 \quad (5)$$

کمترین مقدار قدر مطلق  $\lambda$  که این رابطه را اقصاع نماید نشان دهنده ضریب مقیاس بر بارهای اولیه ای می باشد که ایجاد کمناش می نمایند. پس از جاگذاری  $\lambda$  در رابطه (۵) شکل مود کمناشی بدست می آید. ضریب مقیاس  $\lambda$  در نتایج یک تحلیل تنش محوری یا صفحه ای ضرب می شود که مقدم بر تحلیل کمناشی است، بهمین منظور باید قبل از آنالیز کمناش یک آنالیز استاتیکی همراه با فعال کردن گزینه پیش تنش<sup>۲</sup> انجام داد. این روش آنالیز خصوصیات غیرخطی شدن ماده را بهیچ عنوان در نظر نمی گیرد.

### ۳. انتخاب روش آنالیز و ضریب اطمینان مناسب

#### برای بار کمناش بحرانی

همانگونه که ذکر شد آئین نامه ها ضرایب مختلفی را پیشنهاد می کنند که با یکدیگر تفاوت زیادی دارند. بطوریکه آئین نامه آلمان

سال ۱۹۷۹ و در دانشگاه روهر در بوخوم آلمان و با آزمایش روی مدل‌های هیبربولیک با ضخامت ثابت و از جنس رزین اپوکسی که دارای رفتار الاستیک خطی هستند، ابداع شده است [3].

روابط ارائه شده توسط مونگان بصورت زیر می باشد:

$$0.8\gamma_b \left( \frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi_c}} + \frac{\sigma_\theta}{\sigma_{\theta_c}} \right) + 0.2\gamma_b^2 \left[ \left( \frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi_c}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_\theta}{\sigma_{\theta_c}} \right)^2 \right] \leq 1 \quad (1)$$

که در آن:

$$\gamma_b = \text{ضریب ایمنی} \leq 5$$

$$\sigma_\phi = \text{تنش موثر نصف النهاری بر اثر بار مرده + بار باد طراحی}$$

$$\sigma_\theta = \text{تنش موثر مداری بر اثر بار مرده + بار باد طراحی}$$

$$\sigma_{\phi_c} = \text{تنش کمناش بحرانی در جهت نصف النهاری}$$

$$\sigma_{\theta_c} = \text{تنش کمناش بحرانی در جهت مداری}$$

در این روش فرض بر این است که تحت اثر ترکیب بحرانی تنش های غشایی فشاری در جهات مداری و نصف النهاری پوسته بصورت موضعی شروع به کمناش می کند. مطابق آئین نامه بتن آلمان (DIN 1045) ضریب اطمینان در برابر کمناش باید بزرگتر یا مساوی ۵ باشد که برای برجهای خنک کننده بصورت زیر نوشته می شود:

$$5.0(DL + WL) \quad (2)$$

که DL بار مرده و WL بار باد شامل بار باد خارجی به اضافه مکش داخلی می باشد.

روابط ارائه شده توسط مونگان براساس آزمایش روی یک پوسته هیبربولیک که بار عمودی ثابتی بصورت یکنواخت روی محیط آن توزیع شده و در معرض فشار متقارن محوری سیال قرار دارد، بدست آمده اند. در حالیکه برجهای خنک کننده در معرض بار باد می باشند که نه فقط در جهت مداری بلکه در ارتفاع متغیر است.

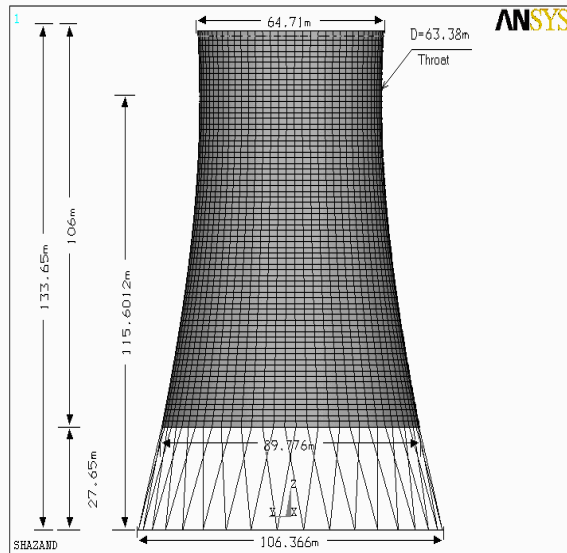
شرایط تکیه گاهی پوسته تحت آزمایش نیز بصورت گیردار کامل در پایه و گیردار ناقص در بالا در نظر گرفته شده که در واقعیت چنین نیست. با وجود در نظر گرفتن ضرایب تصحیح تئوری برای در نظر گیری اختلاف سازه واقعی و مدل های آزمایشی، کارایی این روابط هنوز ثابت نشده است.

