



## پیشنهاد نصب حلقه کج شونده در تاج برج خنک کن هلر برای کاهش انسداد خروج هوا از بالای آن در هنگام وزش باد

سعید رضا صباغ یزدی<sup>1\*</sup>، سعید قره جانلو<sup>2</sup>

1- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
2- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\* تهران، کد پستی 19697، syazdi@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 18 تیر 1392  
پذیرش: 27 مرداد 1392  
ارائه در سایت: 31 اردیبهشت 1393

کلید واژگان:

برج خنک کن هلر  
حلقه الاستیک  
بهبود عملکرد  
آیین نامه VGB

### چکیده

عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک به شدت تحت تأثیر نامطلوب وزش باد قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر موضوعات فراوانی در خصوص به-کارگیری تجهیزات جدید، استفاده از مصالح نوین، تغییر در هندسه برج و ... برای بهینه‌سازی عملکرد برج‌های خنک‌کن هلر مطرح شده است. در این تحقیق، برای کاهش اثر انسداد دهانه خروجی دودکش برج و افزایش بازدهی آن در هنگام وزش باد، تجهیزاتی در بالای برج پیشنهاد شده است. بدین منظور دو نمونه حلقه الاستیک با ارتفاع 5 و 10 درصد ارتفاع برج خنک‌کن در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی، برای بررسی تجهیزات پیشنهاد شده از نرم‌افزار تجاری آنسیس استفاده شده است. ابتدا برای بررسی درستی عملکرد مدل عددی، تغییرات فشار حاصل از حل عددی برج خنک‌کن با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه VGB آلمان مقایسه شده است. پدیده شناوری حرارتی به حرکت رو به بالای جریان هوا کمک می‌کند. با فرض اینکه، این پدیده به نتایج کار حاضر کمک می‌کند، از مدل‌سازی آن صرف نظر شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در صورت نصب تجهیزات پیشنهاد شده در بالای برج، می‌توان دبی جریان هوای خروجی از دهانه بالایی برج را به میزان 9 تا 12/6 درصد نسبت به حالت معمول بهبود بخشید و در نتیجه باعث افزایش کارایی برج شد.

## Proposition of obliqueable ring installation at crown of the Hellertype cooling tower for reduction of throttling effect in windy condition

Saeid Reza Sabbagh Yazdi<sup>1\*</sup>, Saeid Gharehjanloo<sup>2</sup>

1- Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.  
2- Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.  
\*P.O.B. 19697, Tehran, Iran, syazdi@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 09 July 2013  
Accepted 18 August 2013  
Available Online 21 May 2014

Keywords:  
Heller Cooling Tower  
Elastic Ring  
Better Performance  
VGB Code

### ABSTRACT

The heller type dry cooling tower performance is significantly affected by unfavorable wind effects. During recent years, many modifications including the application of new equipment, using new materials, modification of tower's geometry, etc, have been proposed to optimize heller cooling towers performance. In this study, a crown supplement is proposed to reduce the throttling effect of deflected plume. Two alternatives of the elastic ring with 5% and 10% of the cooling tower height are considered. In order to investigate the effect of proposed crown supplement computational modeling is used utilizing ANSYS commercial software. For this purpose, a numerical model was utilized and the results were verified by comparing pressure at trunk of towers with VGB code. The thermal buoyancy phenomenon helps airflow to move upward. Assuming that thermal buoyancy will help to the results, in present work this phenomenon is not considered. The computational results present better performance by increasing 9 to 12.6 percent of air volume flow through the tower compared to the usual condition.

### 1- مقدمه

نامطلوب وزش باد بر عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک از فیزیک پیچیده‌ای برخوردار است و تأثیرات بسزایی در پایین آوردن راندمان برج دارد. از دیدگاه مهندسی، برآورد میدان فشار ناشی از جریان سیال در اطراف سازه‌ها برای طراحی بهینه آن‌ها، یکی از مهم‌ترین اهداف استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی است. درچنین تحلیلی اندرکنش مشخصات هندسی و تأثیرات آشفته‌گی جریان، نقش تعیین کننده‌ای بر شکل‌گیری بار

سیستم‌های خنک‌کن نیروگاهی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های تمامی نیروگاه‌های حرارتی همواره مورد توجه خاص بوده‌اند. راندمان این بخش سیستم به‌طور مستقیم بر راندمان نیروگاه اثر می‌گذارد. عملکرد سیستم خنک‌کن خشک هلر نیز مانند انواع دیگر سیستم‌های خنک‌کن به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی از جمله وزش باد و دمای محیط قرار دارد. اثر

### Please cite this article using:

S. R. Sabbagh Yazdi, S. Gharehjanloo, Proposition of obliqueable ring installation at crown of the Hellertype cooling tower for reduction of throttling effect in windy condition, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 184-193, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بالای دهانه برج پیشنهاد دادند. در کاری دیگر توسط فرازمندیا [8] جهت بهبود راندمان عملکرد حرارتی برج در شرایط وزش باد استفاده از کلاهک دوار در دهانه خروجی برج پیشنهاد شده است. در طراحی پیشنهادی توسط گودرزی [9] برج خنک‌کن با سطح مقطع دهانه خروجی به شکل مورب پیشنهاد شده است تا اثر انسداد در دهانه تاج برج کمتر شود. با شبیه‌سازی عددی نشان داده شده که هندسه پیشنهادی باعث افزایش نه درصدی جریان عبوری از برج نسبت به حالت معمول آن در هنگام وزش باد خواهد شد. البته این طرح پیشنهادی در مناطقی که اصولاً جهت وزش باد از یکسو است قابل اجرا می‌باشد.

در این مقاله و در طرح پیشنهادی حلقه‌ای الاستیک در نظر گرفته شده است که قابل نصب بر روی دهانه بالایی برج می‌باشد. این حلقه الاستیک به‌طور خودکار در شرایط وزش باد دچار تغییر شکل شده و با این تغییر شکل، هندسه فوقانی برج دچار تغییر می‌شود و این تغییرات در هندسه فوقانی برج باعث افزایش دبی جریان خروجی از برج و در نتیجه باعث افزایش کارایی برج می‌شود. برای تعیین هندسه و شکل ایده‌آل حلقه الاستیک بر روی برج، با تغییر پارامترهای هندسی، شکلی مناسب برای طراحی حلقه الاستیک مذکور به دست آمده است. در این شبیه‌سازی عددی پدیده بویانسی حرارتی با فرض تأثیرات مثبت در افزایش مقادیر دبی خروجی در نظر گرفته نشده است.

## 2- کلیات مدل سازی

در طرح حاضر در شبیه‌سازی عددی تأثیر باد در ایجاد جریان در بیرون و درون برج خنک‌کن هبلر از ماجول سیالاتی<sup>1</sup> و برای تحلیل اجزای محدود بخش سازه‌ای مدل نیز از ماجول سازه ایستایی<sup>2</sup> موجود در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است.

