

## بررسی تأثیر بارگذاری حرارتی بر روی پوسته برج‌های خنک‌کن

سلیمان رحیمیان، رضا مرشد\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲ دی ۱۳۹۶  
بازنگری: ۲۸ اسفند ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۷  
ارائه آنلاین: ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۷

### کلمات کلیدی:

برج خنک‌کننده  
روش اجزاء محدود  
مدل آسیب-پلاستیسیته  
بار حرارتی

**چکیده:** در مناطقی که فعالیت لرزه‌خیزی زیاد نیست، وزن خود برج و بار باد، دو بار مهم در طراحی برج خنک‌کننده هستند. البته تأثیر بارهای حرارتی را نمی‌توان نادیده گرفت. بر اثر ایجاد ریزترک‌های ناشی از بارهای حرارتی، مقاومت نهایی برج‌های خنک‌کننده در پایان بارگذاری باد کاهش پیدا می‌کند. در گذشته تأثیر این بارها کمتر مورد توجه قرار می‌گرفتند اما امروزه امکان مدل کردن برج‌های خنک‌کننده و اعمال بارهای حرارتی و تحلیل این برج‌ها با روش اجزاء محدود فراهم شده است. در این تحقیق برج خنک‌کننده نیروگاه شهید رجایی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS شبیه‌سازی شده است. برای مدل کردن پوسته این برج از مدل Damage plasticity که قابلیت مدل‌سازی ترک را دارد، استفاده شده است. در این تحقیق اثرات دو بارگذاری مقایسه شده که در بارگذاری اول بار ثقلی، باد و حرارت و در بارگذاری دوم بار ثقلی و باد به برج اعمال شده است. بر اساس نتایج حاصله اختلاف تغییر مکان پوسته برج در جهت اعمال باد در دو بارگذاری برابر ۶/۴ درصد و اختلاف آسیب فشاری در دو بارگذاری حدود ۳ درصد و اختلاف آسیب کششی حدود ۱۰ درصد است. آسیب فشاری و کششی در حضور بارگذاری حرارتی در ناحیه بزرگ‌تری گسترش یافته‌اند. بیشترین تأثیر بارگذاری حرارتی بر روی مقدار لنگر خمشی پوسته و در قسمت پشت به باد است که نسبت اختلاف لنگر خمشی در دو بارگذاری بیش از ۴۰ درصد به دست آمده است. همچنین برج در حضور بارهای حرارتی با فشار باد کم‌تری به مقاومت نهایی خود رسیده است.

### ۱- مقدمه

لرزه‌خیزی زیاد نیست، دو بار مهم در طراحی برج خنک‌کننده هستند [۳]. رفتار پوسته برج تحت بار وزن متقارن و نزدیک به غشایی است به طوری که لبه بالایی پوسته تحت کشش و سایر قسمت‌ها پوسته تحت فشار قرار دارد. در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها ممکن است خمش نیز اتفاق بیفتد [۳ و ۴]. رفتار پوسته بتنی در بار باد کاملاً متفاوت شده، به طوری که بیشترین تحقیقات بر روی برج‌های خنک‌کننده در مورد بار باد صورت گرفته است.

پوسته‌های برج‌های خنک‌کننده که در بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ طراحی و ساخته شدند به دفعات دچار آسیب‌هایی مانند ترک‌خوردگی گردیدند که این ترک‌ها به دلیل تنش‌های حرارتی ایجاد شده بودند. تحقیقات نشان می‌دهد که تنش‌های حرارتی به دلیل گرادیان حرارتی حاصل از اختلاف دمای داخل و خارج پوسته به وجود می‌آید. بارگذاری حرارتی تا قبل از سال ۱۹۶۰ به دلیل نبود دانش کافی توسط آیین‌نامه‌های طراحی در نظر گرفته نمی‌شدند [۴]. در سال ۱۹۷۷ اوروز<sup>۱</sup> اندازه‌گیری دقیقی از تغییر شکل پوسته برج خنک‌کننده تحت بار آفتاب انجام داد و نتیجه این بود که مقطع پوسته به صورت بیضی درآمد و تغییر شکل‌ها کوچک و در حد

برج‌های خنک‌کننده از عظیم‌ترین سازه‌های ساخته شده به دست بشر به شمار می‌روند که به دلیل مسائل خاص در آنالیز و طراحی همواره مورد توجه محققین و مهندسين طراح بوده است. در اکثر صنایع عظیم امروزی مانند صنایع پتروشیمی، پالایشگاه‌ها، کارخانه‌های فولادسازی، صنایع پلاستیک و از همه مهم‌تر در نیروگاه‌های حرارتی تولید برق، برای جلوگیری از بالا رفتن دمای قسمت‌های مختلف کارخانه لازم است تا گرمای حاصل از عملکرد ماشین‌ها و موتورها به نحوی مناسب از سیستم گرفته شود و به محیط خارج منتقل گردد. امروزه در اکثر صنایع عظیم برای دستیابی به منظور فوق از برج خنک‌کننده استفاده می‌شود. برج‌های خنک‌کننده ممکن است در معرض شرایط بارگذاری مختلف باشند که این بارها مطابق آیین‌نامه برج‌های خنک‌کننده VGB آلمان [۱] و ACI آمریکا [۲] شامل بارهای مرده، بار زنده، بار باد، بار زلزله، تغییرات دمایی، بار ساخت، نشست نامتقارن فونداسیون، بار برف، بار یخ، در رفتن یکی از پایه‌ها و بارهای ناشی از آفت و خزش بتن است. وزن برج خنک‌کننده و بار باد در مناطقی که فعالیت

لازم به ذکر است که در این تحقیقات نیز اثر بارهای حرارتی در نظر گرفته نشده است.

همان طور که از تحقیقات گذشته پیداست، معمولاً تأثیر بارهای حرارتی به صورت ویژه در نظر گرفته نشده است و نیاز است که تأثیر بارهای حرارتی در جابه‌جایی‌ها، لنگر خمشی و مخصوصاً آسیب‌های پوسته، مورد مطالعه قرار گیرد. برای این منظور در این پژوهش به مطالعه عددی برج خنک‌کننده شهید رجایی قزوین تحت بار وزن، حرارت و باد پرداخته شده است. ویژگی این تحقیق در نظر گرفتن هر دو نوع بارگذاری گرادیان حرارتی و تابش آفتاب بر پوسته برج است. در این تحقیق به مطالعه تأثیر بار حرارتی در ایجاد ریزترک‌ها و تأثیر این ریزترک‌ها در مقاومت نهایی پوسته در اثر تندبادهایی تا چند برابر بار مبنای باد پرداخته شده است. ویژگی دیگر این پژوهش استفاده از مدل پلاستیسیته آسیب برای مدل کردن ترک در بتن است که توانسته تمام حالت‌های آسیب را توسط یک متغیر اسکالر بنام آسیب<sup>۱۳</sup> بیان کند. در این مدل دو مکانیسم گسیختگی برای بتن فرض شده که عبارت‌اند از خردشدگی فشاری و ترک‌خوردگی کششی و پاسخ بتن توسط پارامترهای آسیب Dt و Dc مشخص خواهد شد. برای مدل کردن برج از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS استفاده شده است که توانایی حل مسائل استاتیکی، دینامیکی، حرارتی و توانایی مدل کردن تغییر شکل‌های بزرگ در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی را دارد. این نرم‌افزار دارای کتابخانه وسیعی از المان‌ها شامل مجموعه کاملی از المان‌های پیوسته (Beam)، Shell، Plate است. همچنین این نرم‌افزار دارای کتابخانه پیشرفته مواد شامل جامدهای الاستیک، پلاستیک، فوم، بتن و خاک است.

