

تحلیل اجزای محدود تأثیر مدل‌سازی آشفته‌گی جریان باد بر برج خنک‌کن دارای سازه پایه در مقایسه با آیین نامه VGB

محمدعلی گودرزی^۱ و سعیدرضا صباغ یزدی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکترا سازه - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۸۶/۵/۳۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۸۸/۷/۲۲، تاریخ تصویب ۸۸/۹/۳)

چکیده

نظر به اهمیت فشار ناشی از جریان آشفته باد در طراحی برج‌های خنک‌کن خشک با مکش طبیعی، در نظر گرفتن جزئیات هندسی برج و اثرات آشفته‌گی در مدلسازی ضروری است. در این مقاله پس از ارزیابی مدل‌های مختلف آشفته‌گی در تحلیل اجزای محدود جریان باد در اطراف یک برج خنک‌کن، اثرات ناشی از در نظر گرفتن هندسه سازه‌های پایه در برآورد فشار باد مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار، ابتدا درستی عملکرد مدل دینامیک سیالات محاسباتی با چندین مدل آشفته‌گی مختلف به کمک اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی موجود، ارزیابی شده و مدل آشفته‌گی مناسب انتخاب می‌شود. سپس این مدل عددی، برای بررسی تغییرات فشار پیرامون یکی از برج‌های خنک‌کن نیروگاه کازرون دارای سازه‌های پایه در اندازه واقعی به کار می‌رود. در مرحله نهایی، تغییرات فشار حاصل از حل اجزای محدود در دو حالت برج خنک‌کن با سازه‌های پایه و بدون سازه‌های پایه با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه VGB آلمان مقایسه شده‌اند. نتایج عددی نشان می‌دهد که منظور نمودن سازه‌های پایه برج خنک‌کن باعث تغییرات توزیع فشار پیرامون برج در وجه پشت به باد می‌شود که این تغییرات بخصوص در ترازهای پایین برج، قابل توجه است.

واژه‌های کلیدی: برج خنک‌کن، مدل‌سازی آشفته‌گی جریان باد، دینامیک سیالات محاسباتی، تحلیل اجزای محدود

مقدمه

از دیدگاه مهندسی عمران، برآورد میدان فشار ناشی از جریان سیال در اطراف سازه‌ها برای طراحی بهینه آنها، یکی از مهم‌ترین اهداف استفاده از تحلیل دینامیکی سیالات است. در چنین تحلیلی اندرکنش مشخصات هندسی و تأثیرات آشفته‌گی جریان، نقش تعیین‌کننده‌ای بر شکل‌گیری بار فشاری بر سازه‌های در معرض باد دارد. در طراحی برج‌های خنک‌کن نیز نیروی باد از جمله نیروهای پراهمیت به شمار می‌رود. این اهمیت به دلیل متغیر بودن فشار ناشی از باد در ارتفاع و محیط پیرامونی برج است. به خصوص برای برج‌های خنک‌کن که ماهیت استوانه‌ای نیز دارند، عملکرد این نیروها پیچیده‌تر است و می‌تواند باعث خرابی‌های غیر منتظره در سازه برج شود. در بررسی پدیده شکل‌گیری جریان باد در اطراف برج‌های خنک‌کن، اثر عوامل مختلف نظیر زبری جداره حاصل از وجود پشت‌بندها^۱ و اثرات اندرکنشی مجموعه برج‌ها و ساختمان‌های جنبی بر یکدیگر باید مورد توجه قرار گیرد. در گذشته مطالعات متعددی درباره این موضوع انجام شده است [۱-۵]. این مطالعات اغلب بر پایه تحقیقات

آزمایشگاهی استوار بوده است. امروزه دینامیک سیالات محاسباتی^۲ به طور وسیعی در تحلیل فرایندهای ایجادشده در لایه پایینی جو، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما بالا بودن هزینه‌های برپایی آزمایش‌ها از یک سو و عدم امکان تعمیم کامل نتایج حاصل از آزمایش به رفتار سازه در ابعاد واقعی از سوی دیگر، باعث شده است که استفاده از روش‌های عددی در کنار روش‌های آزمایشگاهی برای درک نحوه رفتار باد در اطراف سازه‌ها همواره مورد توجه ویژه قرار گیرد. بر این اساس به تازگی استفاده از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی رایانه‌ای جریان باد اطراف سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [۶-۷] از آن جمله، کارهایی توسط نویسندگان این مقاله انجام شده است که در آنها نحوه مدل‌سازی رایانه‌ای، اثرات پشت‌بندهای برج‌های خنک‌کن [۸] و اثرات هم‌جواری آنها [۹] مطالعه شده‌اند. در این تحقیق، ابتدا تأثیر به کارگیری مدل‌های مختلف آشفته‌گی برای برآورد توزیع فشار باد در اطراف برج‌های خنک‌کن توسط تحلیل اجزای محدود مورد توجه قرار

محیط داخلی برج ثابت است و مقدار آن از این رابطه محاسبه می‌شود:

$$W_i = C_p \cdot \lambda \cdot q(H) \quad (۲)$$

در این رابطه، C_p مقداری ثابت و برابر با 0.5 و $q(H)$ مقدار تابع q در ارتفاع H (ارتفاع کامل برج) است. با این توضیح، می‌توان مقادیر فشار پیشنهادی آیین‌نامه را روی بدنه داخلی و خارجی برج محاسبه کرد. 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:

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

$$C_p(\theta) = -1.6 + 1.1 \left(\sin \left(\frac{90}{21} (\theta - 76) \right) \right)^{2.395}, \quad (76 \leq \theta \leq 104)$$

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

(۳)

مراحل استفاده از تحلیل عددی برای مدل‌سازی جریان باد در اطراف سازه‌ها

اغلب مسائل مهندسی در حالت کلی، شامل یک مدل ریاضی هستند که در قالب معادلات دیفرانسیل و با شرایط مرزی و شرایط اولیه خاص روی فیزیک پدیده بیان می‌شوند. معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده از اعمال اصول پایه طبیعی بر یک جزء از محیط مسئله به دست می‌آیند. نرم‌افزارهای موجود برای حل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی، اغلب به یکی از روش‌های گسسته‌سازی به حل این معادلات می‌پردازند. روش‌های المان‌های محدود به عنوان یکی از مشهورترین روش‌های عددی می‌تواند برای آنالیز گسترده وسیعی از مسائل مانند آنالیز تنش‌های سازه‌ای، انتقال حرارت، الکترو مغناطیس و همچنین مطالعه جریان سیال مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. در این تحقیق از تحلیلگر *FLOTRAN* موجود در نرم افزار *ANSYS* برای محاسبه میداین سرعت و فشار در اطراف برج‌های خنک‌کن استفاده شده است [۱۲]. بی شک

گرفته است. سپس با استفاده از مدل آشفتگی بهینه، اثر وجود سازه‌های پایه (که باعث تغییر هندسه برج می‌شود)، در نحوه توزیع فشار باد وارد بر سطوح خارجی و همچنین تغییرات فشار باد محاسبه شده در ارتفاع برج نسبت به مقادیر توصیه‌شده توسط آیین‌نامه *VGB* آلمان بررسی شده است.