### 2-1- محاسبه فشار باد بر روی بدنه برج خنک‌کن هبلر در آیین‌نامه

#### VGB آلمان

بار باد مهم‌ترین نیروی تأثیرگذار بر برج‌های خنک‌کن است. آیین‌نامه VGB کشور آلمان براساس نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی و با توجه به شکل هندسی و شرایط آب و هوایی و منطقه‌ای برج‌های خنک‌کن، روابطی را برای محاسبه اثرات فشار ناشی از جریان باد بر انواع برج خنک‌کن پیشنهاد داده است. این آیین‌نامه اثر باد را به شکل نیروهای استاتیکی و در قالب نیروی فشار وارد بر سطوح برج در نظر می‌گیرد. فشار وارد بر سطوح خارجی برج در آیین‌نامه VGB از طریق رابطه زیر برای هر نقطه از سطح برج قابل محاسبه است [10]:

$$W(z, \theta) = C_p(\theta) \times q(z) \times \lambda \quad (1)$$

در این رابطه،  $\theta$  زاویه پیرامونی برج در هر ارتفاع است و  $C_p(\theta)$  ضریب فشار نامیده می‌شود و بیانگر تغییرات محیطی فشار است و تابع  $q(z)$  فشار سرعت بحرانی نامیده می‌شود که تغییرات ارتفاعی فشار را نشان می‌دهد و با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه مورد نظر و متناظر با سرعت تند باد از آیین‌نامه به دست می‌آید. در این رابطه،  $\lambda$  ضریب افزایشی است که بیانگر اثرات مجاورت برج‌های دیگر است و مقدار آن برای برج تک برابر واحد است. برای محاسبه فشار وارد بر سطوح خارجی برج از طریق آیین‌نامه، باید مقادیر  $C_p(\theta)$  را در محیط پیرامونی برج و مقدار  $q(z)$  را در ارتفاع برج مشخص کنیم. مقادیر  $C_p(\theta)$  برای برج با سطوح صیقلی به شرح زیر است [10]:

فشاری بر سازه‌های در معرض باد دارد. در طراحی برج‌های خنک‌کن نیز نیروی باد از جمله نیروهای پراهمیت به‌شمار می‌رود. این اهمیت به دلیل متغیر بودن فشار ناشی از باد در ارتفاع و محیط پیرامونی برج است. در سال - های اخیر موضوعات فراوانی در خصوص بکارگیری تجهیزات جدید، استفاده از مصالح نوین، تغییر در هندسه برج و... برای بهینه‌سازی عملکرد برج‌های خنک‌کن هبلر مطرح شده است و مدل‌سازی‌های عددی بسیاری در این زمینه انجام گرفته است. در سال 1993 پریز و کروگر [1] با به‌کارگیری نرم‌افزار فونیکس، اثرات باد بر روی یک برج خنک‌کن خشک طبیعی را بررسی کردند. آن‌ها دیوارهای بادشکن را به‌عنوان ابزاری برای کمینه کردن اثر باد عرضی بر عملکرد حرارتی برج‌ها معرفی کردند. در سال 2003 کاپاس [2] به بررسی مشخصه‌های جریان برج‌های خنک‌کن هبلر با زوایای متفاوت دلتاهای خنک‌کن و سپس رفتار کل جریان برج در اثر باد پرداخت. با به‌کارگیری نرم‌افزار فلونت، 4 زاویه دلتا را با استفاده از مدل‌های دوبعدی بررسی و در هر حالت افت فشار جریان را محاسبه کرد. در سال 2004 الواکد و بهنیا [3] با به‌کارگیری کد فلونت به مدل‌سازی سه‌بعدی برج پرداخته و جریان درون و بیرون برج را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استفاده کرده و با معرفی یک پارامتر جدید سعی در طرح سرعت باد به‌عنوان یک فاکتور طراحی داشتند. آن‌ها نیز دیواره‌های بادشکن را به‌عنوان راه حلی برای کاهش اثرات منفی باد معرفی کردند.

مطالعات تجربی و عددی نشان دادند که دو عامل اساسی باعث کاهش کارایی برج به هنگام وزش باد می‌شوند. عامل اول وجود جریان شتاب یافته در اطراف بخش استوانه‌ای پایینی (منطقه رادیاتورها) است که باعث کاهش موضعی فشار هوا در این منطقه و همچنین جدایش جریان در پشت برج می‌شود. افت فشار به‌وجود آمده در بخش وسیعی از محیط منطقه رادیاتورها، اختلاف فشار دو طرف رادیاتورها را کاهش داده و کاهش دبی جرمی هوای عبوری از روی رادیاتورها را باعث می‌شود. با توجه به این بسیاری از محققین برای کاهش تأثیر نامطلوب جریان کم فشار و پرسرعت طرفین برج (عامل اول)، به ارائه راه‌حلهایی در این منطقه از برج پرداخته‌اند. در سال 2004 تیمی از دانشگاه سیدنی [4] به بررسی نقش ساختمان‌های نیروگاه به‌عنوان یک مانع برای اثرگذاری باد بر عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک طبیعی پرداختند. در سال 2008 توسط جعفر مددنی، هما کوشا و مسعود میرزایی [5] بیش از بیست و سه دیوار بهبود دهنده طراحی و ساخته شده و تأثیر آن‌ها روی ضریب افت فشار، مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار به آرایش دیواره‌های بادشکن بسیار توجه شده و در بهترین چیدمان دیواره‌های بادشکن، 33 درصد بهبود عملکرد گزارش شده است. در سال 2009 آقایان محمدحسن کیهانی، رسول محبی و علی عباس‌نژاد [6] در دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از نمونه آزمایشگاهی برج خنک‌کن در تونل باد دانشگاه، دو آرایش مختلف از دیواره‌های بادشکن به‌صورت عددی و تجربی مورد آزمایش قرار دادند، به عقیده آن‌ها استفاده از هشت دیوار بادشکن تأثیر مثبتی در کاهش اثر نامطلوب باد دارد.

عامل دوم ایجاد پدیده خفگی در دهانه خروجی بخش فوقانی برج می‌باشد. وزش باد باعث کج شدن جریان خروجی برج و کاهش سطح مقطع جریان خروجی از برج می‌شود. لذا با ایجاد انسداد در تراز تاج برج، جریان خروجی از برج کاهش یافته و این امر باعث افزایش فشار درون برج نسبت به شرایط طراحی خواهد شد. در تحقیقی آقایان کیهانی و مولوی [7] با ساخت مدلی از برج خنک‌کننده خشک نیروگاه شازند اراک و قرار دادن آن در داخل تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود دیواره‌های بادشکن به شکل نیم استوانه در

1- CFX  
2- Static Structural

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92 \quad (13)$$

### 2-2-2- معادلات حاکم بر محیط جامد

روابط تنش- کرنش در تحلیل اجزا محدود به صورت زیر می‌باشد [12].

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (14)$$

که  $\{\sigma\}$  ماتریس تنش،  $[D]$  ماتریس سختی و  $\{\varepsilon\}$  ماتریس کرنش می‌باشد. با معکوس کردن رابطه بالا به رابطه زیر می‌رسیم.

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1}\{\sigma\} \quad (15)$$

با توجه به تقارن ماتریس  $[D]^{-1}$  داریم.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy}\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{xz}\sigma_z}{E_z}, \varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}} \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu_{xy}\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{yz}\sigma_z}{E_z}, \varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}} \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_{xz}\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{yz}\sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z}, \varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}} \end{aligned} \quad (16)$$

که  $\varepsilon_x$  کرنش در جهت  $x$ ،  $\sigma_x$  تنش در جهت  $x$  و  $\varepsilon_{xy}$  کرنش برشی در صفحه  $xy$  و  $\sigma_{xy}$  تنش برشی در صفحه  $xy$  می‌باشد. مقادیر تنش‌ها از روابط زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E_x}{h} \left( 1 - (\nu_{yz})^2 \frac{E_z}{E_y} \right) \varepsilon_x + \frac{E_y}{h} \left( \nu_{xy} + \nu_{xz}\nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) \varepsilon_y \\ &+ \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz}\nu_{xy}) \varepsilon_z \\ \sigma_y &= \frac{E_y}{h} \left( \nu_{xy} + \nu_{xz}\nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) \varepsilon_x + \frac{E_y}{h} \left( 1 - (\nu_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} \right) \varepsilon_y \\ &+ \frac{E_z}{h} (\nu_{yz} + \nu_{xz}\nu_{xy}) \varepsilon_z \\ \sigma_z &= \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz}\nu_{xy}) \varepsilon_x + \frac{E_z}{h} (\nu_{yz} + \nu_{xz}\nu_{xy} \frac{E_y}{E_x}) \varepsilon_y \\ &+ \frac{E_z}{h} \left( 1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} \right) \varepsilon_z \\ \sigma_{xy} &= G_{xy} \varepsilon_{xy}, \sigma_{yz} = G_{yz} \varepsilon_{yz}, \sigma_{xz} = G_{xz} \varepsilon_{xz} \end{aligned} \quad (17)$$