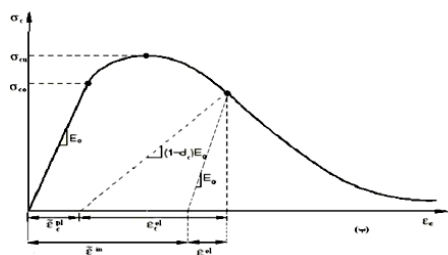
## ۲- معرفی برج خنک‌کننده شهید رجایی

در شکل ۱ نمایی از برج خنک‌کننده شهید رجایی نشان داده شده است. در این شکل ارتفاع پوسته و همچنین تغییرات ضخامت در ارتفاع پوسته نشان داده شده است. مطابق دفترچه محاسبات برج خنک‌کننده شهید رجایی [۱۸]، برج از ۳۰ عدد ستون X شکل تشکیل شده که در ارتفاع ۱۹/۴ متر به پوسته اتصال دارند. بتن به کار رفته در این برج دارای مقاومت ۲۸ مگاپاسکال و وزن مخصوص ۲۴۰۰ نیوتن بر مترمکعب و فولاد مصرفی در برج خنک‌کننده دارای تنش جاری شدن ۴۰۰ مگاپاسکال است. در ارتفاع ۱۰۰/۷ متری پوسته از رینگ سخت‌کننده به ضخامت ۰/۴ متر استفاده شده است. پوسته این برج به شکل هذلولی دوار است که قطر آن در پایین‌ترین تراز ۶۲/۴۲۲ متر و در بالاترین تراز ۵۰/۷۷۱ متر و قطر گلوگاه این برج ۴۹ متر است. رابطه (۱) معادله هذلولوی را نشان می‌دهد که در این رابطه H ارتفاع پوسته برحسب متر و R شعاع پوسته است.

$$R = 25439.44 \left[ 1 + \left( \frac{H - 80}{2636.118} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 25414.94 \quad (1)$$

سانتی‌متر بودند [۵]. در سال ۱۹۸۸ بیتاکی<sup>۱</sup> [۶] مقادیر تنش‌های حرارتی برج خنک‌کننده بتنی را بر اساس اندازه‌گیری‌های تجربی میدان دما تجزیه و تحلیل کرد. در سال‌های اخیر پدیده ترک در پوسته بتنی برج‌های خنک‌کننده مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به ماهیت ترد بودن بتن، انتشار ترک در ناحیه کششی سریع بوده و در نتیجه بیشتر نیروها توسط آرماتورها تحمل شده که با جاری شدن این آرماتورها در ناحیه ترک‌خورده خرابی کلی سازه اتفاق می‌افتد [۷]. با گسترش روش‌های اجزاء محدود امکان آنالیز حرارتی برج‌های خنک‌کننده فراهم شد. در سال ۱۹۹۱ مشک<sup>۲</sup> و همکاران [۸] بررسی‌های از مقاومت باقی‌مانده یک برج قدیمی در یونان را با استفاده از روش اجزاء محدود انجام دادند و برای مدل نمودن ترک از مدل Smeared استفاده کردند. این مدل علاوه بر در نظر گرفتن ترک، قادر به در نظر گرفتن خوردگی آرماتورها نیز هست. این مدل همچنین قادر به در نظر گرفتن تاریخچه بار حرارتی و تخمین مشارکت اثر حرارت در کل خرابی سازه است. در سال ۲۰۰۳ کراتزیگ و نوه<sup>۳</sup> [۹] بزرگ‌ترین برج خنک‌کننده ساخته شده در آن زمان را با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل کردند. در این تحقیق نیز برای مدل کردن بتن از مدل Smeared استفاده شد و بعد از اعمال بار وزن و حرارت، بار باد را تا مقاومت نهایی پوسته افزایش دادند و در نهایت نواحی ترک‌خوردگی پوسته و حداکثر ضریب بار باد در لحظه تخریب پوسته را در دو بارگذاری باد و حرارت مقایسه نمودند. در سال ۲۰۱۴ کی و جی<sup>۴</sup> [۱۰] برج خنک‌کننده‌ای به ارتفاع ۱۸۰ متر را تحت بارگذاری وزن، حرارت و باد توسط نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS مدل نمودند و برای بتن از مدل Smeared استفاده کردند. در این تحقیق تنش‌های فون مایسز در هر سه بارگذاری مقایسه شد. ضعف عمده هر دو تحقیق کراتزیگ و کی عدم اعمال بارگذاری تابش آفتاب بود؛ همچنین در این تحقیق جزئیات بیشتری مانند تغییر مکان‌ها، لنگرهای خمشی و آسیب‌های پوسته مورد مطالعه قرار نگرفت. از دیگر تحقیقات عددی می‌توان به مطالعات نورزایی<sup>۵</sup> و همکاران، نوه<sup>۶</sup> و اورلاندو<sup>۷</sup> [۱۱-۱۳] اشاره کرد. در هیچ‌کدام از این سه تحقیق بارهای حرارتی در نظر گرفته نشدند. مطالعات دیگری نیز بر پایه آزمایش تونل باد انجام شده است؛ مانند مطالعات سان<sup>۸</sup> و همکاران [۱۴]، لی و کی<sup>۹</sup> [۱۵]، کی<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۶] و ژائو<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۷]. در این تحقیقات نحوه توزیع بار باد بر پوسته برج خنک‌کننده مشخص شده و پاسخ بار دینامیکی و بار معادل استاتیکی باد در برج خنک‌کننده مورد مطالعه قرار گرفت است.

- 1 J. Błocki
- 2 G. Meschke
- 3 S.-Y. Noh, W.B. Krätzig
- 4 S. Ke, Y. Ge
- 5 J. Noorzai
- 6 H.C. Noh
- 7 M. Orlando
- 8 T. Sun
- 9 G. Li, W.-B. Cao
- 10 S. Ke
- 11 L. Zhao



شکل ۲. منحنی تنش-کرنش بتن در حالت فشاری [۲۰]

Fig. 2. Stress-strain curve for concrete in compression

تنش‌ها و کرنش‌های کلی با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه شده که در آن تنش فشاری،  $\sigma_i$ ، کرنش فشاری،  $\varepsilon_{iu}$ ، تنش فشاری حداکثر بتن و  $\varepsilon_{ic}$  کرنش نظیر تنش حداکثر است که از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.  $E_0$  و  $E_s$  نیز به ترتیب مدول الاستیسیته بتن و مدول الاستیسیته مماسی در کرنش  $\varepsilon_{ic}$  هستند که از رابطه (۴) به دست می‌آیند.

$$\sigma_i = \frac{\varepsilon_{iu} \times E_0}{1 + \left[ \frac{E_0}{E_s} - 2 \right] \frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} + \left( \frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right)^2} \quad (2)$$

$$E_0 = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن برحسب مگاپاسکال است.

$$E_s = 0.5 \times E_0 \quad (4)$$

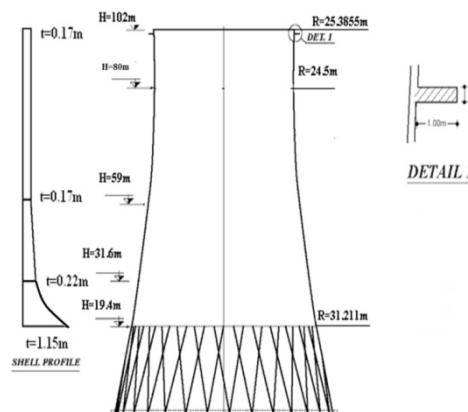
$$\varepsilon_{ic} = \frac{f'_c}{E_s} \quad (5)$$

با محاسبه تنش‌ها و کرنش‌های کلی و با استفاده از رابطه (۶) تنش‌های غیر الاستیک بتن در حالت فشاری به دست می‌آید که در آن  $\varepsilon_c^{in}$  کرنش غیر الاستیک بتن است.

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_{iu} - \frac{\sigma_i}{E_0} \quad (6)$$

مسیر باربرداری در شکل ۲ توسط برداری سه خطی نشان داده شده است که نقطه شروع آن  $\varepsilon_{en}$  است و انتهای آن روی محور کرنش ( $\sigma = 0$ ) قرار دارد. برای سادگی این بردار سه خطی را توسط یک بردار مستقیم با نقطه شروع  $\varepsilon_{en}$  در نظر گرفتیم.  $\varepsilon_{en}$  را در معادله (۲) قرار داده و تنش نظیر  $\varepsilon_{en}$  را به دست آورده و برای پیدا کردن نقطه دوم،  $\varepsilon_{en}$  را در رابطه (۷) قرار داده و کرنش در نقطه دوم را به دست می‌آوریم؛ و در نهایت با داشتن دو نقطه از این بردار، شیب آن ( $E$ ) به دست می‌آید.

$$\frac{E_p}{E_{cu}} = \left[ 0.145 \left( \frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_{cu}} \right)^2 + 0.13 \left( \frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_{cu}} \right) \right] \quad (7)$$



شکل ۱. نمایی از مشخصات هندسی و تغییرات هندسی خنک‌کننده شهید رجایی [۱۸]