### ۲-۲. روش آئین نامه ACI (کمناش کلی)

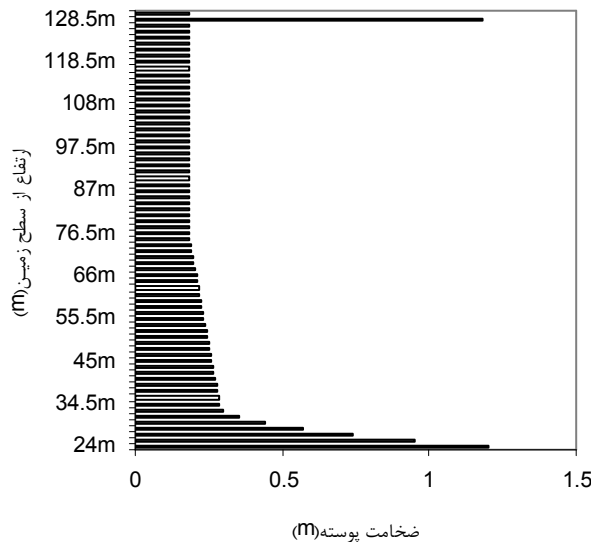
در این روش از آنالیز کمناش کلی غیر خطی کامل که کاملترین آنالیز کمناش می باشد استفاده می شود و بار حدی با ترکیب روش نموی و تکنیک تکرار بدست می آید. جهت آنالیز از روش المان محدود استفاده شده و مشخصات کامل برج مانند تغییرات ضخامت، تغییرات فشار باد در ارتفاع و توزیع واقعی فشار پیرامون برج و وجود سخت کننده ها در نظر گرفته می شود. آئین نامه ACI استفاده از آنالیز کلاسیک کمناش را فقط در مورد محاسبه ضریب اطمینان کمناش تحت بار ثقلی مجاز می شمرد و در مورد آنالیز کمناش برج خنک کننده تحت بار باد و ثقلی آنالیز غیر خطی را توصیه می

<sup>1</sup> Abel

<sup>2</sup> Prestress



شکل ۱. ابعاد هندسی برج خنک کننده شازند اراک



نمودار ۱. تغییرات ضخامت پوسته برج خنک کننده در ارتفاع

برج خنک کننده شازند اراک دارای ۳۶ جفت ستون به شکل  $X^2$  و با مقاطع مستطیل می باشد که طول مستطیل در امتداد شعاع برج قرار دارد. فونداسیون برج بصورت نواری حلقوی می باشد. ابعاد مقطع ستونها  $۱۷m \times ۱۱۵m$  و ابعاد مقطع فونداسیون  $۱/۴m \times ۴/۲m$  می باشد. همچنین برج خنک کننده دارای یک سخت کننده در لبه فوقانی به ابعاد  $۱۰/۴m \times ۱m$  می باشد که در ارتفاع  $۱۲۸/۵$  متر از سطح زمین نصب شده است.

ضریب ۵ و آئین نامه ACI ضریب ۲ را برای بار باد کمانشی پیشنهاد می کنند.

نکته ای که در مقایسه این دو آئین نامه (ACI, VGB) باید به آن توجه کرد این است که آئین نامه VGB ضریب اطمینان ۵ را برای آنالیز الاستیک برج خنک کننده در نظر می گیرد و آزمایشی هم که توسط مונگان در آزمایشگاه انجام شده، روی مدلی با رفتار الاستیک خطی صورت گرفته است، در صورتیکه ضریب بار باد ۲ در آئین نامه ACI برای آنالیز غیر خطی کامل در نظر گرفته شده نه آنالیز الاستیک خطی.

بنابراین اصولاً مقایسه این دو آئین نامه با یکدیگر در زمینه ضریب اطمینان کمانشی چندان صحیح بنظر نمی رسد. زیرا معمولاً آنالیز کمانش الاستیک نتایج بالاتری از آنالیز واقعی کمانش یعنی کمانش غیر خطی کامل بدست می دهد.