که مقدار  $h$  به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} h &= 1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} - (\nu_{yz})^2 \frac{E_z}{E_y} - (\nu_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} \\ &- 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{xz} \frac{E_z}{E_x} \end{aligned} \quad (18)$$

### 2-3- افت فشار جریان ناشی از پایه‌های ضربدری نگهدارنده برج و لوورها

لوورها و پایه‌های ضربدری برج خنک‌کن در افت فشار هوای عبوری از مبدل‌ها نقش دارند. برای جایگزینی اثرات آن‌ها از یک سطح نازک استفاده شده است. افت فشار این سطح متناسب با هد دینامیکی سیال فرض می‌شود که ضریب افت آن را باید از داده‌های تجربی جایگزین کرد. افت فشار در چنین سطحی برابر است با:

$$C_p(\theta) = 1 - 2.6 \left( \sin \frac{90}{76} \theta \right)^{2.085}, 0^\circ \leq \theta \leq 76^\circ \quad (2)$$

$$C_p(\theta) = -1.6 + 1.1 \left( \sin \left( \frac{90}{28} (\theta - 76) \right) \right)^{2.395}, 76^\circ \leq \theta \leq 104^\circ \quad (3)$$

$$C_p(\theta) = -0.5, 104^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad (4)$$

### 2-2- مدل ریاضی مسأله

در این بخش به بررسی معادلات حاکم بر جریان سیال و جامد می‌پردازیم.

#### 2-2-2-1- معادلات حاکم بر محیط سیال

معادلات حاکم بر جریان باد در سرعت‌های معمول در مجاور سطح زمین، معادله پیوستگی و معادلات مومنوم سیال تراکم‌ناپذیر هستند. مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  یکی از مدل‌های معتبر در شبیه‌سازی‌های جریان بوده که دارای کاربرد وسیعی می‌باشد. مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  براساس مدل‌سازی معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و نرخ اتلاف آن ( $\varepsilon$ ) بنا شده است. کارهای انجام شده در زمینه شبیه‌سازی اثرات باد بر برج خنک‌کن و بررسی‌های مشابه همگی از این مدل در مدل‌سازی استفاده کرده‌اند [15-16]. در کار حاضر نیز مدل آشفتگی مورد استفاده، مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  می‌باشد. شکل کلی این معادله برای سیال تراکم‌ناپذیر به صورت زیر می‌باشد [11]:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = 0, (i, j = 1, 2, 3) \quad (5)$$

معادله بقای مومنوم توسط رابطه زیر توصیف می‌شود.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial (v_j v_i)}{\partial x_j} = -g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu_e \left( \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} \right) \quad (6)$$

در روابط،  $\mu_e$  لزجت مؤثر است که برابر با مجموع لزجت دینامیکی و لزجت ناشی از تأثیر آشفتگی ( $\mu_t$ ) جریان است.

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (7)$$

در جریان آشفته، نوسانات سرعت لحظه‌ای سیال، حول سرعت متوسط آن در هر نقطه از میدان رخ می‌دهد. بنابراین در سیال آشفته می‌توان فرض کرد که اجزای سرعت از دو بخش سرعت لحظه‌ای و سرعت متوسط تشکیل شده‌اند.

$$v_i = \bar{v}_i + v_i' \quad (8)$$

بنابراین حل مسئله آشفتگی به نحوه محاسبه لزجت ناشی از تأثیر آشفتگی جریان و اعمال آن در معادلات حاکم بر سیال بستگی دارد. برای مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  مقدار لزجت آشفتگی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\mu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, (c_\mu = 0.09) \quad (9)$$

در رابطه بالا  $k$  انرژی جنبشی آشفته و  $\varepsilon$  میزان افت انرژی جنبشی جریان آشفته می‌باشند که از معادلات زیر به دست می‌آیند.

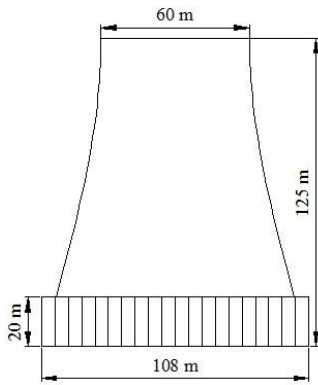
$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (v_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \varphi - \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (v_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \varphi - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

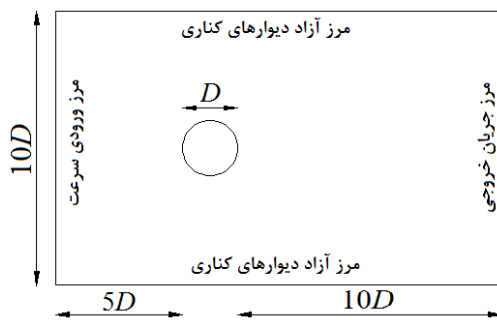
که در معادلات بالا تابع  $\varphi$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_k}, i = 1, 2, 3, k = 1, 2, 3 \quad (12)$$

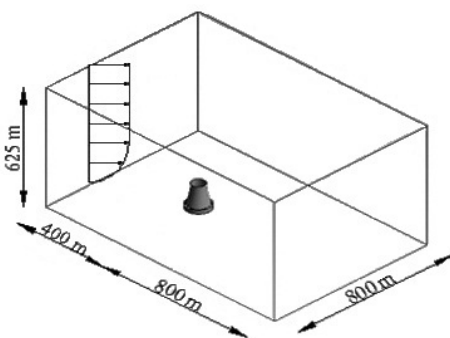
در مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  ضرایب ثابت به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [11]:



شکل 1 ابعاد برج خنک‌کن



شکل 2 ابعاد میدان حل سیال



شکل 3 ابعاد فضای محاسباتی حل سیال

برای این منظور یک مرز پرتراکم<sup>1</sup> روی دیواره‌های هندسه برج ساخته شده، مفهوم این کار افزایش چگالی شبکه در نزدیک دیواره‌ها می‌باشد. افزایش تدریجی تعداد المان‌ها در محیط پیرامونی بدنه برج، تا جایی که نتایج حل مدل به تعداد المان‌ها بستگی نداشته باشد، ادامه یافت. با توجه به شکل 4، با افزایش تعداد المان‌های برج خنک‌کن تغییرات میزان دبی خروجی آن نیز محاسبه شده و در حالتی که تعداد 228000 المان در شبکه‌بندی برج به کار رفته، می‌توان گفت نتایج حل مستقل از تعداد المان‌ها می‌باشد. در شبکه‌بندی میدان سیال از المان‌های هرمی چهاروجهی<sup>2</sup> و المان‌های گوه‌ای<sup>3</sup> استفاده شده است. در شکل 5 شبکه‌بندی برج خنک‌کن نشان داده شده است.

