مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1395، دوره 16، شماره 4، ص‌ص 221-229

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

اصلاح آیرودینامیکی برج‌های مرتفع با روش الحاقی به منظور کاهش نیروی ناشی از باد

محمدحسن جوارشکیان[1*]، علی اسماعیلی[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد
*مشهد، صندوق پستی 1111-91775، javareshkian@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 03 بهمن 1394
پذیرش: 29 بهمن 1394
ارائه در سایت: 28 فروردین 1395

کلید واژگان:
اصلاح آیرودینامیک
روش الحاقی
اجسام سه بعدی
آنالیز حساسیت

چکیده

در این تحقیق، یک تکنیک جدیدی ارائه شده که بر اساس آن می‌توان اجسام سه بعدی حجیم مثل برج‌های مرتفع ساخته شده را از جنبه آیرودینامیکی بهینه و اصلاح کرد و به این طریق بر عمر برج ها و آسایش ساکنان آن‌ها افزود. این تکنیک مدرن تلفیقی از حل عددی جریان سیال و روش الحاقی است و توانایی اصلاح قسمت‌های مختلف پیکره برج را دارد. در اولین گام، پارامترهای شکل، موقعیت قرارگیری ساختمان، زاویه حمله و شرایط جوی مختلف به عنوان پارامترهای اثرگذار بر آیرودینامیک برج‌ها مطالعه می‌شود و با استفاده از این روش، میزان حساسیت هر یک از این متغیرها بر نیروهای آیرودینامیکی بدست می‌آید؛ به طوری که نتایج حاصله حاکی از تاثیرگذاری 76% شکل سطح برج‌ها در مقابل دیگر پارامترها می‌باشد. در گام بعدی، با حل معادلات الحاقی گسسته در کل محدوده حل، میزان اثرگذاری جریان سیال بر بخش‌های مختلف ساختمان مشخص شده و با ایجاد تغییرات مطلوب در آن نواحی، اصلاحات آیرودینامیکی انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که این روش می‌تواند منجر به کاهش بارهای وارده بر پیکره برج به میزان 31% شود که این مقدار کاهش بسیار برای مهندسان و طراحان ساختمان‌های مرتفع جالب توجه خواهد بود.

Aerodynamic Modification of High-rise Buildings based on Adjoint Method to Reduce Wind Induced Forces

Mohammad Hassan Djavareshkian*, Ali Esmaeili

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, javareshkian@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 January 2016
Accepted 18 February 2016
Available Online 16 April 2016

Keywords:
Aerodynamic modification
Adjoint method
Three dimensional bodies
Sensitivity analysis

ABSTRACT

In this research, a new numerical approach which is capable of modifying the shape of three dimensional massive bodies like tall buildings with respect to aerodynamic loads is presented; therefore, the aerodynamic forces are improved; consequently, the comfortability of the buildings is increased. This method is divided into 2 parts, a numerical simulation of fluid flow and Adjoint method. As a result, some modifications are performed in the different parts of the building. In the primary step, the building shape and its setting position are investigated in different flow conditions as effective parameters on the aerodynamics of buildings. Subsequently, the sensitivity level of each variable is studied on aerodynamic loads. The results illustrate that the building pattern has the highest impressments (76%) on the excited forces. In the next step, the amount of sensitivity of the fluid flow on the various areas of the tower is assessed by solving Adjoint equation in the whole fluid domain. As a result, some aerodynamic modifications are performed and it has been proved that the imposed loads on the tower have declined around 31% whereas this amount of improvement is interesting for the design of tall buildings.

1- مقدمه

در دهه اخیر مبحث بهینه‌سازی در مسائل مختلف مهندسی بسیار مورد توجه قرار گرفته و نتایج حاصل از آن ثابت کرده که در نظر گرفتن یک طراحی بهینه می‌تواند تاثیر شگرفی در علوم مهندسی داشته باشد. بهینه‌سازی در تمامی علوم مهندسی از جمله صنایع هوافضا، خودرو، پزشکی، عمران و.... ریشه دوانده است. از طرفی در برخی از مسائل مهندسی که هزینه‌های هنگفتی برای طراحی و ساخت آن‌ها تحمل می‌شود اهمیت روش‌های بهینه‌سازی دو چندان خواهد شد. به عنوان مثال، ساخت تعداد برج‌های مرتفع روز به روز در حال افزایش است و با توجه به هزینه‌های سنگین آن‌ها، لزوم استفاده از تکنیک‌های جدید را می‌طلبد. ارتفاع بلند برج‌ها، فرکانس‌های طبیعی کوچک، خاصیت ذاتی دمپ پایین و سرعت زیاد بادها بخصوص در قسمت بالایی برج سبب می‌شوند که این سازه‌ها نسبت به محرک‌های باد به خصوص نوسانات القا شده ناشی از گردابه‌ها، حساسیت زیادی از خود نشان دهند. لذا دست‌یابی به طراحی پایدار برج‌ها در مقابل جریان باد بدون در نظر گرفتن ملاحظات آیرودینامیکی امکان‌پذیر نیست. اصلاح آیرودینامیکی برج‌های مرتفع و ساختمان‌های طویل بسیار می‌تواند در افزایش سطح رضایت ساکنان، طول عمر و ایمنی برج‌ها موثر واقع شود.