هدف از تامین ایمنی کمانشی، ایمنی سازه در طول عمر خدمتی آن می باشد و نه در ابتدای زمان ساخت. با توجه به تنش های حرارتی و شرایط محیطی که سازه تحت تاثیر آنها قرار می گیرد، احتمال ترک خوردگی آن بسیار زیاد است.

بنابراین ضریب اطمینان برج خنک کننده باید بمیزان لازم بیش از میزان حداقل درخواست شده باشد تا سازه در طول عمر خود از آسیب در امان باشد و بتواند عمر مفیدی را که برای آن در نظر گرفته اند برآورده سازد.

در این تحقیق روش سوم یعنی روش کمانش کلی الاستیک خطی با حداقل ضریب بار کمانشی توصیه شده توسط VGB برابر ۵ انتخاب و مورد استفاده قرار می گیرد.

#### ۴. مشخصات هندسی برج خنک کننده شازند اراک

این برج از نوع بتنی هذلولی بوده و ارتفاع آن از فونداسیون  $۱۳۳/۶۵$  متر می باشد. شکل ۱ ابعاد خارجی برج خنک کننده شازند اراک را نشان می دهد.

معادله هذلولی پوسته برج خنک کننده بصورت زیر میباشد:

$$R = \left\{ 31.69^2 \times \left[ 1 + \frac{(111.9512 - H)^2}{87.67142^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (۶)$$

که در این رابطه R شعاع میانمار پوسته<sup>۱</sup> در تراز H از سطح زمین می باشد.

جهت تامین ظرفیت باربری و پایداری سازه از ترکیب ضخیم شدگی تدریجی ۵۰ درصد از ارتفاع پوسته بعلاوه یک رینگ سخت کننده فوقانی استفاده شده است. ضخامت پوسته در لبه تحتانی ۱۲۰ سانتی متر می باشد که بتدریج تا تراز ۷۷ متری به ۱۸ سانتی متر کاهش یافته و پس از آن ثابت می ماند. نمودار ۱ تغییرات ضخامت پوسته در ارتفاع را نشان می دهد:

<sup>2</sup> X-LEGS

<sup>1</sup> Center line

#### ۴-۱. مراحل مدلسازی برج خنک کننده سازند اراک

##### ۴-۱-۱. انتخاب نرم افزار

امروزه نرم افزارهای متنوعی در زمینه المان محدود در دسترس محققین قرار دارد که از معروفترین آنها می توان به نرم افزار ANSYS اشاره کرد. بزرگترین ویژگی این نرم افزار رابط گرافیکی خوب و قابلیت اجرای مناسب در کامپیوترهای شخصی می باشد. این نرم افزار براساس تئوری المان محدود تهیه شده و دارای کتابخانه المان بسیار متنوعی در زمینه های گوناگون می باشد [6]. نرم افزار ANSYS بدلیل آنکه در محیط ویندوز عمل می کند، از توانایی های گرافیکی قوی برخوردار است. اما از طرف دیگر به امکانات سخت افزاری پر قدرتی نیز نیازمند است. بطوریکه انجام یک تحلیل غیر خطی در مورد سازه های بزرگ با این نرم افزار هفته ها بطول می انجامد و عملاً امکان آنالیزهای گسترده غیر خطی در مورد سازه های بزرگ با امکانات معمولی مقدور نمی باشد.

##### ۴-۱-۲. مدل سازی و المان بندی برج خنک کننده

برج خنک کننده سازه ای پوسته ای با ابعاد بسیار بزرگ بوده و مدل کردن آن با استفاده از رابط گرافیکی نرم افزار مشکل وحتی غیر ممکن می باشد. با توجه به ابعاد بزرگ سازه در صورت استفاده از المان های با تعداد کم در محل اتصال ستونها به پوسته با تمرکز تنش زیادی روبرو خواهیم شد که بر نتایج آنالیز تاثیر خواهد گذاشت [7]. با توضیح فوق پوسته در جهت مداری به ۷۲ بخش و در جهت نصف النهاری به ۷۱ بخش تقسیم گردید که در مجموع از ۵۱۱۲ المان برای مدل کردن پوسته برج خنک کننده استفاده شده است. با توجه به مناسب بودن المانهای ۸ گرهی برای مدلسازی پوسته های منحنی، المان پوسته ۱۶ لایه جهت مدل سازی پوسته و فولاد های موجود در آن بکار رفته است که در مورد برج خنک کننده سازند اراک از ۶ لایه بتن و دو لایه فولاد برای مدلسازی پوسته استفاده شده است.