### 3- صحت‌سنجی نتایج حاصل از حل عددی سیال

آیین‌نامه VGB کشور آلمان برای محاسبه مقادیر فشار اطراف برج‌های خنک‌کن با توجه به شرایط منطقه‌ای و مشخصات هندسی آن‌ها روابطی را پیشنهاد داده است. در کار صورت گرفته توسط گودرز و صباغ یزدی [16]

$$\Delta p = K_L \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (19)$$

در رابطه فوق  $\rho$  چگالی سیال،  $v$  سرعت عمود جریان هوا در هنگام عبور از صفحه و  $K_L$  ضریب افت بی‌بعد است. مطابق رابطه که توسط شرکت EGI ارائه شده است [13] ضریب افت فشار  $K_L$  برحسب سرعت هوای ورودی به صورت زیر می‌باشد.

$$K_L = 13.03v^{-0.24} + 0.436 \quad (20)$$

### 4-2- مشخصات برج خنک‌کن و فضای محاسباتی

هندسه مدل مورد استفاده یک برج خنک‌کن خشک واقعی (هالر) در مقیاس صنعتی می‌باشد که با ابعاد شکل 1 در نظر گرفته شده است. قطر متوسط برج 80 متر می‌باشد [14]:

در مدل‌سازی سیال، امکان در نظر گرفتن همه محیط سیال وجود ندارد و به طور معمول فقط قسمتی از فضای اطراف سازه در نظر گرفته می‌شود. فضای محاسباتی در کار حاضر براساس کارهای انجام شده گذشته [16] و به صورت تجربی، در بالادست جریان 5 برابر قطر متوسط برج، در پایین‌دست جریان 10 برابر قطر متوسط برج، فاصله برج از دیواره‌ها 5 برابر قطر متوسط برج و ارتفاع این فضا 5 برابر ارتفاع کل برج می‌باشد که در شکل‌های 2 و 3 نشان داده شده است.

### 5-2- شرایط مرزی محیط سیال

مطابق آیین‌نامه VGB، کشور آلمان به چهار ناحیه با توجه به شرایط آب و هوایی و الگوهای بارشی تقسیم می‌شود و پروفیل سرعت تند باد در این چهار ناحیه تعیین شده است. با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی و منطقه‌ای کشورمان، پروفیل سرعت به صورت رابطه 21 فرض شده است که در محل مرز ورودی، در مدل اعمال می‌شود [10]:

$$V_z = 41.2 \left( \frac{z}{10} \right)^{0.11} \quad (21)$$

در این رابطه  $z$  ارتفاع نقطه‌ای است که سرعت در آن محاسبه می‌شود. برای محاسبه عدد رینولدز، مقدار متوسط سرعت در ارتفاع 10 متری به عنوان

سرعت مبنا مورد استفاده قرار گرفته است  $V = 41.2 \frac{m}{s}$ :

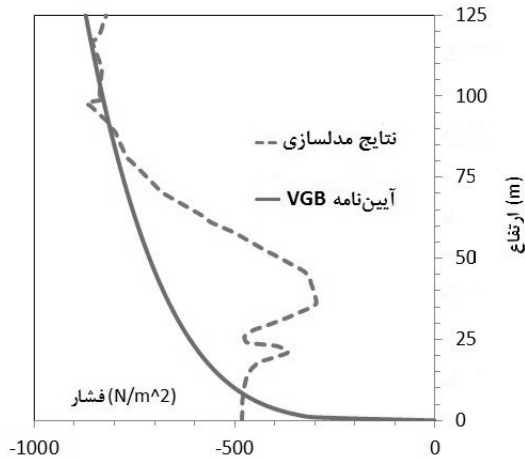
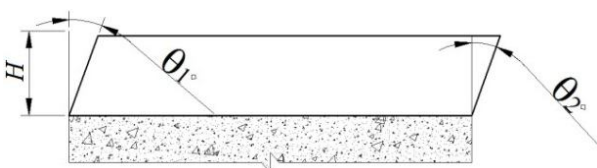
$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1.205 \frac{kg}{m^3} \times 41.2 \frac{m}{s} \times 80}{1.8 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}} \quad (22)$$

در رابطه 22،  $\rho$  جرم مخصوص سیال (هوا)،  $L$  قطر متوسط برج خنک‌کن و  $\mu$  لزجت سینماتیک سیال می‌باشند. مقدار به دست آمده برای عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ است که بتوان جریان را آشفتنه فرض کرد. در محل خروجی به عنوان شرط مرزی دور دست جریان، فشار نسبی برابر صفر اعمال شده است. روی بدنه برج و کف زمین تمام مؤلفه‌های سرعت برابر صفر در نظر گرفته شده است (مرز بدون لغزش). اما در دیواره‌های کناری و بالای حوزه حل، برای در نظر گرفتن شرایط طبیعی جریان، مؤلفه‌های سرعت در مرز دارای حرکت آزاد (مرز آزاد) می‌باشند.

### 6-2- شبکه بندی محیط حل سیال

محیط حل در کلیه مدل‌ها با بیش از  $1/200/000$  عدد المان شبکه‌بندی شده است. به این ترتیب، در اطراف محل ورودی و دهانه بالایی برج و با نزدیک شدن به دیواره‌های برج که تغییرات متغیرهای حل سریع است، از تعداد المان‌های بیشتری بهره‌گیری شده است.

1- Inflate  
2- Tetrahedra  
3- Wedge

شکل 7 فشار روی بدنه برج در وجه رو به باد ( $\theta=180$ )

شکل 8 زوایای حلقه الاستیک در بالای برج

دلایل تغییرات فشار در ارتفاع برج، ناشی از در نظر گرفتن هندسه سه بعدی و هیپربولیک برج است. و اختلاف‌های مشاهده شده در ارتفاعات مختلف نیز به دلیل کاهش قطر برج در محل گلوگاه و افزایش قطر برج در ارتفاعات کمتر و با نزدیک شدن به محل پایه‌های برج است [16].

#### 4- آزمون‌های عددی جهت تعیین مشخصات هندسی تجهیزات

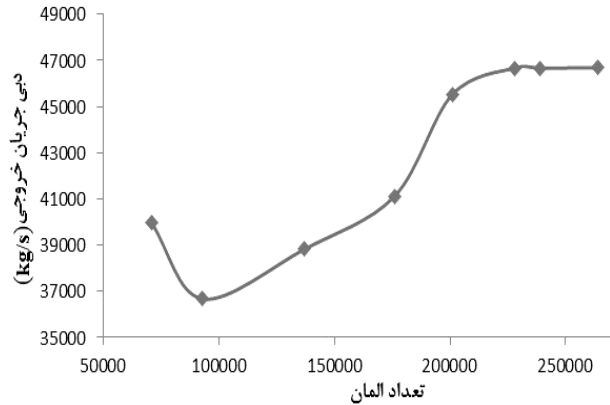
##### تاج برج

حلقه الاستیک در حالات و شرایط هندسی مختلف بر روی دهانه خروجی برج خنک کن مدل گردیده است. ارتفاع حلقه الاستیک (H) به صورت نسبتی از ارتفاع کلی برج به طور دلخواه در اندازه‌های، 5 و 10 درصد (6/25 و 12/5 متر) در نظر گرفته شده است. زوایای وجه‌های رو به باد ( $\theta_1$ ) و پشت به باد ( $\theta_2$ ) حلقه الاستیک در شکل 8 نشان داده شده است. زاویه بین لبه حلقه الاستیک نسبت به راستای قائم می‌باشد).

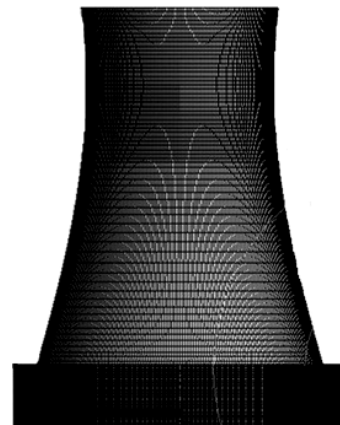
در حالت اول برای یافتن زاویه مناسب برای وجه رو به باد ( $\theta_1$ ) فرض شده است که هر دو وجه در حلقه الاستیک با زوایای مساوی ( $\theta_1=\theta_2$ ) در مقابل جریان باد دچار تغییر شکل می‌شوند و دبی جریان هوای خروجی از دهانه بالایی برج در این حالات اندازه‌گیری شده است. درصد افزایش دبی نسبت به شرایط حلقه الاستیک بدون تغییر زاویه ( $\theta_1=\theta_2=0$ ) محاسبه شده است و در جداول 1 و 2 برای دو حلقه نشان داده شده است.