بحث بهینه‌سازی آیرودینامیکی و طراحی پایدار از مباحث مدرن و جدید

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. H. Djavareshkian, A. Esmaeili, Aerodynamic Modification of High-rise Buildings based on Adjoint Method to Reduce Wind Induced Forces, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 221-229, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]

در جامعه طراحی ساختمان است. البته مطالعات پارامتریک آیرودینامیکی سال‌ها قبل توجه محققان و دانشمندان را به خود جلب کرده است. اولین مطالعه بر آیرودینامیک ساختمان‌ها به سال 1971 برمی‌گردد و بعدا با توسعه برج‌ها، در دهه 1990 تحقیقات تجربی وسیع‌تری انجام شد که شامل بررسی اثر گوشه‌های ساختمان بر بارهای آیرودینامیکی [2-1]، اثر پلکانی و مخروطی [3-5] و اثر پیچش [7] می‌باشند. ارزیابی جنبه اقتصادی (هزینه و فضای مفید داخل برج) این تغییرات آیرودینامیکی نیز مورد مطالعه قرار گرفت [8]. اگرچه در سال‌های اخیر نیز با انجام آزمایش‌های تونل باد، مطالعه جامعی بر روی انواع پیکره‌های ساختمان به منظور بهینه‌سازی شکل برج‌ها (شامل مدل‌های مربع، دایره، مستطیل و بیضوی) انجام شد [10-9]؛ ولی این اطلاعات تنها برای طراحی اولیه و همچنین به عنوان منبع معتبری برای کارهای تحقیقاتی آینده در زمینه آیرودینامیک ساختمان مفید خواهند بود و طراحان را به بهینه‌سازی آیرودینامیکی هدایت نخواهد کرد.

در دهه‌های گذشته، با پیشرفت کامپیوتر و علوم دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی‌های عددی نیز به کمک محققان آمده است. در تازه‌ترین تحقیقات انجام شده در سال 2014، روش‌های آیرودینامیکی که با موفقیت در طراحی برج‌ها استفاده شده است جمع‌آوری شده و اصول این روش‌ها مورد بحث قرار گرفت [11]. همچنین زانگ و همکارانش جریان باد و آیرودینامیک برج‌ها را در سال 2013 مدل کردند [12]. در سال 2015، تومناگا و همکارانش نیز به مطالعه عددی بر روی سقف ساختمان‌های بلند پرداختند و سعی کردند آن را بهینه‌سازی کنند [13]. در همین سال، اثرات القایی باد بر برج‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت [14].

نکته قابل توجه در مطالعات پیشین این است که تنها به بررسی پارامترهای موثر بر آیرودینامیک ساختمان پرداخته شده و با بازی کردن با این پارامترها تغییراتی در برج‌های مرتفع ایجاد کردند. در حالی که بهینه‌سازی آیرودینامیکی می‌تواند به دو دسته طراحی آیرودینامیکی و اصلاح آیرودینامیکی تقسیم شود [11]. در طراحی آیرودینامیکی از همان ابتدای طراحی برج، ملاحظات آیرودینامیکی لحاظ می‌شود ولی به دلیل وجود پارامترهای آیرودینامیکی مختلف، نیاز به آزمایش‌های تونل باد با پیکره‌های مختلف احساس می‌شود که سبب افزایش بسیار زیاد هزینه‌ها و صرف زمان زیادی در مسیر طراحی خواهد شد. در حالی که در اصلاح آیرودینامیکی تغییرات محدودی بر شکل برج به منظور بهبود ویژگی‌های آیرودینامیکی می‌توان انجام داد ولی چالش پیش‌رو این است که این تغییرات در کجای ساختمان انجام شود. لذا ارائه روشی که بتواند به طراحان برج‌ها میزان حساسیت قسمت‌های مختلف شکل سازه به بارهای آیرودینامیکی را نشان دهد می‌تواند منجر به کاهش چشمگیری در هزینه‌های طراحی شده و تحولی در صنعت ساخت برج‌های مرتفع ایجاد کند.