Fig. 1. A view of geometrical characteristics of shahid rajaee cooling tower

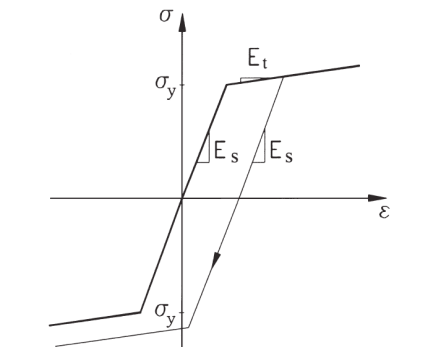
### ۲-۳- مدل Damage plasticity برای بتن

مدل Damage plasticity برای اولین بار توانست تمام حالت‌های آسیب را توسط یک متغیر اسکالر بنام آسیب بیان کند. این مدل قادر به نشان دادن رفتار بتن در حالت بارگذاری متناوب به کمک دو پارامتر آسیب فشاری و کششی است. در این مدل دو مکانیسم گسیختگی برای بتن فرض می‌شود که عبارت‌اند از ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری؛ همچنین تغییر سطح تسلیم به وسیله دو پارامتر سخت‌شوندگی فشاری و کششی  $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ ،  $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$  کنترل می‌شود. به این دو پارامتر اصطلاحاً کرنش‌های پلاستیک معادل فشاری و کششی گفته می‌شود. پاسخ بتن توسط پارامترهای آسیب  $Dt$  و  $Dc$  مشخص خواهد شد. شکل‌های ۲ و ۳ رفتار بتن تحت تنش فشاری و کششی را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۲ بعد از مقاومت حداکثر بتن هنگامی که در نمونه بتنی باربرداری انجام‌شده، سختی اولیه کاهش می‌یابد که این کاهش با پارامترهای آسیب تعیین می‌شود. در این تحقیق برای تعیین پارامترهای فشاری و کششی از مقاله نوه و همکاران [۹] استفاده شده و از منحنی تنش-کرنش ساینز [۱۹] استفاده شده است.

### ۳-۱- محاسبه پارامترهای کششی

شکل ۲ منحنی تنش فشاری کلی در مقابل کرنش‌های کلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، منحنی تنش-کرنش بتن در قسمت بارگذاری در این مدل از دو منحنی که منحنی اول غیرخطی با معادله مشخص و منحنی دوم نیز خطی با نقاط ابتدا و انتهای مشخص به وجود آمده و نقطه انتهای منحنی که معادل  $\varepsilon_{ic} \frac{4}{5}$  بتن است؛ ولی در عمل منحنی از این نقطه به بعد به‌صورت خط راست موازی محور کرنش ادامه پیدا کرده که از این قسمت در نرم‌افزار صرف‌نظر شده است.

است که تنش تسلیم و تنش جاری شدن آرماتورها و همچنین کرنش‌های متناظر با این تنش‌ها مشخص شود.



شکل ۴. مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک [۲۱]

Fig. 4. Isotropic hardening model

#### ۵- المان‌های استفاده‌شده در تحقیق

برای مدل‌سازی پوسته، فونداسیون و رینگ سخت‌کننده از المان ۴ گرهی  $S_4$  استفاده شده است. این المان توانایی در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی عرضی را دارد. این المان در شکل ۵-الف نشان داده شده است. قابلیت دیگر این المان، سازگاری با هندسه مدل است؛ به طوری که در ضخامت زیاد پوسته از تئوری پوسته ضخیم و در صورت کم بودن ضخامت پوسته از تئوری پوسته‌های نازک یا کیرشهف استفاده می‌کند. با کاهش ضخامت پوسته مقدار تغییر شکل‌های برشی عرضی نیز بسیار ناچیز است. این المان توانایی تحمل کرنش‌های بزرگ را دارد و بنابراین آنالیزهای تغییر شکل بزرگ را در نظر می‌گیرد. این المان دارای ۴ نقطه انتگرال‌گیری و ۶ درجه آزادی انتقالی و دورانی است. قابلیت دیگر المان توانایی تعریف المان‌های Rebar در مقطع خود است که به صورت المان‌هایی با کرنش‌های یک‌بعدی و در درون ضخامت المان پوسته تعریف شده و الگوی رفتاری بتن در این المان مدل Damage plasticity است. برای مدل‌سازی ستون‌ها از المان‌های تیر تیموشنکو B31 (شکل ۵-ب) استفاده شده است که از ویژگی‌های آن میتوان به خطی بودن تابع شکل المان اشاره کرده که قابلیت در نظر گرفتن نقاط انتگرال‌گیری مقطعی در مقطع عرضی خود را دارد. فرمولاسیون کرنش‌های بزرگ در این المان‌ها، اجازه کرنش‌های محوری با اندازه‌های دلخواه را داده است. تیرهای تیموشنکو بیشتر برای مدل‌سازی المان‌هایی که مقطع عرضی آنها ضخیم بوده و به عبارت دیگر تغییر شکل‌های برشی در مقطع آنها قابل چشم‌پوشی نیست، مورد استفاده قرار گرفته است. از این رو، المان‌های تیر تیموشنکو علاوه بر دارا بودن فرمولاسیون المان‌های تیر اولر-برنولی قابلیت مدل کردن تیرهای ضخیم را نیز دارند و به همین دلیل در نرم‌افزار آباکوس دارای اهمیت و قابلیت زیادی هستند. المان گفته شده

در رابطه (۷)،  $\varepsilon_{cu}$  کرنش متناظر با مقاومت فشاری بتن در رابطه (۲) است و  $\varepsilon_p$  کرنش متناظر با تنش صفر در رابطه (۲) است. با داشتن  $E$  از شیب بردار باربرداری و رابطه (۸) پارامتر آسیب فشاری  $d_c$  محاسبه شده است.

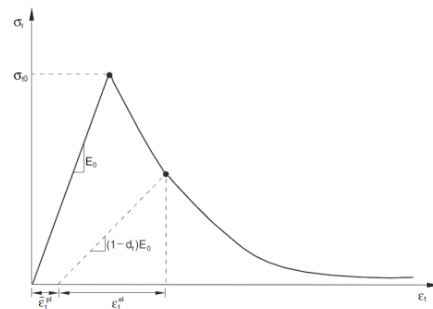
$$E = (1 - d_c) E_0 \quad (۸)$$

محاسبه پارامترهای کششی روابط ارائه شده برای بخش فشاری به صورت رابطه (۹) برای حالت کششی بازنویسی شده است.

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{in} - \frac{d_t}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (۹)$$

در رابطه (۹)،  $\tilde{\varepsilon}_t^{in}$  کرنش غیر الاستیک یا کرنش ترک‌خوردگی به کمک روابط زیر و شکل ۳ محاسبه شده است.

$$\varepsilon_t^{cr} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (۱۰)$$



شکل ۳. منحنی تنش-کرنش بتن در حالت کششی [۲۰]

Fig. 3. Stress-strain curve for concrete in tension

منحنی تنش کرنش بتن در حالت کششی از دو قسمت صعودی و نزولی تشکیل شده است. قسمت صعودی به صورت خطی و قسمت نزولی به صورت غیرخطی است که با تقریب بسیار خوب می‌توان این قسمت را نیز خطی در نظر گرفت که از  $\sigma_{cr}$  تا  $0.1\sigma_{cr}$  برابر  $\sigma_{cr}$  ادامه دارد. با توجه به معادله (۱۰) کرنش غیرالاستیک در حالت کششی  $\varepsilon_t^{cr}$  نیز به دست آمده است.