جدول 1 میزان دبی خروجی برای حلقه الاستیک با 5 درصد ارتفاع برج با زوایای

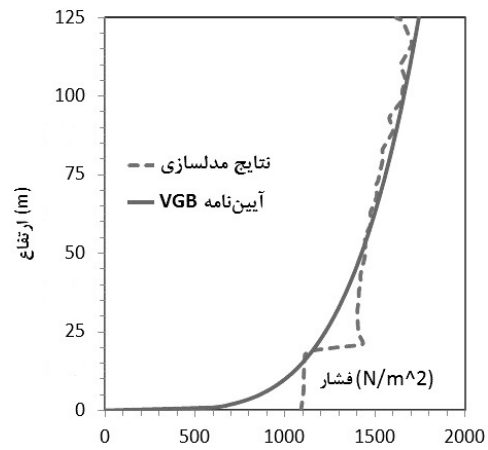
مساوی در دو وجه		
$\theta_1-\theta_2$	دبی جریان خروجی (kg/s)	درصد افزایش دبی
0-0	48061/0	-
10-10	48366/0	0/63
15-15	48922/5	1/8
20-20	49244/2	2/46
25-25	49498/0	3/0
30-30	49406/9	2/8
35-35	49325/3	2/63



شکل 4 تغییرات میزان دبی خروجی از برج خنک کن با افزایش تعداد المان‌های آن



شکل 5 شبکه بندی برج خنک کن نمونه

شکل 6 فشار روی بدنه برج در وجه رو به باد ( $\theta=0$ )

برای مدل‌سازی برج خنک کن نیروگاه کازرون نیز از این آیین‌نامه استفاده شده است.

برای بررسی درستی عملکرد مدل عددی، تغییرات فشار در ترازهای ارتفاعی مختلف برج حاصل از حل عددی برج خنک کن با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه VGB آلمان مقایسه شده است. نمودارهای زیر فشار بر روی بدنه برج خنک کن در وجه رو به باد ( $\theta=0$ ) و نیز در وجه پشت به باد ( $\theta=180$ ) را نشان می‌دهند.

با مقایسه نتایج حاصل از حل و مقادیر آیین‌نامه مشاهده می‌شود، مقادیر کار حاضر در وجه رو به باد به مقادیر آیین‌نامه VGB بسیار نزدیک می‌باشد و در وجه پشت به باد در تراز میانی دارای انطباق نسبتاً خوبی با مقادیر آیین‌نامه می‌باشد.

ارتفاع 10 درصد ارتفاع برج در زاویه 20 درجه کم‌ترین انسداد رخ می‌دهد. در حالت دوم برای یافتن زاویه مناسب برای وجه پشت به باد ( $\theta_2$ )، زاویه در وجه رو به باد ( $\theta_1$ ) را ثابت نگاه داشته و زاویه در وجه پشت به باد را افزایش می‌یابد. این کار سبب کج شدن حلقه الاستیک در دهانه خروجی برج می‌شود. با توجه به اختلاف زاویه وجه رو به باد و پشت به باد سطح مقطع بالای حلقه الاستیک از حالت دایره خارج شده و به شکل بیضی در می‌آید. در مدل‌سازی محیط این بیضی با محیط دایروی دهانه برج برابر در نظر گرفته شده است. جداول 3 و 4 نتایج به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول 3 مشاهده می‌شود در وضعیت حلقه الاستیک با ارتفاع 5 درصد ارتفاع کلی برج (6/25 متر)، بهترین زاویه برای وجه پشت به باد 65 درجه می‌باشد. که میزان افزایش دبی خروجی جریان هوا در این حالت 9 درصد می‌باشد. و نیز با توجه به جدول 4 مشاهده می‌شود در وضعیت حلقه الاستیک با ارتفاع 10 درصد ارتفاع کلی برج (12/5 متر)، بهترین زاویه برای وجه پشت به باد 60 درجه می‌باشد. که میزان افزایش دبی خروجی جریان هوا در این حالت 12/6 درصد می‌باشد. این میزان افزایش دبی جریان هوا، مقدار قابل ملاحظه‌ای است و از لحاظ عملکردی تأثیر شایانی بر خروج هوا از دهانه برج دارد. در شکل 9 تأثیر حلقه الاستیک بر توزیع خطوط جریان در اطراف و درون برج خنک‌کن، نمایان است.

در ادامه میزان دبی خروجی برای حلقه الاستیک با ارتفاع 5 درصد و 10 درصد ارتفاع برج و به ترتیب زوایای برای وجه رو به باد 25 و 20 درجه و برای وجه پشت به باد 65 و 60 درجه در سرعت‌های مختلف در تراز 10 متری سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته و در جداول 5 و 6 نشان داده شده است. در تمام سرعت‌ها میزان دبی خروجی از دهانه برج بیشتر از حالت مینا می‌باشد و درصد افزایش دبی جریان هوای خروجی از دهانه برج برای تمام سرعت‌ها به مقدار به‌دست آمده از پروفیل سرعت آیین‌نامه VGB یعنی سرعت 41/2 (متر بر ثانیه) بسیار نزدیک می‌باشد. در جداول زیر حالت مینا وضعیتی است که حلقه الاستیک واقع بر دهانه برج دچار تغییر شکل (تغییر در زاویه) نشده و به‌صورت قائم قرار دارد.

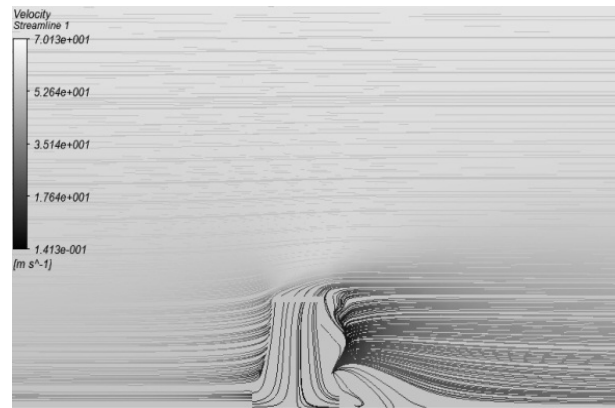
با توجه به نتایج به‌دست آمده در سرعت‌های مختلف می‌توان گفت، حلقه الاستیک همواره باعث افزایش دبی خروجی از دهانه برج می‌شود.