برای این کار از تحلیل‌گر سیالاتی موجود در نرم‌افزار *ANSYS* استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای روش اجزای محدود به حل معادلات حاکم بر محیط سیال می‌پردازد. در بخش اول مقاله، روش آیین‌نامه *VGB* آلمان به طور خلاصه ارائه می‌شود. سپس مراحل تحلیل عددی و نحوه برپایی مدل مربوط به آن به طور اختصار تشریح شده و برای اطمینان از درستی مراحل مدل‌سازی، در بخش سوم مقاله نتایج حاصل از به کارگیری مدل‌های متداول آشفتگی موجود در نرم‌افزار با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی روی مدل فیزیکی کوچک مقیاس یک برج خنک‌کن که توسط سایر محققان گزارش شده، مقایسه شده است. در بخش چهارم، یکی از برج‌های نیروگاه کازرون با هندسه و شرایط واقعی آن (شامل سازه‌های پایه) به عنوان نمونه عملی شبیه‌سازی شده و اثر وجود سازه‌های اضافه شده در پایه برج بر تغییر فشار وارد بر ترازهای مختلف سطوح خارجی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

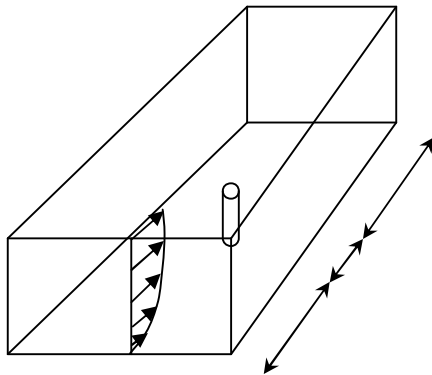
روش آیین‌نامه *VGB* آلمان برای محاسبه نیروی باد بر سازه برج‌های خنک‌کن [۱۰]

این آیین‌نامه، اثر باد را به شکل نیروهای استاتیکی و در قالب دو نیروی مکش داخلی و فشار خارجی 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:

$$W_e(Z, \theta) = C_p(\theta) \cdot q(Z) \cdot \lambda \quad (۱)$$

در این رابطه، θ 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 و تغییرات ارتفاعی فشار را نشان می‌دهد. در این رابطه، λ ضریب افزایشی است که بیانگر اثرات مجاورت برج‌های دیگر است و مقدار آن برای برج تک برابر واحد است. آیین‌نامه درباره فشار منفی ایجاد شده در داخل برج، فرض می‌کند که مقدار این مکش در ارتفاع و

مقاوم گسترده دارند، مفید است و برای افزایش پایداری حل معادلات در جایی که تغییرات عوامل جریان بیشترین مقادیر را داشته باشند، به کار می‌رود. به عبارت دیگر لزجت مصنوعی به روش مشابهی به عنوان لزجت سیال وارد معادلات می‌شود و از رشد ناخواسته نوسانات جلوگیری می‌کند و در نواحی با گرادیان‌های شدید، تغییر عوامل جریان را هموار می‌کند. باید توجه داشت در صورت کمینه‌سازی ضریب لزجت مصنوعی، این عبارت اضافه‌شده در حل‌نهایی اثری ندارد [۱۳]، زیرا لزجت مصنوعی در دیورژانس سرعت ضرب می‌شود و دیورژانس سرعت برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر صفر است. برای جریان‌های تراکم‌پذیر، دیورژانس سرعت صفر نیست و در این حالت لزجت مصنوعی باید به عنوان یک ابزار همگرایی موقتی در نظر گرفته شود و در حل‌نهایی برابر با صفر شود.



شکل ۱: فضای محاسباتی حل جریان دینامیکی سیال.

نحوه مدل‌سازی جریان باد و اثرات آشفستگی

معادلات حاکم بر جریان باد در سرعت‌های معمول در مجاور سطح زمین، معادله پیوستگی و معادلات مومنتم سیال تراکم‌ناپذیر هستند. معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن رابطه تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید. شکل کلی این معادله برای سیال تراکم‌ناپذیر به این شکل است:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

معادلات مومنتم با استفاده از قانون دوم نیوتن به دست می‌آیند. طبق این قانون، برآیند نیروهای وارد بر یک ذره سیال با نرخ تغییر اندازه حرکت ذره سیال برابر است. شکل معادلات ناویر-استوکس برای سیال تراکم‌ناپذیر و

اعمال شرایط مرزی صحیح، مهم‌ترین قسمت در شبیه‌سازی رایانه‌ای جریان هوا در اطراف سازه‌ها است. در مدل‌سازی این پدیده، امکان در نظر گرفتن همه محیط سیال وجود ندارد و به طور معمول فقط قسمتی از فضای اطراف سازه در مدل عددی در نظر گرفته می‌شود. اندازه محیط انتخابی به نوع، خواسته‌ها و دقت مورد نیاز مسئله بستگی دارد. این محیط انتخابی را می‌توان به سه ناحیه شامل ناحیه ورودی، ناحیه خروجی و ناحیه مرکزی تقسیم کرد. به طور معمول سازه‌های اصلی با هندسه واقعی خود و با فاصله مناسب از مرزهای ورودی و خروجی جریان، در ناحیه مرکزی مدل‌سازی می‌شوند (شکل ۱). در مرز ورودی ناحیه حل، پروفیل سرعت جریان به عنوان شرایط مرزی اعمال می‌شود و جریان از مرز ورودی به سمت ناحیه مرکزی که سازه‌ها در آن استقرار یافته، حرکت می‌کند.

ماهیت جریان، تابعی از خصوصیات سیال، هندسه مسئله و اندازه تقریبی میدان سرعت است. اغلب مواقع رژیم جریان با عدد بی‌بعد رینولدز که هم بیانگر اثر هندسه مسئله و هم بیانگر خصوصیات سیال است، به عنوان مبنای تشخیص آشفته یا لایه‌ای بودن جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$R_e = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (4)$$

L طول مبنا است که برای برج‌های خنک‌کن برابر قطر متوسط برج در نظر گرفته می‌شود (قطر در یک سوم پایینی ارتفاع برج) و V بیانگر سرعت متوسط ورودی است. از المان FLUID142 موجود در کتابخانه نرم‌افزار برای المان‌بندی محیط حل استفاده شده است. درباره انتخاب مدل آشفستگی در قسمت بعد توضیح داده شده است.