لذا آنچه که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته، ارائه روشی است که امکان بهینه‌سازی برج‌های مرتفع را فراهم می‌کند و توانایی پیش‌بینی میزان حساسیت بخش‌های مختلف آن، به بارهای آیرودینامیکی وارده را دارد. این روش ترکیبی از حل معادلات سه بعدی جریان سیال و حل معادلات الحاقی است؛ به طوری که جریان هوای آشفته حول یک برج مرتفع به روش عددی و به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده و اثرات آیرودینامیکی و مکانیزم فیزیکی کاهش بار وارده بر برج‌ها با روش الحاقی مورد بررسی قرار گرفته است. اهمیت این تحقیق از دو نقطه نظر می باشد 1- حل معالادت الحاقی پیوسته برای یافتن درجه اهمیت پارامترهای موثر بر آیرودینامیک برج؛ در این بخش چهار پارامتر مهم سطح مقطع ساختمان، زاویه برخورد جریان سیال با آن، نحوه قرارگیری سازه در مقابل باد و شرایط محیطی در نظر گرفته می‌شود و بر اساس نتایج حاصله از حل عددی، معادلات الحاقی پیوسته حل شده و اثرگذارترین پارامتر بر نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی ساختمان بدست می‌آید. 2- حل معادلات الحاقی گسسته در کل حوزه حل به منظور یافتن میزان حساسیت بخش‌های مختلف برج به نیروهای آیرودینامیکی.

2- روند شبیه‌سازی عددی

در دینامیک سیالات محاسباتی معادلات اساسی شامل بقای جرم و مومنتوم (معادلات (1) و (2)) در قالب معادله ناویر-استوکس به روش عددی حل می‌شوند. این معادلات با روش حجم محدود گسسته شده، توسط الگوریتم فشار مبنا به روش ضمنی و بر پایه الگوریتم سیمپل[1] جریان حل می‌شوند. دراین تحقیق از نرم افزار فلوئنت برای شبیه سازی عددی جریان سیال استفاده شده است. ابتدا محوطه حل، به تعدادی حجم گسسته شده یا سلول تقسیم شده، به طوری که همه متغیرها در مرکز سلولها ذخیره می شوند. حال این معادلات برای همه حجم کنترل ها براساس تئوری گوسین بکارگرفته میشود. شار نفوذ به وسیله تفاضل مرکزی و روش تفاضلی بالادست مرتبه دوم برای بدست آوردن ترم های جابه‌جایی استفاده شده است. همچنین مدل آشفتگی نیز به مانند معادلات ناویر-استوکس گسسته شده و با این معادلات کوپل می‌شوند. به دلیل ایجاد گردابه‌های بسیار بزرگ در پشت سازه و نیز وجود اثرات دیواره، در این تحقیق از ترکیب دو مدل شبیه سازی ادی بزرگ[2] و روش متوسط‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس[3] استفاده شده که توانایی پیش‌بینی جدایش‌های بزرگ در جریان‌هایی با رینولدز بالا و با یک هزینه محاسباتی معقولی را دارد [15]. در این مطالعه به دلیل توانایی‌های مدل شبیه‌سازی ادی جدا شده تاخیری[4][16]، از آن استفاده می‌شود [17] و از میان مدل‌های متوسط‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس، مدل کی-امگا[5] از نوع انتقال تنش برشی[6] به دلیل قابلیت‌های این مدل در نواحی نزدیک به دیواره استفاده خواهد شد [18]. معادلات اساسی مربوط به مدل شبیه‌سازی ادی جدا شده تاخیری بر پایه انتقال تنش برشی به صورت معادلات (3) و (4) بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla . (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \frac{\rho \sqrt{k^3}}{L_{DES}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + 2(1 - F_1) \rho \frac{\nabla k \cdot \nabla \omega}{\sigma_{\omega 2} \omega} + \alpha \frac{\rho}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega . \max(\frac{1}{a^*}, \frac{F_2 . S}{a_1 \omega})} \quad (5)$$

مقیاس طول مدل شبیه‌سازی ادی جدا شده تاخیری بر اساس رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$L_{DDES} = L_{RANS} - f_d \max(0, L_{RANS} - L_{LES}) \quad (6)$$