#### جدول 5 میزان دبی خروجی برای حلقه الاستیک با 5 درصد ارتفاع برج در

سرعت‌های مختلف باد			
سرعت وزش باد (m/s)	دبی جریان خروجی در حالت مینا (kg/s)	دبی جریان خروجی با حلقه الاستیک (kg/s)	درصد افزایش دبی
3	3499/87	3803/86	8/69
5	5833/27	6344/85	8/77
10	11666/9	12711/8	8/95
41/2	48061	52361/2	9

#### جدول 6 میزان دبی خروجی برای حلقه الاستیک با 10 درصد ارتفاع برج در

سرعت‌های مختلف باد			
سرعت وزش باد (m/s)	دبی جریان خروجی در حالت مینا (kg/s)	دبی جریان خروجی با حلقه الاستیک (kg/s)	درصد افزایش دبی
3	3539/85	3972/77	12/23
5	5904/13	6635/06	12/38
10	11783/27	13257/36	12/51
41/2	48479/3	54578/2	12/6



شکل 9 خطوط جریان در داخل و اطراف برج

#### جدول 2 میزان دبی خروجی برای حلقه الاستیک با 10 درصد ارتفاع برج با زوایای

مساوی در دو وجه		
$\theta_1 - \theta_2$	دبی جریان خروجی (kg/s)	درصد افزایش دبی
0 - 0	48479/3	-
10 - 10	49351/4	1/8
15 - 15	49528/0	2/17
20 - 20	49692/0	2/5
25 - 25	49592/0	2/3
30 - 30	49540/9	2/19

#### جدول 3 میزان دبی خروجی برای حلقه الاستیک با 5 درصد ارتفاع برج با افزایش

زاویه حلقه در وجه پشت به باد		
$\theta_1 - \theta_2$	دبی جریان خروجی (kg/s)	درصد افزایش دبی
25 - 30	50157/0	4/36
25 - 35	50782/0	5/66
25 - 40	50946/0	6/0
25 - 45	51350/0	6/85
25 - 50	51896/0	8/0
25 - 55	52094/3	8/4
25 - 60	52292/6	8/8
25 - 65	52361/2	9/0
25 - 70	52285/0	8/79
25 - 75	52074/1	8/35

#### جدول 4 میزان دبی خروجی برای حلقه الاستیک با 10 درصد ارتفاع برج با افزایش

زاویه حلقه در وجه پشت به باد		
$\theta_1 - \theta_2$	دبی جریان خروجی (kg/s)	درصد افزایش دبی
20 - 25	50278/3	3/7
20 - 30	50661/1	4/5
20 - 35	51526/0	6/3
20 - 40	52273/5	7/83
20 - 45	52958/5	9/24
20 - 50	54040/3	11/5
20 - 55	54313/8	12/0
20 - 60	54578/2	12/6
20 - 65	54258/6	11/9
20 - 70	53860/5	11/1

مشاهده می‌شود در وضعیت حلقه با ارتفاع 5 درصد ارتفاع برج در زاویه 25 درجه بیشترین دبی هوا از دهانه برج خارج می‌شود و نیز در حالت حلقه با

میزان دبی خروجی از دهانه برج در حالت بدون حلقه الاستیک برابر  $46671/2$  (کیلوگرم بر ثانیه) می‌باشد. با مقایسه این مقدار با شرایط وجود حلقه الاستیک بدون تغییر زاویه ( $\theta_1 = \theta_2 = 0$ ) در بالای برج در حالت‌های حلقه الاستیک با 5 و 10 درصد ارتفاع برج به ترتیب 3 و  $3/9$  درصد دبی خروجی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که تنها نصب حلقه الاستیک بر دهانه برج نیز باعث افزایش دبی جریان خروجی و بهبود عملکرد برج خنک‌کن می‌شود.

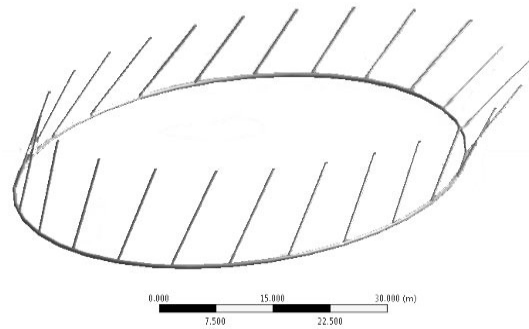
### 5- طراحی ساختار سازه‌ای حلقه الاستیک

برای طراحی سازه‌ای حلقه الاستیک، ابتدا باید ساختمانی مناسب برای حلقه الاستیک در نظر گرفته شود. برای این ساختار دو بخش پیش‌بینی شده است. یکی شامل شبکه فلزی و دیگری بخش لاستیکی می‌باشد. در تلفیق این دو بخش نکته اساسی این می‌باشد که شبکه فلزی دارای انعطاف پذیری مناسب باشد. برای تحقق این امر از فنرهای پیچشی در این شبکه فلزی استفاده شده است. شبکه فلزی که از تعدادی عنصر فلزی قائم به شکل لوله تشکیل شده که در قسمت پایینی خود به حلقه‌ای فلزی (رینگ تکیه‌گاهی) متصل می‌شوند. در محل اتصال لوله‌های قائم از فنرهای پیچشی استفاده می‌شود. این فنرهای پیچشی توانایی لازم برای حرکت لوله‌های قائم را تأمین می‌نمایند. با توجه به حرکت لوله‌های قائم در جهت‌های داخل و خارج برج، فنرهای پیچشی دارای سختی متفاوت نسبت به چرخش به داخل و خارج برج می‌باشند. با توجه به تقارن محوری حلقه الاستیک، مقادیر سختی پیچشی برای کل عناصر لوله‌ای قائم یکسان می‌باشد. شبکه فلزی نقش هدایت حلقه الاستیک جهت رسیدن به شکل موردنظر را تحت اثر اختلاف فشار داخل و خارج برج ایفا می‌کند و نیز باعث استحکام و حفظ شکل اولیه حلقه الاستیک می‌شود. لوله‌های فلزی که در این شبکه فلزی استفاده می‌شوند براساس میزان فشار وارده به حلقه طراحی می‌شوند. نیروی ناشی از فشار باد که به حلقه وارد می‌شود بر روی شبکه لوله‌ها توزیع می‌شود. هرچه تعداد لوله‌ها بیشتر باشد، مقدار نیرو قابل توزیع در آن‌ها کمتر خواهد بود و در نتیجه قطر لوله‌های مورد استفاده کوچک‌تر می‌شود. در شکل 10 طرحواره شبکه لوله‌های فلزی قائم متصل به رینگ تکیه‌گاهی نشان داده شده است.

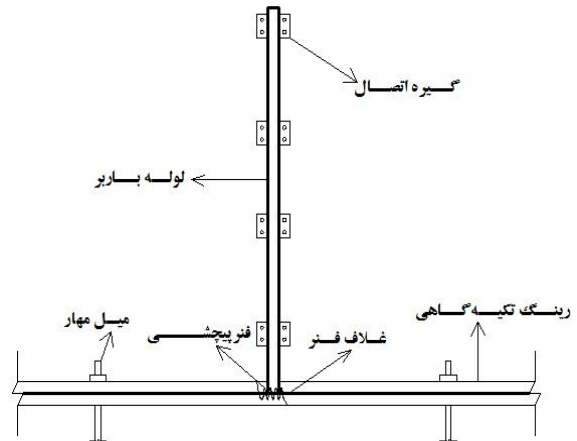
لوله‌های قائم در جهت مماس بر دایره نیز دارای حرکت می‌باشند که برای آن‌ها علاوه بر فنر پیچشی از فنرهایی برای تأمین سختی مماسی نیز استفاده می‌شود. بخش دیگر حلقه الاستیک شامل صفحاتی از جنس لاستیک می‌باشد، که بین لوله‌های قائم قرار می‌گیرند. این صفحات لاستیکی باید به نحو مناسبی به شبکه فلزی متصل شوند. صفحات لاستیکی باید خاصیت ارتجاعی کافی برای تغییر شکل‌های وارده را دارا باشند. حلقه فلزی (رینگ تکیه‌گاهی) باید به دهانه بالایی برج متصل شود. این رینگ تکیه‌گاهی باید به‌نحوی به دهانه برج متصل شود تا تمام نیروهای وارده بر حلقه الاستیک به برج خنک‌کن و در نهایت از برج به زمین منتقل شوند. برای همین منظور میل مهارهایی برای ایجاد اتصال مناسب به‌صورت تکیه‌گاه ثابت بر روی حلقه الاستیک در نظر گرفته شده است. شکل 11 جزئیات اتصالات شبکه فلزی را نشان می‌دهد.