در محل مرز ورودی، پروفیل سرعت منطبق با روابط موجود و شرایط منطقه، به صورت تابعی از ارتفاع بی‌بعد نسبت به سطح زمین اعمال شده و 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، مؤلفه قائم سرعت بر مرز برابر با صفر (مرز لغزشی) اعمال شده است. برای کمک به همگرایی و پایداری حل، از روش لزجت مصنوعی استفاده شده است. این روش پایداری حل در مسائل تراکم‌ناپذیر و مسائل تراکم‌ناپذیر که نیروی

خاص می‌توان لزجت ناشی از تأثیر آشفتگی جریان (μ_t) را به صورت عددی ثابت در نظر گرفت، اما برای محاسبه آن در حالت کلی، مدل‌هایی توسعه یافته‌اند که لزجت ناشی از تأثیر آشفتگی جریان (μ_t) را متناسب با شرایط کاربرد و عوامل جریان محاسبه می‌کنند. ساده‌ترین مدل موجود در نرم‌افزار مدل صفر معادله‌ای است. در این مدل، لزجت از این رابطه به دست می‌آید:

$$\mu_t = \rho L_s^2 \sqrt{\phi} \quad (11)$$

L_s مقیاس طول است و مقدار پیش فرض آن برای نرم‌افزار برابر ۰/۰۱ است و ϕ عبارت تولید آشفتگی جریان است و مقدار آن برابر است با:

$$\phi = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad (12)$$

سایر مدل‌های موجود در نرم‌افزار به مدل‌های دو معادله‌ای موسومند و مهم‌ترین آنها مدل آشفتگی دو معادله ای κ - ϵ است که چهار مدل دیگر نیز از آن مشتق شده است. در این مدل، برای محاسبه لزجت آشفتگی رابطه زیر مورد استفاده می‌گیرد [۱۴]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y \epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z \epsilon)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + \\ & C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{\kappa} \Phi - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x \kappa)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y \kappa)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z \kappa)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial z} \right) \\ & + \mu_t \Phi - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (15)$$

C_μ آشفتگی است و مقدار آن برای مدل استاندارد κ - ϵ و مدل RNG^۳ (که از آن منشعب شده است) ثابت است و برای سایر مدل‌های مشتق شده از مدل آشفتگی κ - ϵ (SZL^۴ [۱۵]، GIR^۵) مقدار آن متغیر است. مقادیر آن پس از حل معادلات آشفتگی κ انرژی جنبشی آشفتگی و ϵ میزان افت انرژی جنبشی آشفتگی محاسبه می‌شود. مدل κ - ϵ در مجاورت دیواره‌ها صادق نیست و باید از تابع

در جهت فرضی x به این ترتیب است:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial (V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial (V_z V_x)}{\partial z} = \\ & g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu_e}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

آشفتگی سیال به معنی نوسانات سرعت لحظه‌ای سیال، حول سرعت متوسط آن در هر نقطه از میدان است. بنابراین در سیال آشفتگی می‌توان فرض کرد که اجزای سرعت از دو بخش سرعت لحظه‌ای و سرعت متوسط تشکیل شده‌اند:

$$V_x = \bar{V}_x + V'_x \quad (7)$$

برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی، باید سرعت لحظه‌ای را در معادلات ناویر-استوکس وارد کرد. با اعمال سرعت لحظه‌ای در معادلات ناویر-استوکس و انتگرال‌گیری زمانی، ترم‌های جدیدی در فرم تنش‌های رینولدز در معادلات پدید می‌آید که در راستای x به شکل زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho V'_x V'_x}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho V'_x V'_y}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho V'_x V'_z}) \quad (8)$$

برای مدل کردن اثرات آشفتگی ابتدا عبارت‌های تنش‌های رینولدز به این ترتیب بازنویسی می‌شود:

$$-\overline{\rho u'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

در این رابطه μ_t ضریب لزجت آشفتگی است و متناسب با مدل آشفتگی به کار رفته به دست می‌آید. بیشترین مزیت این رابطه این است که عبارت تنش رینولدز به طور دقیق همان شکلی را که عبارت‌های پخش در معادلات اصلی دارند، پیدا می‌کند و معادله به دست آمده با جایگزینی این فرم جدید، به همان شکل اولیه معادلات ناویر-استوکس خواهد بود، با این تفاوت که لزجت به کار رفته در روابط، لزجت مؤثر است که برابر با مجموع لزجت دینامیکی و لزجت ناشی از تأثیر آشفتگی جریان است:

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (10)$$

بنابراین حل مسئله آشفتگی به نحوه محاسبه لزجت ناشی از تأثیر آشفتگی جریان و اعمال آن در معادلات حاکم بر سیال تبدیل می‌شود. اگر چه برای حالت‌های

پایدار مورد نیاز برای همگرایی به وضعیت دائمی، به اندازه مسئله و شرایط مرزی آن بستگی دارد. در این مسئله از میزان تغییرات متوسط فشار گرهی در دو مرحله متوالی و روی تمام نقاط حوزه حل، به عنوان شاخص همگرایی استفاده شده و بعد از رسیدن این شاخص به میزان ۶-۱۰ روند تحلیل متوقف شده است. اثر پشت‌بندها به صورت زبری معادل ماسه بر بدنه برج اعمال شده است (در مرجع [۸] توضیحات کافی درباره نحوه معادل‌سازی پشت‌بندها با زبری معادل و روابط مربوط به آن ارائه شده است). مقدار نسبت ارتفاع به فاصله نوارهای فلزی برابر $h/a=3 \times 10^{-2}$ است، مقدار K_s معادل آن برابر 0.24 اعمال شده است.

در تحلیل اجزای محدود این مسئله، از المان‌های چهار وجهی برای شبکه‌بندی محیط حل استفاده شده است. عامل بدون بعد ضریب فشار که برای نقاط روی سطح دیواره تعریف می‌شود، اغلب به عنوان معیار مناسبی برای مقایسه نتایج حاصل از میدان فشار در روی بدنه به کار گرفته می‌شود. این عامل به این شکل تعریف می‌شود:

$$C_p(i) = \frac{2(P_0 - P_i)}{\rho U^2} \quad (19)$$

P_i معرف فشار در نقطه i و P_0 و U فشار و سرعت در ناحیه دور دست جریان است. نمودار شکل (۳) بیانگر مقایسه مقادیر ضریب فشار حاصل از آزمایش، حل عددی و مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه در مقطع گلوگاه برج مورد بررسی است. لازم به ذکر است که مقادیر ارائه شده توسط نیومن، اساس پیش‌بینی‌های آیین‌نامه VGB درباره برآورد ضریب فشار حاصل از نیروی باد بر روی برج‌های خنک‌کن است [۲۰]. در شکل (۳) نتایج حاصل برای سایر مدل‌های آشفته‌گی که در قسمت قبل به طور اختصار تشریح شد نیز ارائه شده است (زاویه $\theta=0$ در این شکل مربوط به وجه رو به باد برج است). مدل‌های آشفته‌گی مورد بررسی عبارتند از مدل κ - ε و مشتقات آن (GIR, SZL, RNG)، مدل دو معادله κ - ω و مدل صفر معادله‌ای که برای همه آن‌ها حل اجزای محدود مدل عددی تکرار شده است. همان‌گونه که از نمودارهای این شکل مشخص است، نتایج حاصل از تحلیل عددی برای مدل آشفته‌گی κ - ε و پس از آن مدل صفر معادله‌ای، بهترین انطباق را با نتایج آزمایشگاهی دارد. جدول (۱) برای مدل صفر معادله‌ای و مدل آشفته‌گی دو معادله‌ای κ - ε مقادیر خطای مربوط به حل اجزای محدود را نسبت به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان

دیواره در این نواحی استفاده کرد [۱۷]. در مدل κ - ω مقدار لزجت آشفته‌گی از این رابطه به دست می‌آید:

$$\mu_t = \rho \frac{\kappa}{\omega} \quad (16)$$

که ω مقدار ویژه اتلاف است و مقدار آن برابر است با:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu \kappa} \quad (17)$$

مدل آشفته‌گی κ - ε و مشتقات آن، معادلات دیفرانسیل پاره‌ای مربوط به انرژی جنبشی آشفته‌گی و نرخ اتلاف آن را حل می‌کنند؛ در حالی که مدل κ - ω معادلات دیفرانسیل پاره‌ای مربوط به انرژی جنبشی آشفته‌گی و مقدار نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفته‌گی در واحد این انرژی آن را حل می‌کند [۱۸].

ارزیابی درستی نتایج مدل‌سازی آشفته‌گی به کمک اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

برای بررسی عملکرد مدل‌های مختلف آشفته‌گی بر نحوه توزیع میدانی فشار و سرعت در اطراف برج‌های خنک‌کن، همچنین اطمینان از درستی عملکرد فرض‌های انجام شده در برپایی مدل عددی، در این قسمت یک برج خنک‌کن در ابعاد آزمایشگاهی مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. برای این کار از آزمایش‌های انجام شده در مرجع [۱۹] استفاده شده است. این آزمایش‌ها مربوط به مدل آزمایشگاهی کوچک مقیاس یک برج خنک‌کن با ابعاد واقعی ۸۰ متر ارتفاع و ۱۱/۰ متر ضخامت و قطر گلوگاه ۱۸ متر است. مدل آزمایشگاهی این برج با مقیاس ۱/۳۰۰ ساخته شده است (شکل ۲). از نوارهای فلزی نازکی با ارتفاع ۰/۴ میلی‌متر و به تعداد ۲۴ عدد به عنوان پشت‌بند روی بدنه مدل آزمایشگاهی و برای افزایش زبری سطوح استفاده شده است. ابعاد محفظه آزمایش ۱/۶ × ۲/۴ × ۲/۴ متر است و پروفیل سرعت ورودی با استفاده از قانون لگاریتمی زیر تعریف می‌شود. سایر شرایط در مرجع [۱۹] ذکر شده است.

$$u^+ = \frac{u_*}{k} \ln(z) - \frac{u_*}{k} \ln(z_0) \quad (18)$$

$$(u_* = 1.809 \text{ m/s}, z_0 = 3.431 \text{ mm})$$

از ارتفاعی متناظر با سرعت u^* است. تعداد تکرارهای

می‌دهد.

مقایسه با مدل آزمایشگاهی پرداخته شد و سپس عملکرد مدل‌های مختلف آشفتگی در مقایسه با نتایج حاصل از آزمایش‌ها بررسی شد. در این قسمت با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ ، به بررسی اثر وجود سازه‌های پایه در شرایط واقعی نیروگاه کازرون پرداخته می‌شود.

برای این کار یکی از برج‌های خنک‌کن نیروگاه کازرون (ابعاد آن در جدول (۲) ارائه شده) مدل‌سازی شده و تأثیر سازه‌های فلزی نگهدارنده دریچه‌های متصل شده به پایه برج بتنی، مورد تحقیق قرار می‌گیرد. سازه فولادی پایه برج (محل تعبیه دریچه‌های لوور) تا ارتفاع ۲۴ متری از پایین برج ادامه دارد (شکل ۴). پروفیل سرعت جریان باد در ورودی با توجه به خصوصیات منطقه برج به این ترتیب فرض شده است:

$$V_z = 41.2 \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.11} \quad (20)$$

Z ارتفاع نقطه‌ای است که سرعت در آن محاسبه می‌شود. برای محاسبه عدد رینولدز، مقدار متوسط سرعت در ارتفاع ۱۰ متری به عنوان سرعت مبنا مورد استفاده قرار گرفته است ($V=41.2\text{m/s}$):

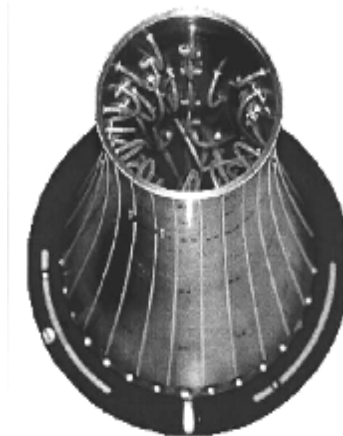
$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{1.205 \text{ Kg/m}^3 \times 41.2 \text{ m/s} \times 90}{1.8 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.s}} \quad (21)$$

مقدار به دست آمده برای عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ است که بتوان جریان را آشفتگی فرض کرد. سایر شرایط مرزی در قسمت قبل توضیح داده شد. تعداد المان‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی محیط حل در دو حالت بدون سازه پایه و با سازه پایه به ترتیب برابر ۸۵۰۱۲۰ و ۹۱۲۰۵۴ المان است.

جدول ۲: ابعاد برج در مقیاس واقعی نیروگاه کازرون.

Location ID	Diameter (m)	Vertical Level (m)
Base	99	0
Lower Shell Edge	81	24.6
Level no.1	77	35
Level no.2	64.3	80
Throat level	62.2	105
Upper Shell Edge	63.5	125

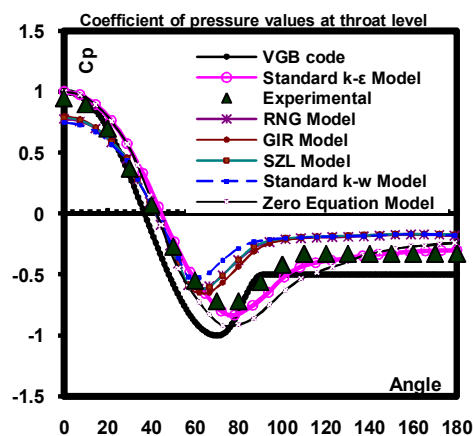
در مدل‌سازی محیط حل باید توجه داشت که مرزهای جریان، فاصله کافی از نواحی استقرار سازه‌ها و یا مناطقی که گرادیان‌های شدید دارند، داشته باشد تا محاسبات با دقت مناسبی انجام شود. ابعاد محدوده حل در شکل (۵)



شکل ۲: برج آزمایشگاهی مورد بررسی.

جدول ۱: مقادیر خطای مربوط به نتایج حاصل از حل عددی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی.