برای مدل کردن ستونها و رینگهای سخت کننده و پی نواری از المان تیر ۳ بعدی و نیز از المانهای فنر [8] به جای خاک زیر فونداسیون برج استفاده شده است. مشخصات مواد به صورت ایزوتروپیک و برای هر لایه افقی از المانهای پوسته، ضخامت و مشخصات مربوط به آن لایه بطور جداگانه معرفی شده است.

##### ۴-۱-۳. بارگذاری برج خنک کننده (بر مبنای آئین نامه

(VGB<sub>1990</sub>)

ضریب اطمینان در برابر کماتش باید براساس بدترین ترکیب بارگذاری بدست آید:

$$g + W + W_{suction} \quad (Y)$$

که در آن:

$g$  = تنش ناشی از بار مرده

$w$  = تنش ناشی از بارگذاری باد خارجی

$W_{suction}$  = تنش ناشی از مکش داخلی

بار مرده شامل وزن سازه و ملحقات آن بر حسب  $KN/m^3$  می باشد. بار باد بصورت شبه استاتیکی در نظر گرفته شده و بعنوان فشار ثابتی که بر سطح خارجی پوسته وارد می شود مدل می گردد. فشار باد از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$W(z, \theta) = C_p(\theta)q_E(z) \quad (A)$$

که در آن:

$C_p(\theta)$ : ضریب توزیع فشار در جهت مداری

$q_E(z)$ : توزیع قائم فشار طرح دینامیکی

که  $W(z, \theta)$  بر حسب  $KN/m^2$  می باشد.

مکش درون برج خنک کننده بصورت یک فشار منفی ثابت در سرتاسر ارتفاع پوسته برج خنک کننده در نظر گرفته شده و بر حسب فشار باد خارجی در لبه فوقانی پوسته ضربدر یک ضریب توزیع برابر  $C_p(\theta) = -0.5$  بدست می آید.

##### ۴-۲. انجام آنالیز کماتش کلی (مقدار ویژه کماتش ۱)

در نرم افزار ANSYS آنالیز کماتش کلی با نام مقدار ویژه کماتش معرفی شده است. در این روش پس از اعمال بارگذاری روی سازه باید یک تحلیل استاتیکی با فعال کردن گزینه پیش تنش انجام شود تا ماتریس سختی تنش اولیه محاسبه شود و بعد از آن آنالیز کماتش انجام می پذیرد. آنالیز کماتش ضرایب بار کماتش را محاسبه می کند که این ضرایب در همه بارهای اعمال شده ضرب می شوند تا بار کماتش بحرانی بدست آید. تغییر شکلهای نرمال مودهای کماتش سازه نیز بصورت شکل تغییر یافته سازه توسط نرم افزار ارائه می شود. برای رسم مود کماتش بصورت نمودار باید نتایج را از نرم افزار استخراج کرده و در یک برنامه دیگر مانند اکسل<sup>۲</sup> ترسیم کرد.

##### ۴-۳. آنالیز کماتش برج خنک کننده سازند اراک

به منظور بررسی اثر بار ثقلی بر کماتش برج خنک کننده، معمولاً اولین آنالیزی که در برآورد ضرایب اطمینان کماتشی انجام می گردد، آنالیز کماتش تحت اثر بار ثقلی تنها می باشد. در این آنالیز از اثر بارهای خارجی صرفنظر شده و فقط اثر وزن پوسته و ستونها و دیگر ملحقات برج خنک کننده در نظر گرفته می شود.

پس از آن آنالیز کماتش تحت بارگذاری کماتش بحرانی یعنی ترکیب بار ثقلی، بار باد خارجی و مکش داخلی روی برج خنک کننده سازند انجام می شود. نمودار ۲ توزیع فشار باد خارجی پیرامون دهانه برج خنک کننده سازند را نشان می دهد. علامت

<sup>1</sup> Eigen value Bucking

<sup>2</sup> Excel

برج خنک کننده می باشد. همچنین در روش کمانش موضعی آئین نامه VGB نیز بطور کلی از تاثیر ستونها صرفنظر می گردد و فقط ضریب بار کمانشی پوسته مورد بررسی قرار می گیرد.

اما بهنگام بررسی تغییر شکل های برج خنک کننده سازند اراک تحت بارگذاری کامل در مود های مختلف، مشاهده شد که در مود دوم کمانش برج خنک کننده سازند اراک هیچ تغییر شکلی در پوسته اتفاق نمی افتد و بعبارت دیگر کمانشی در پوسته رخ نمی دهد بلکه این ستونها هستند که درفاصله ۷۰ درجه از نصف النهار رو به باد یعنی محل مکش حداکثر خارجی، و تحت ضریب بار ۱۰/۳۳۳ کمانش می کنند.