### 5-1- مدل‌سازی سازه‌ای حلقه الاستیک

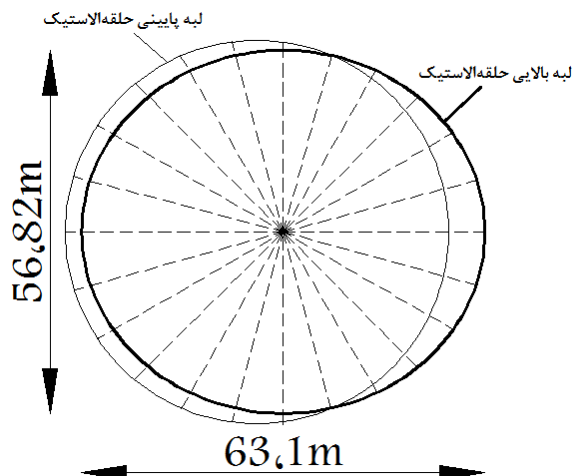
برای مدل‌سازی با توجه به کوچکی و اجرایی‌تر بودن، حلقه الاستیک با ارتفاع  $6/25$  متر (5 درصد ارتفاع برج) مورد مدل‌سازی قرار گرفته است. شکل 12 نحوه تغییر شکل لوله‌های قائم نسبت به لبه‌های حلقه‌الاستیک با ارتفاع  $6/25$  متر را نشان می‌دهد.



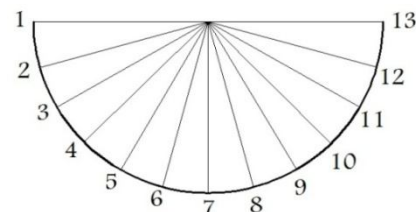
شکل 10 شبکه لوله‌های فلزی قائم متصل به رینگ تکیه‌گاهی



شکل 11 جزئیات اتصالات شبکه فلزی



شکل 12 نحوه تغییر شکل لوله‌های قائم نسبت به لبه‌های حلقه‌الاستیک



شکل 13 مقاطع در نظر گرفته شده در حلقه

دلیل این امر را می‌توان این دانست که با نصب حلقه الاستیک ارتفاع کلی برج افزایش یافته و باعث بهبود جریان طبیعی هوا درون برج می‌شود و کج شدن دهانه خروجی برج در مقابل باد نیز در بهبود جریان خروجی از دهانه برج تأثیرگذار می‌باشد.

شبکه فلزی و عناصر لوله‌ای از المان جامد<sup>2</sup> موجود در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است.

برای مدل‌سازی صفحات لاستیکی، به دلیل اینکه باید انعطاف‌پذیری کافی برای رسیدن به تغییر شکل‌های بزرگ را داشته باشد، صفحات لاستیکی از جنس پلیمر EPDM<sup>3</sup> و برای مدل‌سازی شبکه فلزی (عناصر لوله‌ای) نیز از فولاد صنعتی موجود در بازار از جنس فولاد (St.37) استفاده شده است. برای اینکه فشارهای وارده بر صفحات لاستیکی به صورت مناسب به لوله‌های فلزی قائم منتقل شود، اتصال میان صفحات لاستیکی و لوله‌های قائم به صورت ثابت<sup>4</sup> در نظر گرفته شده است. برای قسمت‌های پایین صفحات لاستیکی و لوله‌های فلزی قائم از تکیه‌گاه گیردار استفاده شده است. کلیه درجات آزادی در این مرز بسته می‌باشد.

## 5-2- نتایج حاصل از مدل‌سازی سازه‌ای

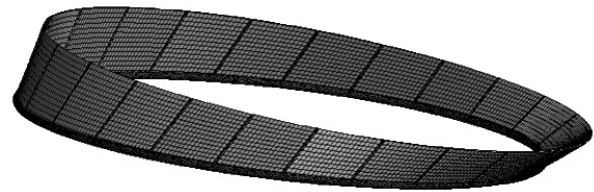
در این مدل‌سازی حلقه لاستیک با عناصر لوله‌ای با شکل هندسه مورد نظر مورد بارگذاری قرار گرفت. در این حل برای عناصر لوله‌ای از لوله به قطر 20 سانتی‌متر و ضخامت 2 سانتی‌متر استفاده شد. و برای رینگ تکیه‌گاهی از لوله به قطر 30 سانتی‌متر و ضخامت 2 سانتی‌متر استفاده شد. همچنین برای صفحات لاستیکی از مصالح لاستیکی به ضخامت 7/5 سانتی‌متر استفاده شد. در شکل‌های 15 و 16 کانتورهای تنش و کرنش را مشاهده می‌کنیم.

نیروی وزن ناشی از تجهیزات شامل شبکه فلزی و صفحات لاستیکی که به دهانه برج اعمال می‌شود برابر 52/94 تن می‌باشد. در 13 لوله قائم در نظر گرفته شده که نیمه‌ای از تقارن حلقه لاستیک می‌باشد. لوله‌های 1، 2، 3، 4، 5، 6 و 7 به سمت داخل دهانه خم می‌شوند. لوله 8 در حالت تقریباً بدون خم‌شدگی بوده و لوله‌های 9، 10، 11، 12 و 13 به سمت خارج دهانه برج خم می‌شوند. جداول 7 و 8 زاویه خم و سختی پیچشی این لوله‌ها را نشان می‌دهند.

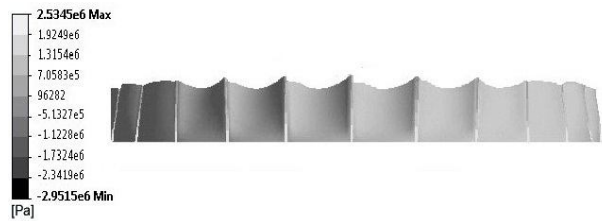
به دلیل تقارن محوری که برای حلقه لاستیک در نظر گرفته شده، یک فنر مشخص برای کل عناصر لوله‌ای در نظر گرفته می‌شود. بنابراین باید مقدار سختی مناسبی برای فنر پیچشی به دست آید. برای یافتن سختی مناسب عناصر لوله‌ای برای خم شدن به داخل و خارج برج، کمترین، بیشترین و مقدار میانی سختی را برای عناصر لوله‌ای در نظر گرفته سپس آن‌ها را به مجموعه عناصر لوله‌ای قائم اعمال می‌کنیم. در ادامه اختلاف زاویه آن‌ها را نسبت به حالت اولیه به دست می‌آوریم.

جدول 9 عناصر لوله‌ای و سختی فنرهای مماسی برای آن‌ها.

شماره لوله	زاویه خم شدن نسبت به راستای قائم (درجه)	سختی پیچشی (تن بر رادیان)
2	1/1	5/26
3	2/7	7/45
4	4/5	7/64
5	6/2	7/87
6	9	7
7	11	7/29
8	9/5	6/63
9	7/6	6/39
10	5/9	5/93
11	3/8	5/4
12	1/9	3/4



شکل 14 شبکه‌بندی حلقه الاستیک و عناصر لوله‌ای



شکل 15 کانتور تنش در حلقه الاستیک دید از سمت رو به باد



شکل 16 کانتور کرنش در حلقه الاستیک

جدول 7 عناصر لوله‌ای و سختی پیچشی رو به داخل دهانه برج برای آن‌ها

شماره لوله	زاویه خم شدن نسبت به راستای قائم (درجه)	سختی پیچشی (تن بر رادیان)
1	25	1/742
2	23/28	1/821
3	24/54	1/4
4	25/12	0/912
5	23/75	0/579
6	19/56	0/352
7	11/75	0/293

جدول 8 عناصر لوله‌ای و سختی پیچشی رو به خارج دهانه برج برای آن‌ها

شماره لوله	زاویه خم شدن نسبت به راستای قائم (درجه)	سختی پیچشی (تن بر رادیان)
9	12/95	0/531
10	24/89	0/552
11	34/83	0/724
12	40/35	0/909
13	65	0/635

در این مدل‌سازی از 24 عنصر لوله‌ای برای حلقه لاستیک استفاده شده است. بارهای موجود در حل سیالاتی حلقه لاستیک در سه تراز ارتفاعی، بالا، وسط و پایین و در 24 مقطع در داخل و خارج حلقه قرائت شده و در ارتفاع و پیرامون حلقه به آن اعمال شده است. با توجه به تقارن موجود در بارگذاری، بارها در 13 مقطع مطابق شکل 13 به حلقه لاستیک اعمال می‌شوند. برای شبکه‌بندی حلقه لاستیک از المان پوسته‌ای<sup>1</sup> و در المان‌بندی

2- Solid187

3- Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber

4- Fixed contact

1- Shell181



دهانه بالایی برج می‌توان مقدار بهینه آن را به‌دست آورد.