θ°	Exp.	k- ϵ	SGS	ERROR $k-\epsilon$ (%)	ERROR SGS(%)
0	0.95	1	-0.24	5.3	-27.27
30	0.37	0.57	-0.29	35.6	-12.72
60	-0.55	-0.48	-0.45	14.5	36.36
90	-0.56	-0.64	-0.8	13.4	42.85
120	-0.33	-0.38	-0.72	13.3	30.90
150	-0.33	-0.32	0.58	2.4	56.75
180	-0.33	-0.3	1.01	10	5.57
			Mean Error	13.5%	18.9%

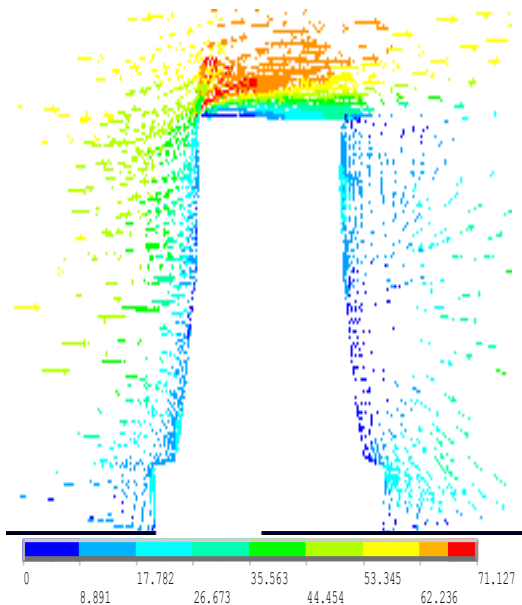


شکل ۳: نمودار توزیع محیطی ضریب فشار در محل گلوگاه برج آزمایشگاهی برای مدل‌های مختلف آشفتگی.

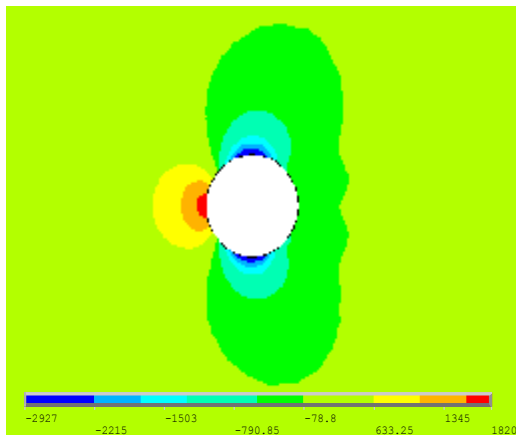
کاربرد مدل‌سازی عددی برج خنک‌کن واقعی

در بخش‌های قبل به بررسی عملکرد مدل عددی در

برج (محل تعبیه دریچه های لوور) که تا ارتفاع ۲۴ متری از پایین برج ادامه دارد، در مدل عددی به صورت کامل در نظر گرفته شده است و بدین ترتیب شکل برج از حالت استاندارد مورد نظر آیین نامه های مورد استفاده برای محاسبه فشار باد خارج شده است.



شکل ۷: بردارهای سرعت در مقطع قائم برج نیروگاه کازرون در جهت جریان باد (m/s).



شکل ۸: نقشه توزیع فشار اطراف جداره خارجی برج نیروگاه کازرون در تراز گلوگاه.

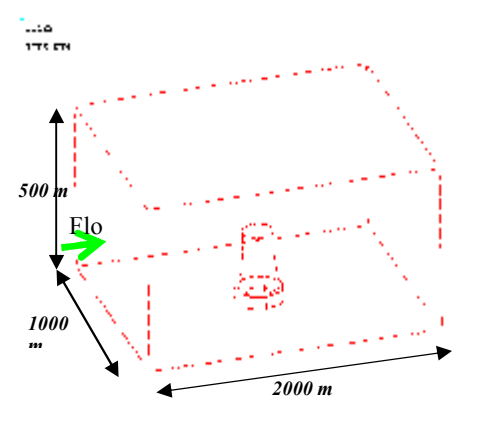
توزیع فشار و سرعت در اطراف برج

برای ارزیابی مقادیر فشار و سرعت در اطراف برج خنک کن، ابتدا یک برج به صورت بدون پشت‌بند (با سطح صیقلی) و با فرض مقدار صفر برای سرعت و زبری در روی جداره خارجی برج، در نظر گرفته شد. شرایط مرزی روی

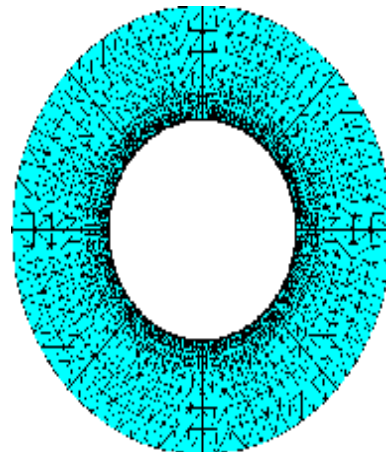
نشان داده شده است.



شکل ۴: سازه دریچه متصل به یک برج خنک کن.



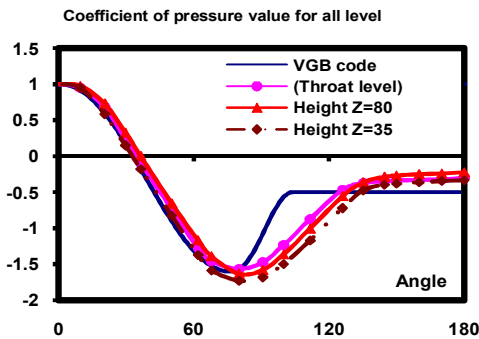
شکل ۵: نمای کلی حوزه حل در اطراف یک برج خنک کن در مقیاس واقعی.



شکل ۶: نحوه توزیع المان‌ها در کنار جداره برج.

چیدمان المان‌ها در نزدیک دیواره برج تا هفت لایه به طور منظم و با افزایش تدریجی در اندازه ابعاد المان انجام شده است (شکل ۶). شکل هندسی سازه فولادی پایه

نسبت به پیش بینی آیین نامه در زوایای بیشتری نسبت به نقطه سکون به وقوع می پیوندد. دلایل این تغییر، ناشی از در نظر گرفتن هندسه سه بعدی و هیپر بولیک برج است. اختلاف های جزئی 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 پایه های اضافه شده به هندسه برج است.



شکل ۹: مقایسه مقادیر حاصل برای ضریب فشار در ارتفاعات مختلف و آیین نامه VGB.

تغییرات فشار برای برج تک نیروگاه کازرون در شرایط واقعی

در بخش های قبل به بررسی عملکرد مدل عددی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی پرداخته شد و پس از انتخاب مدل آشفتگی بهینه، به بررسی تغییرات فشار در ارتفاعات مختلف برج با سطح صیقلی (بدون پشت بند) پرداخته شد. در این بخش به بررسی اثر وجود سازه های پایه در شرایط واقعی نیروگاه کازرون پرداخته می شود.