در نمودار (۳) ضرایب بار کمانشی ۱۰ مود اول کمانش برج خنک کننده سازند اراک تحت اثر بار ثقیلی، بار باد و مکش داخلی نشان داده شده است. نکته ای که در این نمودار بخوبی قابل مشاهده است، تفاوت اندک بین ضرایب بار کمانش ۱۰ مود اول می باشد که اختلاف مودهای متوالی از ۱۰ درصد کمتر است. بنابر این کمانش ستونها در مود اول بسیار محتمل است.

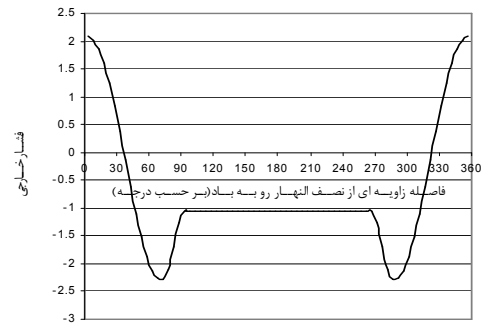
در انتقال کمانش از پوسته به ستونها بطور کلی سه عامل را می توان موثر دانست:

یکی ارتفاع زیاد ستونها، دیگری سختی زیاد پوسته و در نهایت سختی و مقاومت خمشی پایین ستونها.

مقایسه برج خنک کننده سازند اراک با برجهای خنک کننده دیگری که در دیگر نقاط جهان در ارتفاعهای حتی بلندتر از این برج ساخته شده اند، نشان می دهد که ستونهای برج خنک کننده سازند بیش از حد بلند است. این مساله باعث شده که در مودهای پایین به جای پوسته مستقیماً خود ستونها کمانش کنند. با توجه به اینکه ضریب بار متناظر با کمانش ستونها مستقل از سختی پوسته برج خنک کننده بوده و فقط وابسته به سختی ستونها می باشد، می توان گفت که حتی با فرض ثابت بودن سختی ستونها در طول عمر سازه، همواره احتمال کمانش ستونها در اثر بار بحرانی سازه را تهدید می کند.

یکی از مسائلی که برجهای خنک کننده پس از گذشت مدتی از زمان ساخت با آن روبرو می شوند مساله ترک خوردگی پوسته در اثر عوامل محیطی و تنش های حرارتی می باشد. این ترکها که عمدتاً بصورت عمودی (نصف النهاری) در پوسته ایجاد می شوند باعث خوردگی آرماتورها و کاهش سختی پوسته می شوند. این مساله باعث کاهش ضریب اطمینان پوسته در برابر کمانش پس از گذشت مدتی از عمر سازه می شود که خطر کمانش و آسیب دیدگی برج خنک کننده را بهمراه دارد. بهمین منظور پس از گذشت مدتی از عمر سازه به ترمیم و تقویت آن اقدام می شود. اما مسأله ای که در مورد برج خنک کننده ای مانند سازند مشکل ساز است ارتفاع زیاد ستونها می باشد. با توجه به اینکه ضریب بار کمانشی ستونها مستقل از سختی پوسته می باشد، این مساله در

مثبت به معنای فشار خارجی و علامت منفی به معنای مکش خارجی می باشد.



نمودار ۲. توزیع فشار باد پیرامون دهانه برج خنک کننده سازند اراک بر حسب  $\text{KN/m}^2$

با توجه به اینکه آنالیز انجام شده از نوع کمانش الاستیک می باشد مود اول کمانش از اهمیت بیشتری برخوردار است اما برای بررسی بیشتر ضرایب بار کمانشی ۱۰ مود اول کمانش برج خنک کننده تحت بارگذاری کامل، استخراج شده است.

در جدول ۱ ضرایب بار کمانشی ۵ مود اول کمانش برج خنک کننده تحت بارگذاری های ذکر شده، مقایسه شده است.