#### ۴- مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک برای مصالح فولاد

مدل‌های رفتار فولاد در مقایسه با مدل‌های رفتار بتن بسیار ساده‌تر است [۱۲]. مطابق شکل ۴ برای مدل کردن فولاد از مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است. در این مدل سطح تسلیم گسترش پیدا می‌کند ولی تغییر شکل نمی‌دهد، به عبارت دیگر، تغییرات تنش در همه جهت‌ها یکسان است [۲۱]. برای استفاده از این مدل در نرم‌افزار ABAQUS کافی

1 isotropic hardening

بارگذاری حرارتی در زمستان است. در این حالت دمای داخل برج  $+30$  و خارج پوسته  $-25$  درجه سانتیگراد است. مطابق آیین‌نامه VGB آلمان بر اثر تابش خورشید قسمتی از پوسته که در جهت تابش قرار دارد در کل ارتفاع به یک اندازه گرم شده و هر چه در جهت محیطی از جهت تابش آفتاب دور شویم، اثر تابش طبق رابطه سینوسی (۱۱) کم‌تر می‌شود. در این رابطه حداکثر دمای آفتاب در جهت تابش آفتاب است و  $\theta$  زاویه هر نقطه روی محیط پوسته از جهت تابش آفتاب است. با توجه به این که اطلاعات مربوط به دمای آفتاب بر پوسته برج خنک‌کننده شهید رجایی وجود ندارد، حداقل دمای آیین‌نامه VGB آلمان برای  $T_{MAX}$  برابر  $+25$  در نظر گرفته شده است.

$$T_{SUN} = T_{MAX} \times \cos \theta \quad (11)$$

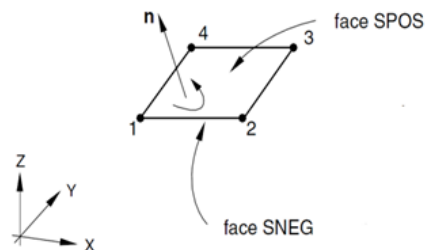
#### ۶-۲- بارگذاری باد

فشار شبه استاتیکی باد روی دیوار پوسته طبق آیین‌نامه آلمان از رابطه (۱۲) به دست آمده است:

$$q(z, \theta) = q(z) \times H(\theta) \quad (12)$$

تغییرات ارتفاعی  $q(z)$  به طور عمده تابعی از شرایط آب و هوایی منطقه و ناهمواری‌های سطح زمین است. تغییرات محیطی  $H(\theta)$  بر روی پوسته نیز عمدتاً به میزان زبری سطح پوسته بستگی دارد. بر اساس آیین‌نامه VGB آلمان برج خنک‌کننده در مقابل باد، در جهت محیطی به سه ناحیه تقسیم شده است. ناحیه اول، ناحیه رو به باد است که زاویه صفر تا تقریباً  $36$  درجه را در بر می‌گیرد. در این ناحیه برج تحت فشار غیریکنواخت قرار دارد. ناحیه دوم، ناحیه رو به باد است که زاویه  $36$  تا  $90$  درجه را در بر می‌گیرد. در این ناحیه برج تحت مکش غیریکنواخت قرار دارد. ناحیه سوم، ناحیه پشت به باد است که زوایای  $90$  تا  $270$  درجه را در بر می‌گیرد. در این ناحیه برج تحت مکش یکنواخت قرار دارد. برای محاسبه تغییرات محیطی  $H(\theta)$  باید ابتدا زبری سطح پوسته  $(k/a)$  به دست آید.  $k$  بیرون‌زدگی زائده‌ها است که در این برج  $5$  سانتی‌متر هستند و  $a$  فاصله مرکز تا مرکز دو زائده مجاور در یک‌سوم ارتفاع پوسته برج است. در نتیجه مطابق آیین‌نامه VGB، برای توزیع فشار پیرامونی باد  $1/0$  K استفاده شده است و فشار پیرامونی باد از جدول ۱ به دست آمده است.

قابلیت در نظر گرفتن آرمتور در امتداد محور خود را دارد و می‌تواند تأثیر آرمتورها در رفتار مصالح و رفتار نهایی خود را در نظر بگیرد و الگوی رفتاری بتن در این المان بر اساس مدل Smearred است [۲۰].



الف- المان ۴ گرهی  $S_4$



2 - node element

ب- المان B31

شکل ۵. المان‌های استفاده‌شده در مدل [۲۰]

Fig. 5. Elements used in model

#### ۶-۳ بارگذاری

بارگذاری باد مطابق آیین‌نامه VGB آلمان انجام شده است که مطابق این آیین‌نامه بارهای مرده، حرارت و باد جزء مهم‌ترین بارهای وارد بر برج خنک‌کننده هستند.

#### ۶-۱ بارهای حرارتی

بار حرارتی برای دو حالت تابستان و زمستان محاسبه شده و مطابق دفترچه محاسبات [۱۸] برج خنک‌کننده شهید رجایی، بحرانی‌ترین حالت

جدول ۱. فشار پیرامونی باد در اطراف پوسته

Table 1. Wind pressure distribution around the shell

نوع برج	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳
K ۱/۰	$1 - 2.0 \left( \sin \frac{90}{70} \theta \right)^{2.267}$	$-1 + 0.5 \left( \sin \left( \frac{90}{21} (\theta - 70) \right) \right)^{2.395}$	-۰/۵

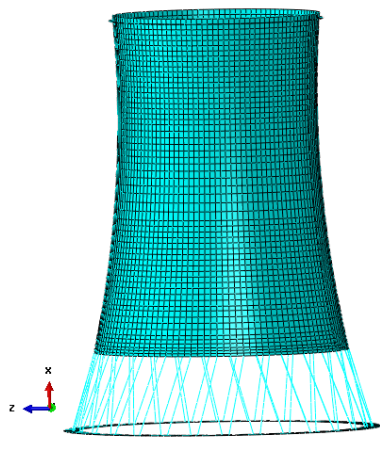
$$0.75 \times (1.4D + 1.4T \times 0.7 + 1.7W) \quad (15)$$

$$g + T_G + T_S + \gamma W \quad (16)$$

$$g + \gamma W \quad (17)$$

### ۷- شکل، اندازه و تحلیل حساسیت المان‌های برج

در شکل ۷ مش‌بندی پوسته برج خنک‌کننده شهید رجایی نشان داده شده است. این پوسته از ۷۳۲۰ المان مستطیلی از نوع  $s_4$  و فن structured تشکیل شده است. ابعاد المان‌ها در محل اتصال پوسته به ستون‌ها و رینگ سخت‌کننده کوچک‌تر از سایر قسمت‌ها و به اندازه  $1/3 \times 1/3$  مترمربع و در سایر قسمت‌های پوسته به اندازه  $1/5 \times 1/5$  مترمربع است.

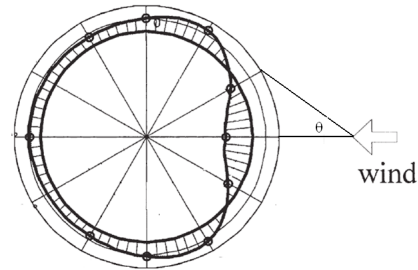


شکل ۷. المان‌بندی پوسته برج خنک‌کننده

Fig. 7. Cooling tower shell elements

در صورتی که تعداد المان‌ها  $1/5$  برابر شود یعنی از  $10364$  المان استفاده شود، زمان تحلیل برج  $6$  برابر شده و حجم داده‌ها نیز تقریباً دو برابر می‌شود. نتایج تنش اصلی حداکثر و آسیب کششی پوسته به ترتیب در شکل ۸ و ۹ مشخص شده است. نتیجه به دست آمده به این صورت است که اختلاف تنش اصلی حداکثر برابر  $1/3$  درصد و اختلاف آسیب کششی برابر  $0.75$  درصد است. در صورتی که ابعاد المان‌ها ریزتر شود و تعداد المان‌ها به بیش از  $2$  برابر یعنی  $16218$  المان افزایش یابد آنالیز همگرا نمی‌شود (شکل ۱۰). در نتیجه المان‌بندی اولیه مناسب است.

طبق آیین‌نامه VGB آلمان، ضریبی به مقدار  $1/181$  در ضرب می‌شود. این ضریب به دلیل تأثیرات باد بر روی برج مانند مکش داخلی، گسترش ارتعاشات دینامیکی و نحوه چیدمان برج‌ها در کنار هم است. در شکل ۶ فشار شبه استاتیکی باد پیرامون پوسته نشان داده شده است.



شکل ۶. توزیع فشار باد در خارج پوسته [۱]

Fig. 6. Wind pressure distribution around the shell

تغییرات ارتفاعی  $q(z)$  بر اساس آیین‌نامه VGB آلمان از رابطه (۱۳) به دست می‌آید که در آن  $z$  ارتفاع برج خنک‌کننده است.