## 7- مراجع

- [1] A. F. Du Preez, D. G. Kroger, Effect of wind performance a dry cooling tower, *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 13, No. 2, pp. 139-146, 1993.
- [2] N. Kapas, Behavior of Natural Draught Cooling Towers in Wind, CMFF 03, Budapest, Hungary, 2003.
- [3] R. Al- Waked, M. Behnia, The performance of natural draft dry cooling towers under crosswind: CFD study, *Int. Energy Res.*, Vol. 28, pp. 147-161, 2004.
- [4] G. Amur, G. Miltonx, J. Reizes, J. Madadnia, S. Beecham, P. Brady, H. Koosha, Role of plant buildings in a power station acting as barrier to the wind affecting the natural draft cooling tower performance, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, Sydney, 2004.
- [5] J. Madad-Nia, H. Koosha, M. Mirzaei, Effect of wind break walls on performance of a cooling tower model, *Mech. & Aerospace Eng*, Vol. 3, No. 4, pp. 61-67, 2008. (In Persian)
- [6] M. H. Kayhani, R. Mohebbi, A. Abbasnejad, Numerical and experimental investigation of wind break walls' effect on the natural draft dry cooling tower's performance under wind condition, *Mech. & Aerospace Eng.*, Vol. 4, No. 4, pp. 71-78, 2009. (In Persian)
- [7] M. H. Kayhani, A. Molavi, Experimental investigation of wind break walls' effect on top of the natural draft dry cooling towers, *Conference on Thermal Power Plants*, Technical Faculty of Tehran University, 2009. (In Persian)
- [8] A. Farazmandnia, A Proposed to increase the efficiency of dry cooling towers, *International Conference on Chiller and Cooling Tower*, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)
- [9] M. Goodarzi, A proposed stack configuration for dry cooling tower to improve cooling efficiency under crosswind, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, pp. 858-863, 2010.
- [10] VGB Guideline, Structural Design of Cooling Towers, Essen, Germany, 2005.
- [11] ANSYS CFX, Solver Modeling Guide.
- [12] ANSYS, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Application.
- [13] EGI, Report, Thermo Technical and Aerodynamic Design/ Calculation/ Characteristics of the Dry Cooling Plant System Heater, Vol. A, Budapest Institute of Engineering, 1985.
- [14] Z. Zhai, S. Fu, Improving cooling efficiency of dry-cooling towers under cross wind conditions by using wind-break methods, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1008, 2006.
- [15] M. A. Goudarzi, S. R. Sabbagh-Yazdi, Modeling wind ribs effect for numerical simulation external pressure load on a cooling tower of kazerun power plant, *Wind and Structure*, Vol. 11, pp. 479-496, 2008.
- [16] M. A. Goudarzi, S. R. Sabbagh-Yazdi, Effect of turbulent modeling on computed wind pressure load over cooling towers with base structures and comparison with VGB code, *Civil Engineering Infrastructures*, Vol. 44, pp. 225-236, 2010. (In Persian)

سختی مناسب در وضعیتی حاصل می‌شود که اختلاف زاویای به‌دست آمده در کمترین مقدار باشد. این مقدار برای سختی پیچشی در جهت رو به داخل برج، مقدار بیشترین سختی پیچشی یعنی 1/821 تن بر رادیان و در جهت رو به خارج برج، مقدار میانی سختی پیچشی یعنی 0/635 تن بر رادیان مناسب می‌باشد. این سختی پیچشی در قسمت تحتانی عناصر لوله‌ای قائم توسط فنرهای پیچشی تأمین می‌شود.

با توجه به فشار باد و تغییر شکل حلقه الاستیک، نیرویی به‌صورت مماس بر دهانه برج به عناصر لوله‌ای قائم وارد می‌شود. این نیرو با سختی فنرهایی که در قسمت پایین عناصر لوله‌ای قائم تعبیه شده تأمین می‌شوند. مقدار این سختی با توجه به نیروهای وارده به مقاطع عناصر لوله‌ای در جدول 9 مشاهده می‌شود.

عناصر لوله‌ای شماره 1 و 13 دارای حرکت مماسی بر دهانه برج نبوده و تنها به‌سمت داخل و خارج برج خم می‌شوند. لذا در جدول 8 مقادیر آن‌ها که صفر می‌باشد، ذکر نشده است. با توجه به روندی که برای یافتن سختی مناسب برای فنرهای پیچشی در نظر گرفته شد، میزان سختی مماسی برای فنرها برابر 7/1 تن بر رادیان می‌باشد.

## 6- نتیجه‌گیری

با توجه به شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته، حلقه الاستیک با ارتفاع 5 درصد ارتفاع برج در هنگام وزش باد، به میزان 9 درصد دبی هوای خروجی از دهانه برج را افزایش می‌دهد، در این حالت میزان کج شدن دهانه حلقه الاستیک نسبت به افق 2/75 درجه می‌باشد. درصد افزایش دبی برای حلقه الاستیک با ارتفاع 10 درصد ارتفاع برج به میزان 12/5 بوده و در این حالت میزان کج شدن دهانه حلقه الاستیک نسبت به افق 4/5 درجه می‌باشد. برای حلقه الاستیک با ارتفاع 5 درصد ارتفاع برج زوایای مناسب برای وجه رو به باد 25 درجه و برای وجه پشت به باد 65 درجه می‌باشد. همین زوایا به‌ترتیب برای حلقه الاستیک با ارتفاع 10 درصد ارتفاع برج 20 و 60 درجه می‌باشند. در هر دو وضعیت برای زوایای موردنظر اختلاف زاویه‌ها برای وجه رو به باد و برای وجه پشت به باد مقداری ثابت و برابر 40 درجه می‌باشد. وزن ناشی از تجهیزات در نظر گرفته شده برای نصب بر روی دهانه بالایی برج برابر 52/94 تن می‌باشد. نیروهای ناشی از فشار باد توسط فنرهای تعبیه شده در حلقه الاستیک تحمل می‌شوند. قسمتی از این نیروها به‌صورت انرژی ذخیره شده در فنرها مستهلک می‌شود و مقدار دیگر آن به‌صورت نیروهای خمشی و برشی از طریق رینگ تکیه‌گاهی به دهانه برج منتقل می‌شود. در ضمن محاسبه دقیق نیروهای وارده به برج نیازمند مدل‌سازی دقیق اندرکنش میان حلقه الاستیک و برج می‌باشد. حلقه الاستیک با توجه به شرایط منطقه‌ای برای مناطق با جریان‌ات خاص باد آن‌ها قابل طراحی می‌باشد. مدل حلقه الاستیک به‌گونه‌ای است که باد در هر جهتی که بوزد، عملکرد انعطاف پذیری این حلقه یکسان خواهد بود. البته زاویه تمایل دهانه خروجی دارای مقدار بهینه‌ای است که با شبیه سازی‌های مکرر و اندازه‌گیری میزان دبی جریان هوای خروجی از