جدول ۱. مقایسه ضرایب بار کمانشی ( $\lambda$ ) ۵ مود اول کمانش برج خنک کننده سازند اراک تحت اثر بار ثقیلی و بار گذاری کامل

شماره مود کمانش	برج خنک کننده تحت بارگذاری ثقیلی	برج خنک کننده تحت بارگذاری کامل
۱	۱۵/۹۲۷	۹/۵۹۲۲
۲	۱۶/۰۴۷	۱۰/۳۳۳
۳	۱۷/۳۱۷	۱۰/۵۲۹
۴	۱۷/۶۵۲	۱۰/۶۰۶
۵	۱۸/۵۳۸	۱۱/۲۸۰

همانطور که ملاحظه می شود، ضریب بار کمانشی برج خنک کننده تحت بار ثقیلی تنها، در مود اول کمانش حدود ۶۶ درصد بیش از ضریب بار کمانشی پوسته با بارگذاری کامل می باشد.

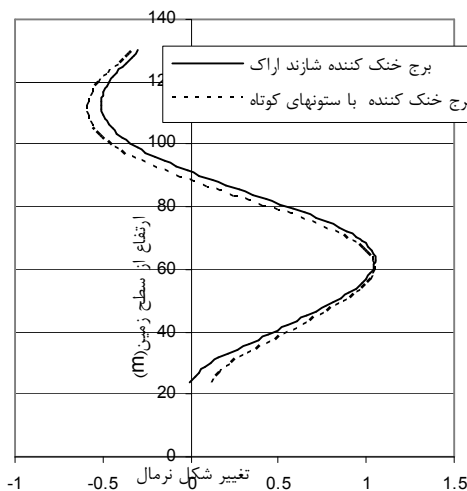
با توجه به ضرایب بار درج شده در جدول ۱، نتیجه گرفته می شود که اثر بار باد خارجی در کمانش برجهای خنک کننده تعیین کننده است و بار ثقیلی نقش بسیار کمتری در کمانش برج خنک کننده ایفا می کند.

بهنگام طراحی برجهای خنک کننده فرض می شود که ستونها دچار کمانش نمی شوند و کمانش فقط در پوسته اتفاق می افتد که این مساله دلیل کوتاه بودن ارتفاع ستونها در مقایسه با کل ارتفاع

در کلیه ۱۰ مود کمانشی نشان داده شده ضرایب بار کمانشی برج با ستونهای کوتاه از برج اصلی بیشتر می باشد. همچنین در برج خنک کننده با ستونهای کوتاه در هیچکدام از مودها کمانش در ستونها اتفاق نمی افتد. اختلاف میان ضرایب بار در مودهای مختلف در مدل اخیر نیز افزایش چشمگیری داشته است که با افزایش شیب نمودار کاملاً مشخص است.

با توجه به اینکه از مود سوم به بعد میزان شیب نمودار ضرایب بار برج با ستونهای کوتاه افزایش زیادی دارد، می توان با اطمینان گفت که کمانش در این مدل در دو مود اول آن اتفاق خواهد افتاد. نمودار ۴ مقایسه تغییر شکل پوسته در جهت نصف النهاری در مود اول کمانش را برای دو مدل ذکر شده، نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود، تغییر شکل در لبه تحتانی و گلوگاه پوسته با ستونهای کوتاه قدری افزایش یافته است اما میزان بیرون زدگی حداکثر هر دو مدل در یک تراز یعنی فاصله ۳۷/۵ متری از لبه پائینی پوسته و به یک میزان اتفاق افتاده که نشانگر آن است که ارتفاع ستونها در تعیین محل تغییر شکل حداکثر پوسته تاثیری ندارد.

تنها تفاوتی که مشاهده می شود کاهش فرورفتگی و برآمدگی پوسته در فاصله ۷۰ درجه از نصف النهار رو به باد برای مدل با ستونهای کوتاه می باشد که دقیقاً محل مکش خارجی حداکثر و محل کمانش ستونهای برج اصلی در مود دوم است.



نمودار ۴. اثر کاهش ارتفاع ستونها بر تغییر شکل نرمال حداکثر نصف النهاری پوسته در مود اول کمانش برج خنک کننده سازند اراک

نمودار ۵ تغییر شکل مداری پوسته در مود اول کمانش را برای دو مدل نشان می دهد.

هنگام ترمیم و تقویت پوسته ترک خورده نیز باعث ایجاد محدودیت شده و با افزایش سختی پوسته، احتمال کمانش ستونها همواره سازه را تهدید خواهد کرد.

نتایج تحقیقات نشان داده است که ستونهای بلند در آنالیز دینامیکی زلزله که برش زیادی در ستونها اتفاق می افتد نیز مناسب نمی باشد و احتمال خرابی ستونهای بلند زیاد است. این مساله در ترکیب با کمانش ستونها تحت بار باد وضعیت نامناسبی از نظر مقاومت و پایداری برج خنک کننده بوجود می آورد.