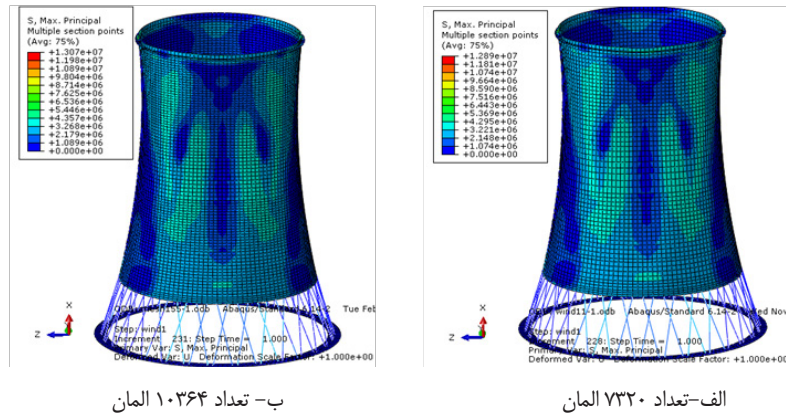
$$q_z = 1.05 \times \left( \frac{z}{10} \right)^{0.22} \quad (13)$$

همچنین طبق آیین‌نامه VGB به سطح داخلی پوسته فشار یکنواختی اعمال می‌شود که این فشار از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$W_{int} = -0.5 \times q_0(z_{max}) \quad (14)$$

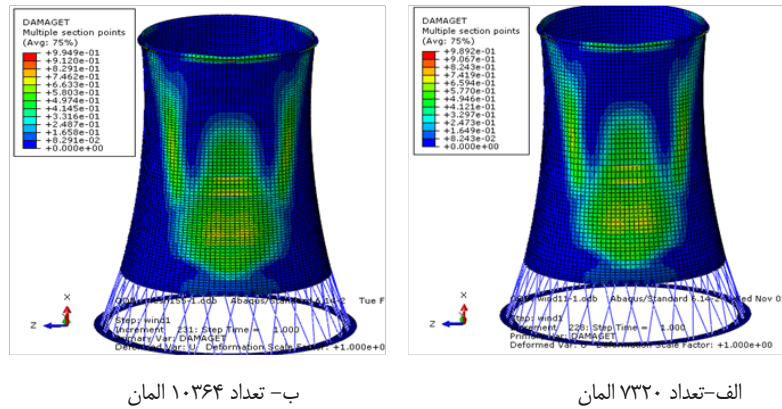
### ۶-۳ ترکیبات بارگذاری

مطابق آیین‌نامه VGB آلمان مهم‌ترین ترکیب بار برای طراحی برج خنک‌کننده، ترکیب بارگذاری رابطه (۱۵) است. در این رابطه ضریب نهایی بار حرارتی  $0.735$  است. در این تحقیق برای بررسی مقاومت نهایی پوسته در بار تندبادهایی که خیلی بیشتر از باد مبنای آیین‌نامه است، مقدار بار باد را با ضریب  $\gamma$  افزایش می‌دهیم و بار حرارتی و ثقلی را با ضریب واحد به پوسته اعمال می‌کنیم تا رفتار واقعی برج به دست آید به عبارت دیگر هدف این تحقیق پیروی از ترکیب بار آیین‌نامه نیست و به‌جای استفاده از ترکیب بار آیین‌نامه از ترکیب بار رابطه (۲۱) و (۲۲) استفاده می‌کنیم. در این روابط  $g$  بار وزن پوسته و  $T_G$  گرادیان بار حرارتی حاصل از اختلاف دمای داخل و خارج پوسته است و  $T_S$  دمای تابش آفتاب در یک سمت پوسته و  $W$  بار باد و  $\gamma$  ضریب افزایش بار باد برای رسیدن پوسته به مقاومت نهایی پوسته است. برای این‌که بتوانیم تأثیر بار حرارتی را بر پوسته به دست آوریم ضریب  $\gamma$  برای هر دو بارگذاری (۱۶) و (۱۷) را یکسان در نظر گرفتیم.



شکل ۸. کانتور تنش اصلی حداکثر پوسته

Fig. 8. Maximum main stress contour lines

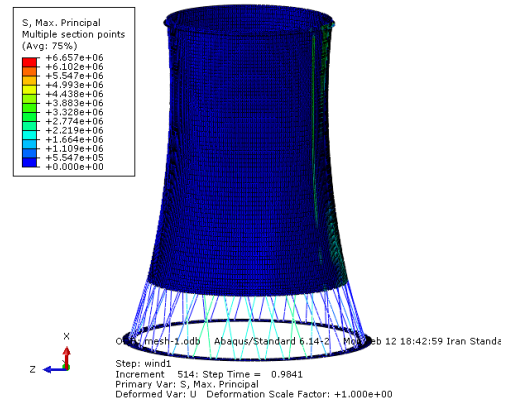


شکل ۹. کانتور آسیب کششی پوسته

Fig. 9. sile damage contour lines

### ۸- صحت‌سنجی داده‌های نرم‌افزار

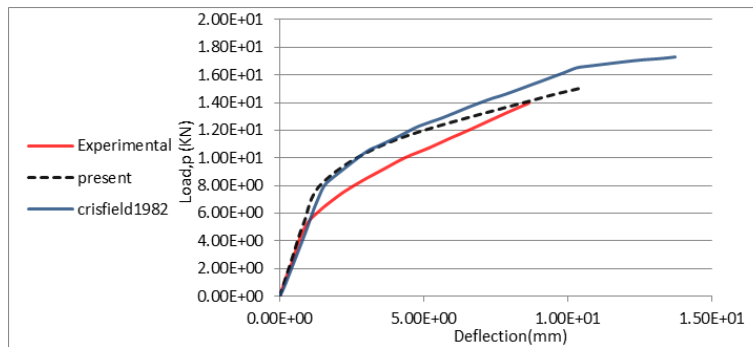
برای صحت‌سنجی داده‌های نرم‌افزار ABAQUS از مدل آزمایشگاهی دال دوپرفه مک نیک<sup>۱</sup> [۲۲] استفاده شده است. این مدل توسط کریسفیلد [۲۳] به صورت عددی آنالیز شده است. در شکل ۱۱ نمودار بار-جابجایی مدل مک نیک و کریسفیلد و تحقیق حاضر مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، انطباق خوبی بین نمودار آزمایشگاهی و نمودار نرم‌افزار ABAQUS وجود دارد. مخصوصاً در لحظه مقاومت نهایی نمونه دو نمودار منطبق هستند. شکل ۱۲ مقایسه ترک‌خوردگی در نمونه آزمایشگاهی و نمونه تحقیق حاضر است. مشاهده می‌شود که نواحی ترک‌خورده در نرم‌افزار و نمونه آزمایشگاهی تا حدود خیلی زیادی منطبق است.



شکل ۱۰. کانتور تنش اصلی حداکثر پوسته با ۱۶۲۱۸ المان

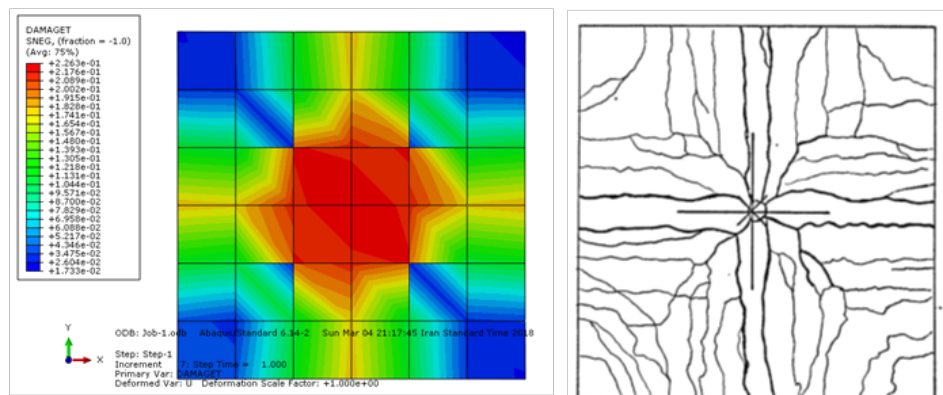
Fig. 10. Maximum main stress contours of shell with 16218 elements

1 G.M. McNeice  
2 M. Crisfield



شکل ۱۱. مقایسه نمودار بار-جابجایی

Fig. 11. Comparison of load-displacement curves



ب- مدل حاضر ABAQUS

الف- نمونه آزمایشگاهی

شکل ۱۲. ترک خوردگی دال

Fig. 12. Slab cracking pattern

## ۹- نتایج

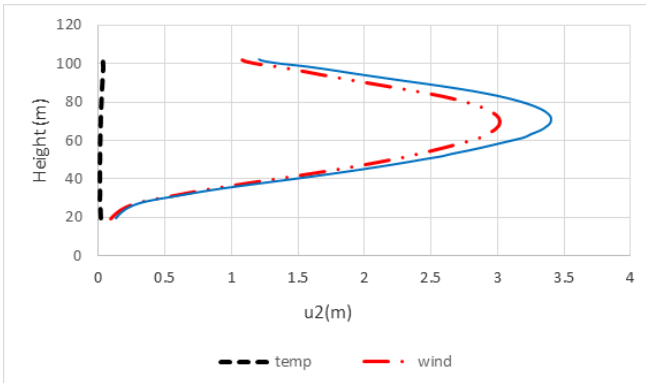
بعد از تحلیل اجزاء محدود برج خنک کننده توسط نرم افزار ABAQUS، نتایج به دست آمده شامل تغییر مکان پوسته در جهت بار باد، آسیب های فشاری و آسیب های کششی در هر دو بارگذاری (۱۶) و (۱۷) یعنی برج خنک کننده ای که تحت بار وزن+حرارت+باد است و برج خنک کننده ای که فقط تحت بار وزن و باد است، به صورت نمودار و گراف نشان داده شده است.