از آنجا که سطوح خارجی برج خنک کن نیروگاه کازرون پشت بند دارد، لازم است ابتدا اثر ابعاد پشت بندها روی میدان فشار اطراف برج، بررسی شود. وجود پشت بندها می تواند فشار منفی تولید شده در دو طرف برج را تا میزان ۶۰ درصد نیز کاهش دهد. برای در نظر گرفتن اثر پشت بندها می توان از ایده معادل سازی اثر ابعاد و فاصله پشت بندها با زبری معادل اعمال شده بر جدار خارجی برج در مدل عددی استفاده کرد. جزئیات این ایده توسط نویسندگان مقاله حاضر در مرجع [۸] تشریح شده است.

زمین به صورت مرز بدون لغزش در نظر گرفته شده و پروفیل واقعی سرعت بر مرز ورودی اعمال شده است. برای همگرایی به وضعیت دائمی، تعداد ۲۵۰۰ تکرار برای حل اجزای محدود به اجرا در آمد و محاسبات تا رسیدن به شاخص همگرایی فشار به مقدار 10^{-6} ادامه یافت.

بردارهای سرعت و مقادیر فشار حاصل از آنالیز اجزای محدود در اطراف برج خنک کن در اشکال (۷) و (۸) ارائه شده است. بیشترین مقدار سرعت در ارتفاع نزدیک به ۸۰ متری از سطح زمین و در مجاوره جداره های کناری برج رخ می دهد. این مقدار برابر با ۹۲ متر بر ثانیه است که ۱/۷ برابر نسبت به ناحیه دور دست جریان در همان ارتفاع افزایش یافته است. با دقت در بردارهای سرعت در اطراف برج (شکل ۷) مشاهده می شود که وجود پایه های برج که تا ارتفاع ۲۴ متری ادامه دارد، باعث جدایی جریان در این محل پایه های برج شده و در کاهش میزان سرعت در این نواحی مؤثر است.

حال به بررسی تغییرات ضریب فشار حاصل از مدل عددی و مقایسه آن با مقادیر پیشنهادی آیین نامه VGB آلمان [۱۰]، در ترازهای ارتفاعی مختلف برج پرداخته می شود. برای این هدف ابتدا همانند قسمت قبل، برج به صورت بدون پشت بند (مقدار سرعت و زبری روی جداره برج برابر با صفر) در نظر گرفته شده و نتایج حاصل برای ضریب فشار در ارتفاعات مختلف ارائه شده است (شکل ۹). همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، آیین نامه برای همه ارتفاعات مقدار و تغییرات ضریب فشار را یکسان فرض می کند. در نتایج عددی نیز به طور تقریبی همین روند مشاهده می شود. به این معنی که اگر چه ضریب فشار منفی ایجاد شده در کناره برج برای ارتفاعات مختلف تا حدود ۱۰ درصد با یکدیگر اختلاف دارد، اما می توان گفت که مقدار بیشینه فشار مثبت ایجاد شده در نقطه سکون و مقدار بیشینه فشار منفی ایجاد شده در دو طرف برج ها تا حدودی در همه ارتفاعات برابر با مقدار پیشنهادی آیین نامه است. اما میزان ضریب فشار در محل نیمه پایین دست برج نیز دستخوش تغییرات قابل توجهی شده است و فشار منفی ایجاد شده در این ناحیه به طور تقریبی نصف مقادیر پیش بینی شده توسط آیین نامه است. همچنین محل وقوع بیشینه فشار منفی (نقطه جدایش لایه مرزی از بدنه برج) که در دو طرف برج قرار دارد،

برای ابعاد خاص برج‌های کازرون پرداخته می‌شود. برای محاسبه فشار وارد بر سطوح خارجی برج از روش آیین‌نامه، باید مقادیر C_p در محیط پیرامونی برج و مقدار $q(z)$ در ارتفاع برج مشخص شود. مقدار C_p با توجه به ابعاد پشت‌بندها از روابطی مشابه با رابطه (۳) و برای نسبت ارتفاع به فاصله پشت‌بندهای برج کازرون به دست می‌آید. این روابط به شرح زیر است:

$$C_p(\theta) = 1 - 2 \left(\sin \frac{90}{70} \theta \right)^{2.267}, \quad (0 \leq \theta \leq 70)$$

$$C_p(\theta) = -1 + 0.5 \left(\sin \left(\frac{90}{21} (\theta - 70) \right) \right)^{2.395}, \quad (70 \leq \theta \leq 91)$$

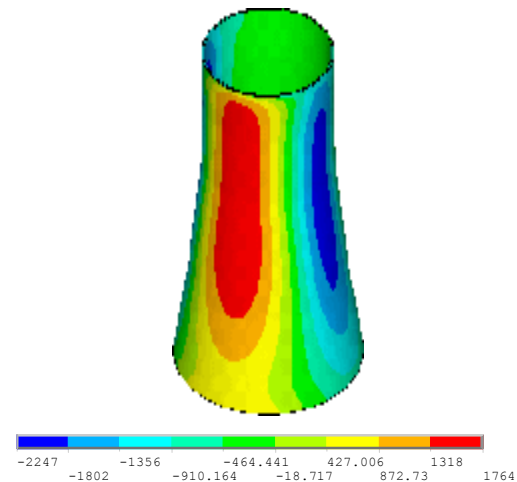
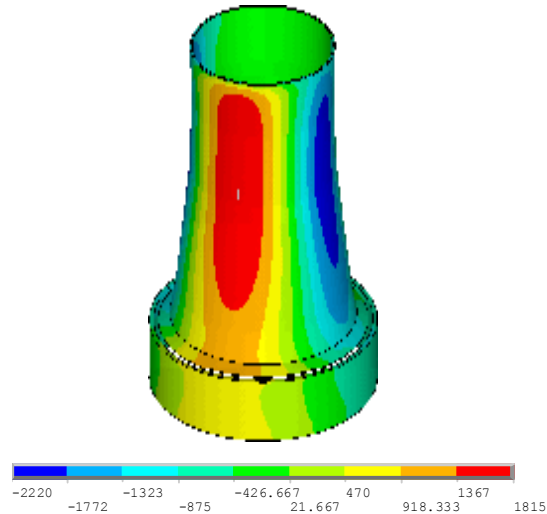
$$C_p(\theta) = -0.5, \quad (91 \leq \theta \leq 180) \quad (22)$$

تابع $q(z)$ برای برج‌های کازرون به این ترتیب در نظر گرفته می‌شود:

$$q(z) = 1.06 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.22} \quad (23)$$

z ارتفاع از پای برج است. حال با استفاده از رابطه (۱) می‌توان مقادیر فشار بر سطوح خارجی برج را برای ترازهای مختلف و در زوایای دلخواه به دست آورد.