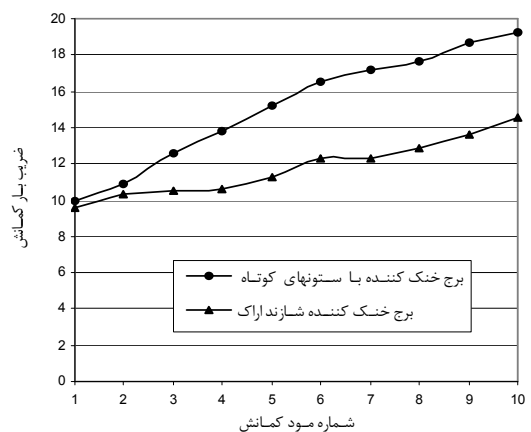
از سوی دیگر همانطور که قبلاً اشاره شد ارتفاع زیاد ستونها باعث شده است که میان ضرایب بار ۱۰ مود اول کمانش برج خنک کننده سازند اراک اختلاف زیادی مشاهده نشود. با توجه به اینکه مدلسازی انجام گرفته بصورت تئوریک و ایده آل می باشد هر گونه افزایش جزئی در سختی پوسته بهنگام اجرا با عنایت به مطلب فوق باعث کمانش ستونها در مود اول کمانش خواهد شد.

با وجود آنکه ضریب بار کمانشی مود اول بمیزان قابل قبولی از حداقل ضریب بار پیشنهادی آئین نامه بالاتر می باشد، با اینحال در نظر گرفتن اثر زلزله بر ستونهای برج خنک کننده توأم با بار باد احتمال شکست ستونها را افزایش خواهد داد.

جهت بررسی بیشتر روی تاثیر ارتفاع ستونها بر ضرایب بار کمانشی، مدلی مشابه برج خنک کننده سازند اراک ایجاد گردید با این تفاوت که ارتفاع ستونها تا سطح زمین از ۲۴ متر به نصف کاهش داده شد و برج با ستونهایی با ارتفاع کلی ۱۵/۶۵ متر مدل گردید.

با کاهش ارتفاع برج خنک کننده فشار باد در ارتفاع پوسته نیز کاهش می یابد اما به خاطر آنکه در مقایسه انجام گرفته فقط ارتفاع ستونها تاثیر گذار باشد در مدل اخیر نیز از همان بارگذاری مدل اصلی استفاده شده است.

در نمودار ۳ ضرایب بار کمانشی ۱۰ مود اول کمانش برج خنک کننده اصلی و مدل با ستونهای کوتاه شده، مقایسه شده است.



نمودار ۳. اثر کاهش ارتفاع ستونها بر ضرایب بار کمانشی ۱۰ مود اول کمانش برج خنک کننده سازند اراک

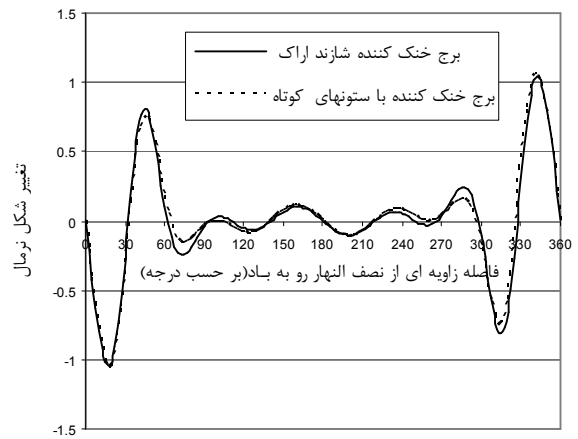
مساله بر شکل موده‌های کمانشی، بهتر است در آنالیز کمانش از مدل واقعی پوسته همراه با مدل سازی فولادهای پوسته استفاده شود.

۴- بر اساس آئین نامه VGB ضریب بار کمانشی باید هم در بار ثقلی و هم در بار باد ضرب شود. با وجود آنکه بار ثقلی در مقایسه با بار باد روی ضریب بار کمانشی تاثیر کمتری دارد اما تاثیر آن بهنگام ترکیب بارگذاری باد و برش ناشی از زلزله روی مقاومت ستونهای برج خنک کننده، می تواند بسیار تعیین کننده باشد.