### ۹-۱- تغییر مکان پوسته برج در جهات محیطی و نصف النهاری

در شکل ۱۳ نمودار تغییر مکان پوسته در ارتفاع ۶۰ متری برج در جهت اعمال باد و در راستای محیطی نشان داده است. همان طور که در شکل مشخص است، بیشترین جابه جایی در جهت باد است. در زاویه حدود ۳۶ درجه جهت جابه جایی عوض شده و در زاویه ۷۰ درجه تا ۲۹۰ درجه

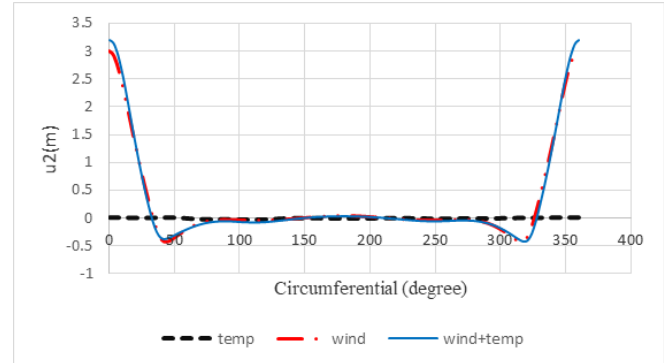
جابه جایی پوسته بسیار اندک است. برج تحت بار حرارت دارای جابه جایی بسیار کمی است، ولی در صورت حضور بار حرارتی به همراه بار باد تا ۶/۴ درصد تغییر مکان حداکثر افزایش می یابد. شکل ۱۴ نمودار جابه جایی پوسته در جهت رو به باد و در راستای نصف النهاری را نمایش می دهد که بیشترین جابه جایی در ۷۰ متری پوسته است و در ارتفاعات بالاتر به دلیل وجود رینگ سخت کننده، جابه جایی کاهش می یابد. بیشترین تأثیر بار حرارتی در تغییر مکان نهایی پوسته در نقطه حداکثر جابه جایی به میزان ۱۱/۴ درصد است. در شکل ۱۵ نیز اعوجاج مقطع برج خنک کننده شهید رجایی تحت دو بارگذاری مقایسه شده است.





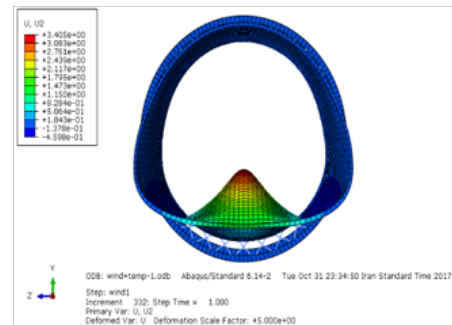
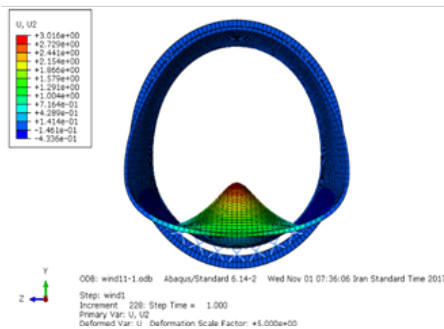
شکل ۱۴. جابه جایی پوسته در جهت رو به باد و در راستای نصف‌النهاری

Fig. 14. Meridian displacement of tower shell at wind side



شکل ۱۳. جابه جایی در وسط پوسته برج در جهت اعمال باد در راستای محیطی

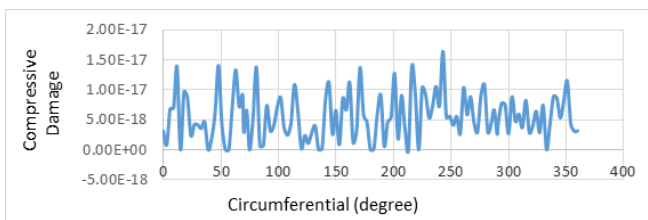
Fig. 13. Circumferential displacement of tower shell at wind side



شکل ۱۵. اعوجاج پوسته در بارگذاری های (۱۶) و (۱۷)

Fig. 15. Shell distortion at load no. 16 & 17

بارگذاری (۱۷) و در شکل ۲۰ کانتور آسیب فشاری پوسته در حالت بارگذاری (۱۶) نشان داده شده است. اختلاف ترک خوردگی حدود ۳ درصد است؛ ولی آسیب فشاری در حضور بارگذاری حرارتی در ناحیه بزرگ تری گسترش یافته است.

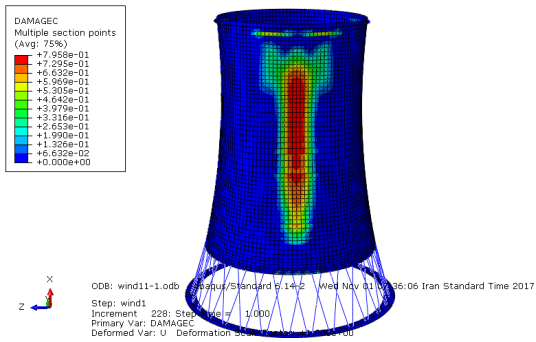


شکل ۱۶. نمودار آسیب فشاری پوسته تحت بارگذاری حرارتی و در راستای محیطی در ارتفاع ۷۰ متری پوسته

Fig. 16. Compression damage of shell under thermal loading at height 70 meters

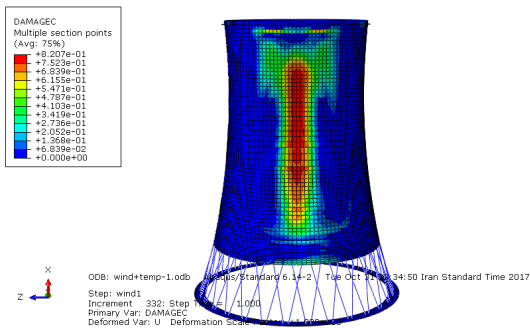
## ۹-۲- آسیب فشاری

در شکل ۱۶ نمودار آسیب فشاری پوسته تحت بارگذاری حرارتی و در راستای محیطی در ارتفاع ۷۰ متری پوسته نشان داده شده است. میزان این آسیب بسیار ناچیز و در حد صفر است. در شکل ۱۷ نمودار آسیب فشاری پوسته در راستای نصف‌النهاری و در جهت اعمال باد نشان داده شده است. مشخص است که میزان آسیب فشاری تحت بارگذاری حرارتی در مقایسه با آسیب نهایی پوسته بسیار ناچیز است؛ ولی در ترکیب با بار باد تأثیر بار حرارتی تا حدودی قابل مشاهده است. بیشترین آسیب فشاری پوسته در بارگذاری (۱۶) در ارتفاع ۶۳ متری پوسته به وجود می‌آید که در ترکیب با بار حرارتی در حدود ۳ درصد افزایش می‌یابد. بیشترین اختلاف آسیب فشاری پوسته در دو بارگذاری (۱۶) و (۱۷) در بالاترین و پایین‌ترین نقطه پوسته به وجود می‌آید (شکل ۱۸). در بالاترین نقطه پوسته به دلیل وجود رینگ سخت‌کننده و در پایین‌ترین نقطه پوسته به دلیل اتصال ستون‌ها به پوسته تمرکز تنش در پوسته به وجود آمده است. شکل ۱۹ کانتور آسیب فشاری پوسته در حالت