مقادیر فشار در محیط پیرامونی برج و برای ارتفاعات پایین و بالای برج و روی پایه (ارتفاعات ۲۰ و ۳۵ و ۱۰۵ متر) در شکل (۱۱) رسم شده‌اند. در این نمودارها مقادیر حاصل از تحلیل عددی برای دو حالت با پایه و بدون پایه ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، مقادیر حاصل از حل عددی برای هر دو حالت در ارتفاعات بالای برج، بر هم منطبق است و به نظر می‌رسد وجود سازه‌های پایه تأثیر چندانی در توزیع فشار در نواحی بالای برج ندارد. اما در ترازهای پایین‌تر برج به دلیل نزدیک‌تر شدن به سازه‌های پایه، تفاوت اندکی در ضریب فشار حاصل می‌شود. این تفاوت روی پایه‌ها (ارتفاع زیر ۲۴ متر) به طور ناگهانی برای سازه با پایه کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل تغییر هندسه برج به شکل استوانه‌ای روی پایه و همچنین تغییرات شعاعی برج است. بنابراین به نظر می‌رسد شکل استوانه‌ای پایه‌ها، باعث کاهش فشار منفی در اطراف برج می‌شود.



شکل ۱۰: نقشه توزیع فشار بر جداره خارجی برج نیروگاه کازرون برای دو حالت با و بدون سازه‌های پایه (سطح خارجی برج خنک‌کن پشت بند دارد).

از آن جا که نسبت ارتفاع به فاصله پشت‌بندهای به کار رفته در بدنه برج‌های نیروگاه کازرون برابر با ۰/۲۵۴ است، زبری معادل ماسه آن برابر با ۰/۲۴۷ در نرم‌افزار اعمال شده و سایر شرایط همانند حالت قبل است. تحلیل عددی برج در این شرایط، برای هر دو حالت برج، با سازه‌های پایه و بدون سازه‌های پایه انجام می‌گیرد. سازه‌های پایه برای نگهداری لوورها در ناحیه پایینی برج اضافه می‌شود. در شکل (۱۰) نقشه توزیع فشار برای برج خنک‌کن پشت‌بنددار، در دو حالت با سازه پایه و بدون سازه پایه نشان داده شده است.

پس از انجام آنالیز عددی برای دو حالت با پایه و بدون پایه، به استخراج مقادیر فشار پیشنهادی آیین‌نامه VGB

از خود تأخیر نشان می‌دهد.

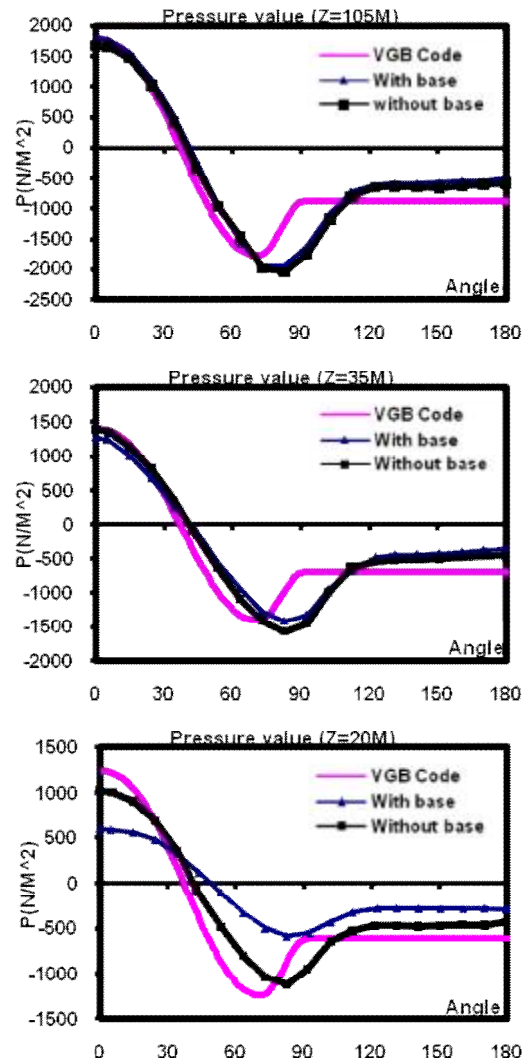
در نمودارهای شکل (۱۱) که مقادیر فشار حاصل از آیین‌نامه و حل عددی در محیط پیرامونی برج مقایسه شده‌اند، این جا به جایی بهتر نمایان می‌شود. علاوه بر منطبق نبودن نقاط بیشینه، مقدار فشار منفی ایجاد شده در پشت برج خنک‌کن تک نیز برای مقادیر حل عددی در حدود ۰/۷ برابر مقادیر آیین‌نامه VGB است. در رابطه با مقدار بیشینه فشار منفی در محل کناره‌های برج، مقادیر حاصل از حل عددی، اندکی بیشتر از مقادیر آیین‌نامه است. به نظر می‌رسد دلیل اصلی این اختلاف، برخورد یکسان آیین‌نامه در دامنه وسیعی از ابعاد پشت‌بندها (از $h/a=0.025$ تا $h/a=0.1$) باشد. به عبارت دیگر آیین‌نامه مقادیر یکسانی را از نظر تغییرات مقدار فشار در راستای شعاعی برج ارائه می‌دهد. در حالی که مدل عددی برای هر یک از مقادیر زبری جداره در این محدوده، مقادیر فشار متفاوتی ارائه می‌دهد. بنابراین مقداری از تغییرات بیشینه فشار منفی نشان داده شده در نمودارهای ذکر شده به دلیل مقدار متفاوت ابعاد پشت‌بندهای برج خنک‌کن نیروگاه کازرون است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی در قالب استفاده از روش اجزای محدود برای محاسبه میدین فشار و سرعت در اطراف برج‌های خنک‌کن به کار گرفته شد و تأثیر مدل‌های متنوع آشفتگی (که کاربرد آنها متداول است) و شکل هندسی برج (با وجود سازه‌های پایه بر عوامل ذکر شده بررسی شد. در نهایت نتایج حاصل از حل عددی برای برآورد دقت روابط موجود در آیین‌نامه VGB آلمان برای برج‌های با مقیاس واقعی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل به این شرح است:

۱- تفاوت ناچیز نتایج عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، بیانگر امکان استفاده از مدلسازی عددی (با اعمال شرایط مرزی جداره و جریان دوردست صحیح) در بررسی و محاسبه فشار باد رفتار سازه‌های حساس در مقابل باد همچون برج خنک‌کن است.

۲- با توجه به مقادیر آزمایشگاهی گزارش شده، از بین مدل‌های آشفتگی، مدل دو معادله‌ای استاندارد $k-\epsilon$ در حالت سه‌بعدی جواب‌های قابل قبولی را ارائه می‌دهد. بعد از این مدل، مدل صفر معادله‌ای که بار محاسباتی آن به



شکل ۱۱: مقایسه مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه و مدل عددی برای فشار در پیرامون برج نیروگاه کازرون در چند تراز مختلف ارتفاعی.