۵- بهنگام طراحی کمانشی، فرض بر این است که با توجه به کوتاه بودن ستونهای برج خنک کننده، کمانش همواره در پوسته اتفاق می افتد. اما با افزایش ارتفاع ستونهای برج خنک کننده، در موده‌های کمانشی پایین، کمانش از پوسته به ستونها منتقل شده و منجر به خرابی آنها می گردد. همچنین افزایش ارتفاع ستونها باعث کاهش ضرایب بار کمانشی برج خنک کننده می گردد. ضریب بار کمانشی متناظر با کمانش ستونها برای برج خنک کننده شازند اراک عددی ثابت و مستقل از سختی پوسته می باشد. افزایش ارتفاع ستونها بهنگام لرزش ناشی از زلزله نیز اثر نامطلوبی روی مقاومت برج خنک کننده بر جای می گذارد که در ترکیب با بار باد که در آئین نامه VGB پیشنهاد گردیده است، قابلیت اطمینان طرح را بمیزان زیادی کاهش خواهد داد.

### مراجع

- [1] Srinivasa Rao p., Aravindan P.K., Ramanjaneyulu K., "Buckling Safety of Cooling Tower Shells , Evaluation of Some Important Code Provisions ", ACI Structural Journal , May -June 1991.
- [2] VGB Guideline, *Civil Engineering for Cooling Towers*, August 1990.
- [3] Mungan I., *Buckling of Stiffened Hyperboloidal Shells*, ASCE Journal of Structural Division , August 1979.
- [4] ACI Guideline, *Reinforced Concrete Cooling Tower Shells-Practice and Commentary*, 1991.
- [5] Srinivasa Rao P. , Aravindan P.K., Ramanjaneyulu k., "Buckling Analyses of Cooling Tower Shells Subjected to Non-Axisymmetric Wind Pressures", Computers & structures, 1991, page : 849.
- [6] ANSYS Elements Reference, Modeling and Meshing Guide, SAS IP, Inc.
- [7] Mahmoud B.E.H; Gupta A.k., "Inelastic Large Displacement Behavior And Buckling of Cooling Tower", ASCE Journal of Structural Engineering, Jun. 1995.
- [8] Ricardo Dobry , George Gazetas , "Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Foundations" , ASCE journal of Geotechnical Engineering , February 1986.



نمودار ۵. اثر کاهش ارتفاع ستونها بر تغییر شکل نرمال حداکثر مداری پوسته در مود اول کمانش برج خنک کننده شازند اراک

با بررسی نتایج بدست آمده می توان گفت که در صورتی که طراح ناچار به استفاده از ستونهای بلند باشد، یا باید سختی ستونها را به میزان زیادی افزایش دهد و یا اینکه سختی پوسته را تا اندازه ای کاهش دهد که مود متناظر با کمانش ستونها به موده‌های بالاتر انتقال یابد. در غیر اینصورت، بهترین راه برای جلوگیری از کمانش ستونهایی که بخوبی طراحی شده اند کاهش ارتفاع آنها می باشد.

### ۵. نتیجه گیری

- ۱- نتایج تحلیل بیانگر سرعت بالا و دقت مناسب روش آنالیز کمانش کلی در مقایسه با روش BSS (وضعیت تنش کمانشی) و روش آنالیز کمانش غیر خطی کامل می باشد. توانایی در نظر گیری شرایط بارگذاری واقعی و تغییرات ضخامت پوسته و همچنین تاثیر ستونها در آنالیز کمانش، بطور واضح، برتری این روش نسبت به روش BSS را نشان می دهد. سرعت بسیار بالا و دقت مناسب این روش، توجیهی منطقی برای ترجیح آن بر روش کمانش غیر خطی کامل می باشد.
- ۲- مقایسه ضرایب بار کمانشی آئین نامه VGB آلمان و آئین نامه ACI چندان منطقی بنظر نمی رسد. زیرا این دو آئین نامه روشهای متفاوتی را برای برآورد ضریب بار کمانشی بکار می گیرند که نتایج متفاوتی نیز بدست می دهد. با توجه باینکه روش آنالیز کمانش کلی یک روش مبتنی بر رفتار الاستیک مواد می باشد، ضریب بار کمانش الاستیک آئین نامه VGB برابر ۵، مناسب ترین ضریب بار کمانش می باشد.
- ۳- با توجه به اثر فولادهای مداری و نصف النهاری پوسته بر افزایش سختی و در نتیجه افزایش ضریب بار کمانش و تاثیر این