شکل ۱۹. کانتور آسیب فشاری پوسته در پایان بارگذاری (۱۷)

Fig. 19. Compression damage contour at the end of loading no.17

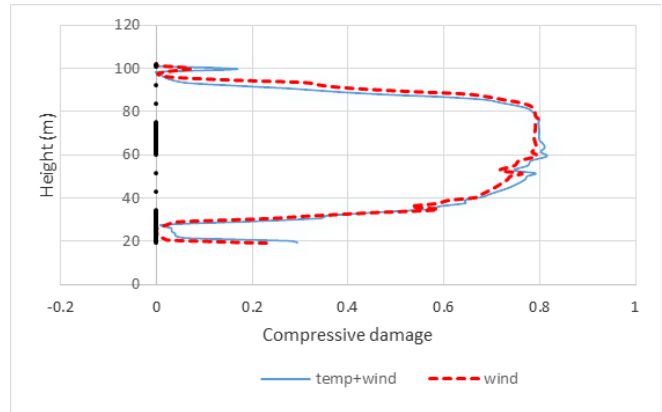


شکل ۲۰. کانتور آسیب فشاری پوسته در پایان بارگذاری (۱۶)

Fig. 20. Compression damage contour at the end of loading no.16

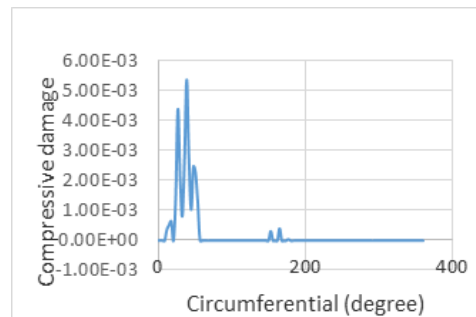
### ۹-۳- آسیب کششی

در شکل ۲۱ نمودار آسیب کششی پوسته در راستای محیطی در بارگذاری حرارتی نشان داده شده است. تحت بارگذاری حرارتی آسیب‌های کششی در پوسته بیشتر از آسیب‌های فشاری هستند. گسترش ریزترک‌های کششی ناشی از بارگذاری حرارتی در ترکیب با بار باد، باعث تسریع خرابی پوسته خواهد شد. این تأثیر در شکل ۲۲ قابل مشاهده است. با توجه به کانتور آسیب‌های کششی در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ اختلاف ترک‌خوردگی در دو حالت بارگذاری (۱۶) و (۱۷) حدود ۱۰ درصد است و در حالت بارگذاری (۱۷) ترک‌های کششی در پوسته گسترش بیشتری یافته‌اند.

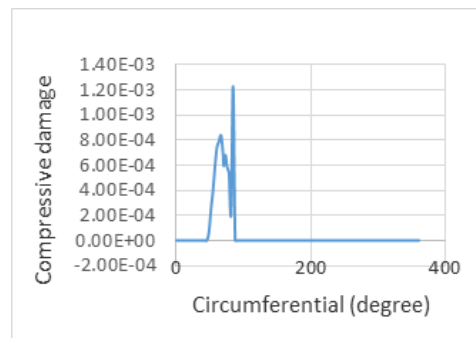


شکل ۱۷. نمودار آسیب فشاری پوسته در راستای نصف‌النهاری

Fig. 17. Compression damage in meridian direction



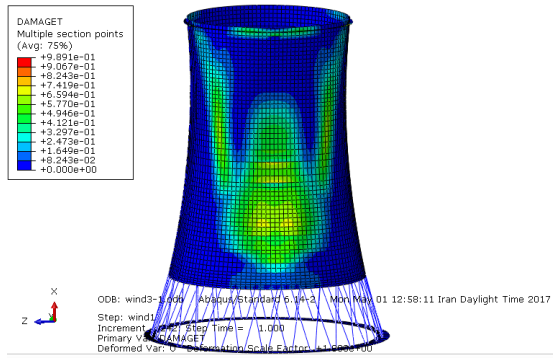
الف- ارتفاع ۱۰.۲ متری برج



ب- ارتفاع ۱۹.۴ متری برج

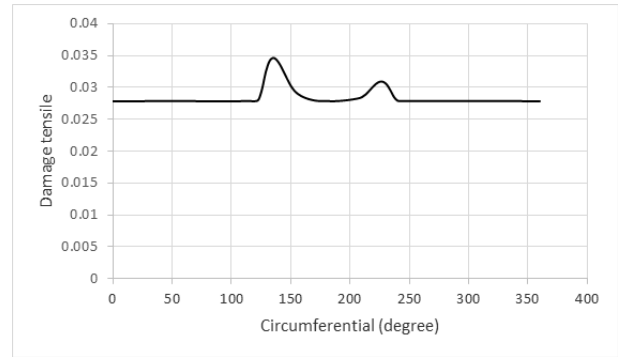
شکل ۱۸. نمودار آسیب فشاری پوسته در پایان بارگذاری حرارتی و در راستای محیطی

Fig. 18. Compression damage at the end of thermal loading



شکل ۲۴. آسیب کششی پوسته در پایان بارگذاری (۱۷)

Fig. 24. Tensile damage at the end of loading no. 17

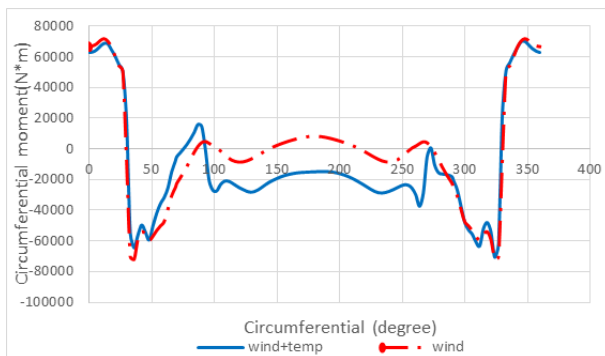


شکل ۲۱. نمودار آسیب کششی پوسته در بارگذاری حرارتی

Fig. 21. Tensile damage under thermal loading

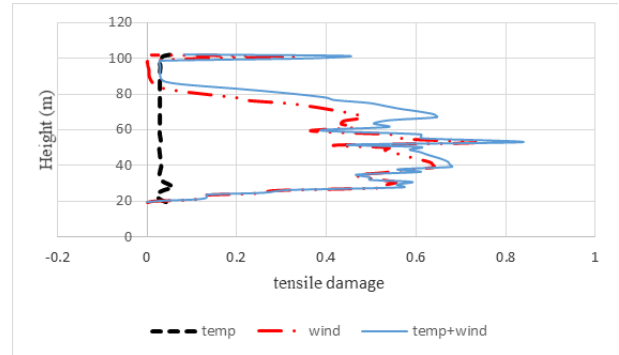
### ۹-۴- لنگر خمشی پوسته

شکل ۲۵ لنگر خمشی محیطی ایجاد شده در ارتفاع میانی پوسته را نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف در لنگر خمشی پوسته در دو بارگذاری (۱۶) و (۱۷) از زاویه ۹۰ درجه تا زاویه ۲۷۰ درجه پوسته است؛ یعنی ناحیه پشت به باد که البته در این ناحیه مقدار لنگر ایجاد شده در اثر بار باد خیلی کم‌تر از لنگر ایجاد شده در ناحیه رو به باد است. در نتیجه بارگذاری حرارتی اثر زیادی بر روی مقدار لنگر در قسمت پشت به باد دارد و در این ناحیه نسبت اختلاف لنگر خمشی در دو بارگذاری (۱۶) و (۱۷) بیش از ۴۰ درصد است و در زاویه ۱۸۰ درجه جهت لنگر از مثبت به منفی تغییر جهت داده است.



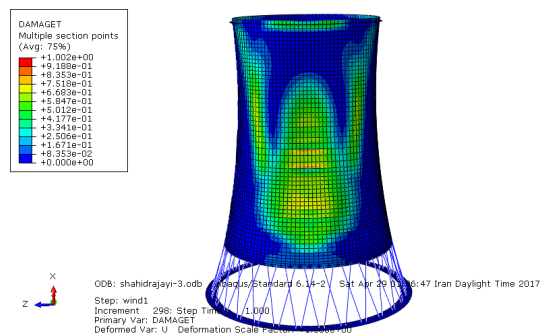
شکل ۲۵. نمودار لنگر محیطی در جهت رو به باد و در ارتفاع وسط پوسته

Fig. 25. Circumferential moment distribution at wind side



شکل ۲۲. نمودار آسیب کششی پوسته در بارگذاری حرارتی و حالت‌های بارگذاری (۱۶) و (۱۷)

Fig. 22. Tensile damage curves under thermal and wind loadings



شکل ۲۳. آسیب کششی پوسته در پایان بارگذاری (۱۶)

Fig. 23. Tensile damage at the end of loading no. 16

### ۹-۵- مقاومت نهایی

در ترکیب بار (۱۶) بار باد تا حد نهایی مقاومت مصالح برج افزایش یافت که این افزایش برابر با  $\gamma W$  است ( $W$  مقدار بار مبنای باد مطابق آیین‌نامه

افزایش یافته است. حتی جهت لنگر خمشی در جهت پشت به باد از لنگر خمشی مثبت به لنگر خمشی منفی تغییر کرده است.