در مقایسه نتایج عددی با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه، باید اشاره کرد که برای هر دو حالت با سازه‌های پایه و بدون سازه‌های پایه، در نقطه سکون (در وجه رو به باد) مقادیر حاصل از حل عددی انطباق به نسبت خوبی با مقادیر آیین‌نامه دارد. با حرکت به سمت کناره‌های برج، نقطه بیشینه فشار منفی حاصل از حل عددی در زاویه نزدیک ۸۵ تا ۹۰ درجه رخ می‌دهد. در حالی که آیین‌نامه زاویه بیشینه فشار منفی را ۷۰ درجه ارائه می‌کند. بنابراین به نظر می‌رسد اگر چه مقادیر بیشینه فشار منفی حاصل از حل عددی و آیین‌نامه تا حدودی برابر است، اما محل اثر آنها حدود ۱۵ درجه برای حل عددی نسبت به آیین‌نامه

به مقادیر آیین‌نامه ذکرشده رخ می‌دهد. همچنین فشار منفی ثابت در نیمه پشتی برج به طور تقریبی ۰/۷ برابر مقادیر آیین‌نامه VGB است.

۵- با استفاده از مدل‌سازی عددی می‌توان تغییرات ضریب فشار در ارتفاعات مختلف برج‌های خنک‌کن را به خوبی محاسبه کرد، در حالی که آیین‌نامه VGB مقادیر ثابتی را برای ضریب فشار در همه ارتفاعات توصیه می‌کند. بنابراین در مواردی که هندسه برج خنک‌کن نسبت به شکل استاندارد مورد نظر آیین‌نامه متفاوت باشد، استفاده از مدل عددی برای تحلیل فشار ناشی از باد، ضروری به نظر می‌رسد. این تفاوت‌ها ممکن است به دلیل وجود سازه‌های پایه و تغییر در انحنای قائم برج رخ دهد.

۶- در برج‌های خنک‌کن که دارای سازه‌های پایه برای نگهداری پره‌ها (لوورها) در محل ورودی هوا باشند، حتی در حالت بسته بودن این دریچه‌ها، افت قابل توجه فشار در ترازهای پایینی برج و بخصوص در محل استقرار این سازه‌ها مشاهده می‌شود.

مراتب از سایر مدل‌های آشفتگی کمتر است نیز (بخصوص در نیمه پایین دست باد برج و همچنین نقطه‌ی جدایش لایه مرزی) جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۳- بیشترین تأثیر افزایش زبری جداره (در قالب اثر معادل نسبت اندازه به فاصله پشت‌بندها h/a) در کاهش مقدار فشار منفی ایجادشده در کنار جداره و نزدیک‌تر شدن محل وقوع آن نسبت به نقطه راستای وزش باد است. نتایج عددی که بیانگر افزایش فشار منفی کناری برج خنک‌کن نیروگاه کازرون، نسبت به مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه VGB است، بر ضعف فرض این آیین‌نامه مبنی بر ثابت بودن آن در محدوده‌ای به نسبت وسیع ($0.1 \leq h/a \leq 0.25$) تأکید دارد.

۴- در حالت در نظر گرفتن زبری معادل پشت‌بندها برای برج تک، اگر چه مقادیر بیشینه و کمینه حاصل از حل عددی با نتایج حاصل از آیین‌نامه VGB همخوانی دارد، اما محل اثر فشار منفی کناری و نقطه جدایی لایه مرزی با جا به جایی ۱۰ تا ۲۰ درجه (به سمت پایین دست) نسبت

مراجع

- 1 - Niemann, H. J. and Ruhwedel, J. (1980). "Full-scale and model tests on wind induced, static and dynamic stresses in cooling tower shells." *Eng Struct.*, Vol. 2, PP. 81-89.
- 2 - Niemann, H. J. and Ko'pper H. D. (1998). "Influence of adjacent buildings on wind effects on cooling towers". *Eng Struct.*, Vol. 20, No.10, PP. 874-880.
- 3 - Niemann, H. J. (1980). "Wind effects on cooling-tower shells." *J. of Struct Eng*, Vol.106, No. 3, PP. 643-661.
- 4 - Borri, C., Orlando, M. and Spinelli P. (1999). "Wind induced stresses on two neighboring cooling towers." *In: Proceedings of 10th ICWE*, Copenhagen, Denmark, Rotterdam: A.A. Balkema. Vol. 1, PP. 401-408.
- 5 - Prabhakar, Z. (1991). "Wind effects on hyperbolic cooling towers." *Wind Loads on Struct.* PP. 205-214.
- 6 - Zhai, Z. and Fu, S. (2002), "Modeling the airflow around cooling towers with multi-block CFD." *4th International ASME/JSME/KSME Symposium*, Canada.
- 7 - Sabbagh-Yazdi, S. R., Torbati, M., Azad, F. M. and Haghghi, B. (2007). "Computer simulation of changes in the wind pressure due to cooling towers-buildings interference." *WSEAS Transactions on Mathematics*. Vol. 6, No. 1, PP. 205-214.
- 8 - Goudarzi, M. A. and Sabbagh-Yazdi, S. R. (2008). "Modeling wind ribs effects for numerical simulation external pressure load on a cooling tower of KAZERUN power plant-IRAN." *J. Wind and Struct*, Vol. 11, No. 6, PP. 479-496.
- 9 - Goudarzi, M. A. and Sabbagh-Yazdi, S. R. (2009). "Numerical investigation of interference effects on wind flow around a group of cooling towers including wind ribs effects." *International Journal of Science and Technology*, Vol.71, (Accepted for Publication).
- 10 - VGB Guideline. (2005). *Structural Design of Cooling Towers*, Essen, Germany.

- 11 - Hirsch C. (1997). *Numerical computation of internal and external flows*. Wiley, New York.
- 12 - Moaveny, S. (1999). *Finite Element Analysis: Theory and Application with Ansys*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
- 13 - Sabbagh-Yazdi, S. R. (2003). "Using artificial dissipation on unstructured meshes for numerical solution of inviscid incompressible flow." *4th Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran-Iran, PP. 538-548.
- 14 - Launder, B. E. and Spalding, D. B. (1974). "The numerical computation of turbulent flows." *Computer Methods in Appl Mech and Eng*. Vol. 3, PP. 269-289.
- 15 - Shih, T. H., Zhu, J. and Lumley, J. L. (1994). "A new reynolds stress algebraic equation model." *August ,Report No.TM-106644, NASA*.
- 16 - Girimaji, S. S. (1995). "Fully-Explicit and self-consistent algebraic reynolds stress model." *ICASE 95-82*.
- 17 - Wilcox, M. and David, C. (1988). "Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models." *AIAA Journal*, Vol. 26, PP. 1299-1310.
- 18 - Menter, F. R. (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *AIAA Journal*. Vol. 32, PP. 1598-1605.
- 19 - Orlando, M. (2001). "Wind-induced interference effects on two adjacent cooling towers." *J. Eng. Struct.*, Vol. 23, No. 8, PP. 979-992.
- 20 - Niemann, H. J. (1980). "Wind effects on cooling-tower shells." *J. of Struct Eng*, ASCE, Vol. 106, No. 3, PP. 643-61.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Wind Ribs
- 2 - Computational Fluid Dynamics (CFD)
- 3 - Re-Normalized Group Model
- 4 - Shi-Zhu-Lemley
- 5 - Girimaji