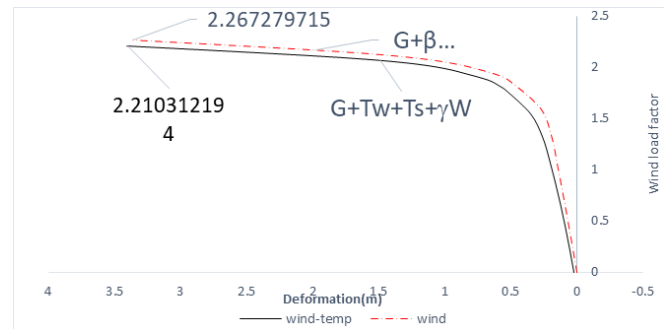
۵. با اعمال بار حرارتی پوسته برج شهید رجایی در بار باد کمتری (حدود ۲/۵ درصد) به مقاومت نهایی خود رسیده است.

۶. در مجموع لازم است تأثیر بار حرارتی در طراحی برج خنک کننده شهید رجایی مد نظر قرار گیرد؛ هرچند تأثیر آن در مقایسه با بار باد چندان قابل توجه نیست.

### مراجع

- [1] V. Guideline, Structural design of cooling towers, VGB Power Tech R, 610 (2005).
- [2] A. Committee, I.O.f. Standardization, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, in, American Concrete Institute, 2008.
- [3] A. Zingoni, Shell structures in civil and mechanical engineering: theory and closed-form analytical solutions, Thomas Telford, 1997.
- [4] A. Zingoni, Self-weight stresses in hyperbolic cooling towers of general shape, International Journal of Space Structures, 14(4) (1999) 281-294
- [5] Á. Orosz, Effects of temperature upon reinforced concrete cooling towers, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 25(1-2) (1981) 81-93.
- [6] J. Błocki, Stress states in cooling tower caused by thermal field, Journal of structural engineering, 114(12) (1988) 2633-2651.
- [7] M.G. Hashish, S.H. Abu-Sitta, Response of hyperbolic cooling towers to turbulent wind, Journal of the Structural Division, 100(5) (1974) 1037-1051.
- [8] G. Meschke, H.A. Mang, P. Kosza, Finite element analyses of cracked cooling tower shell, Journal of structural engineering, 117(9) (1991) 2620-2638.
- [9] S.-Y. Noh, W.B. Krätzig, K. Meskouris, Numerical simulation of serviceability, damage evolution and failure of reinforced concrete shells, Computers & structures, 81(8-11) (2003) 843-857.
- [10] S. Ke, Y. Ge, The influence of self-excited forces on wind loads and wind effects for super-large cooling towers, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 132 (2014) 125-135.
- [11] J. Noorzaei, A. Naghshineh, M.A. Kadir, W. Thanoon, M. Jaafar, Nonlinear interactive analysis of cooling tower–foundation–soil interaction under unsymmetrical wind load, Thin-walled structures, 44(9) (2006) 997-1005.

VGB آلمان است). برای مقایسه مقدار افزایش بار باد در ترکیب بار (۱۷) برای رسیدن به حد نهایی مقاومت برابر  $\beta W$  به دست آمده است. در شکل ۲۶ نمودار جابه‌جایی پوسته برج در نقطه‌ای که پوسته برج دارای بیشترین جابه‌جایی است، یعنی در جهت اعمال باد ( $\theta = \theta^0$ ) و در ارتفاع ۶۹/۶ متری برج نشان داده شده است. از این نمودار مشخص است که در صورت اعمال بار حرارتی پوسته برج در بار باد کمتری به مقاومت نهایی خود رسیده است و نسبت اختلاف ضریب بار باد در دو بارگذاری حدود ۲/۵۱ درصد است.



شکل ۲۶. نمودار جابه‌جایی برج خنک‌کننده در جهت رو به باد در ارتفاع ۶۹/۶ متر

Fig. 26. Cooling tower displacement at wind side

### ۱۰- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برج خنک‌کننده نیروگاه شهید رجایی قزوین به صورت عددی تحت اثر بار باد و بارهای حرارتی تحلیل گردید و نتایج زیر به دست آمد.

۱. با افزودن بار حرارتی به بار باد حداکثر افزایش جابه‌جایی پوسته برج خنک‌کننده شهید رجایی در حدود ۱۱ درصد و در ارتفاع ۷۰ متری پوسته و در جهت اعمال بار باد مشاهده گردید.
۲. بار حرارتی میزان آسیب فشاری پوسته برج خنک‌کننده شهید رجایی را حداکثر در حدود ۳ درصد و در ارتفاع ۶۳ متری پوسته در جهت اعمال بار باد افزایش داده است. ضمناً آسیب فشاری پوسته در ناحیه بیشتری از پوسته گسترش پیدا کرده است.
۳. آسیب کششی پوسته برج خنک‌کننده شهید رجایی با اعمال بار حرارتی حداکثر در حدود ۱۰ درصد و در ارتفاع ۶۳ متری پوسته در جهت اعمال بار باد افزایش یافته است. همچنین آسیب کششی پوسته در ناحیه بیشتری از پوسته گسترش پیدا کرده است.
۴. بیشترین تأثیر بارگذاری حرارتی بر روی مقدار لنگر پوسته برج خنک‌کننده شهید رجایی در قسمت پشت به باد بوده است که در این ناحیه لنگر خمشی تحت بارگذاری حرارتی بیش از ۴۰ درصد

- [17] L. Zhao, Y. Ge, A. Kareem, Fluctuating wind pressure distribution around full-scale cooling towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 165 (2017) 34-45.
- [18] EGI, Cooling Tower Document 'Shahid Rajaei Thermal Power Plant', Qazvin, Iran, in, 1990
- [19] L. Zhao, Y. Ge, A. Kareem, Fluctuating wind pressure distribution around full-scale cooling towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 165 (2017) 34-45.
- [20] L.A. Documentation, 6.13. (2014), *Abaqus Analysis User's Guide*.
- [21] Z. Waszczyszyn, E. Pabisek, J. Pamin, M. Radwańska, Nonlinear analysis of a RC cooling tower with geometrical imperfections and a technological cut-out, *Engineering structures*, 22(5) (2000) 480-489.
- [22] J.C. Jofriet, G.M. McNeice, Finite element analysis of reinforced concrete slabs, *Journal of the structural division*, 97(3) (1971) 785-806.
- [23] M. Crisfield, Accelerated solution techniques and concrete cracking, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 33(1-3) (1982) 585-607.
- [12] H.C. Noh, Nonlinear behavior and ultimate load bearing capacity of reinforced concrete natural draught cooling tower shell, *Engineering Structures*, 28(3) (2006) 399-410.
- [13] M. Orlando, Wind-induced interference effects on two adjacent cooling towers, *Engineering structures*, 23(8) (2001) 979-992.
- [14] T. Sun, Z. Gu, L. Zhou, P. Li, G. Cai, Full-scale measurement and wind-tunnel testing of wind loading on two neighboring cooling towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 43(1-3) (1992) 2213-2224.
- [15] G. Li, W.-B. Cao, Structural analysis and optimization of large cooling tower subjected to wind loads based on the iteration of pressure, *Structural Engineering and Mechanics*, 46(5) (2013) 735-753.
- [16] S. Ke, Y. Ge, L. Zhao, Y. Tamura, Stability and reinforcement analysis of superlarge exhaust cooling towers based on a wind tunnel test, *Journal of Structural Engineering*, 141(12) (2015) 04015066.

Please cite this article using:

S. Rahimian, R. Morshed, Investigating The Effect of Thermal Loading on Cooling Tower Shells, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(4) (2019) 631-644.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13858.5493

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