که L_{RANS} و L_{LES} مقیاس طول مدل روش متوسط‌گیری رینولدز معادلات

1- SIMPLE
2- Large Eddy Simulation(LES)
3- Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)
4- Delayed Detached Eddy Simulation (DDES)
5- k-w
6- Shear Stress Transport (SST)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]

ناویر-استوکس و شبیه سازی ادی بزرگ بوده و بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L_{\mathrm{RANS}} = \frac{\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega} \quad (7)$$

$$L_{\mathrm{LES}} = C_{\mathrm{DES}}\Delta_{\max} \quad (8)$$

$$C_{\mathrm{DES}} = C_{\mathrm{DES1}} \cdot F_1 + C_{\mathrm{DES2}} \cdot F_2 \quad (9)$$

در روابط بالا β^{*}=0.09، k انرژی جنبشی توربولانسی، ω ترم اضمحلالی، $\Delta_{\max}$ ماکزیمم طول خط یک سلول و F_1,F_2 نیز توابع اختلاطی مدل انتقال تنش برشی می‌باشند [18]. تابع f_d که استفاده شده است نیز یک تابع اختلاطی است و در حقیقت نقش تغییر مدل‌ها را به عهده دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_d = 1 - \tanh[(C_{d1}r_d)^{C_{d2}}] \quad (10)$$

$$r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\kappa^2 d_w^2 \sqrt{0.5(S^2 + \Omega^2)}} \quad (11)$$

به طوری که κ,C_{d1},C_{d2} ضرایب ثابت، ν_t,ν نیز ویسکوزیته سینماتیکی آرام و آشفته، d_w فاصله از سطح دیواره و ترم‌های S,Ω نیز به ترتیب بیانگر مقدار مطلق تانسور کرنش و گردش می‌باشد.

3-روش الحاقی

روش الحاقی یک ابزار خاص است که با فراهم آوردن اطلاعات حساسیت، حوزه تحلیل را توسعه داده و حساسیت یک تابع مطلوب با توجه به متغیرهای ورودی را بدست می‌دهد. برای فهم بهتر این روش، فرض کنید که یک مجموعه اطلاعات کامل از رفتار سیستم مشخص است. حال اگر یک تغییر در آن ایجاد شود آنگاه اطلاعات موجود نیز محکوم به تغییر هستند و این مقدار تغییر، به حساسیت مسئله در مقابل پارامتر تغییر یافته بستگی دارد. به عبارت دیگر، این روش شامل محاسبه مشتقات یک یا چند کمیت با توجه به یک یا چند متغیر مستقل دیگر است. فهم این حساسیت‌ها در سیستم سیال کمک شایانی در ایجاد دید صحیح نسبت به مسئله برای مهندسان ایجاد می‌کند. معادلات ناویر-استوکس (معادلات 1-4) را می‌توان به صورت شبه گسسته به شکل ذیل بازنویسی کرد:

$$\frac{\mathrm{d}w_{ijk}}{\mathrm{d}t} + R_{ijk}(w) = 0 \quad (12)$$

به طوری که $w=(\rho,\rho U,\rho k,\rho w)^{\mathrm{T}}$ بردار متغیرهای اصلی و R نیز باقیمانده کل می‌باشند. برای مدل کردن تغییرات اعمال شونده به حل، فرض می‌شود یک ترم چشمه به معادلات پیوستگی و مومنتوم به شکل زیر اضافه شود:

$$\tilde{R}=R+S \quad (13)$$

این ترم‌ها هم می‌توانند به طور کامل معین شوند و یا فقط برای جرم تعریف شوند. علامت بردار اضافی نیز برای تشخیص میان ترم‌های اثرپذیری و اثرگذاری جسم بر روی سیال استفاده می‌شود. نکته قابل توجه این است که این روش کلی است و برای مدل کردن هر نوع مسئله قابلیت استفاده دارد.

اطلاعات الحاقی بدست آمده نقش مهمی در بهبود حل عددی خواهد داشت. نواحی که از حساسیت بالایی برخوردار هستند نشان‌دهنده تاثیرگذاری قوی آن قسمت بر حل می‌باشند و در نتیجه در صورت اصلاح می‌توان آن ناحیه را مد نظر داشت. روش الحاقی به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم می‌شود. روش الحاقی پیوسته به شدت متکی بر ویژگی‌های ریاضیات معادلات دیفرانسیل جزیی است که فیزیک مسئله تعریف می‌کند. این روش با اینکه به سادگی بکار گرفته می‌شود ولی در مسائلی که شرایط مرزی و توابع دیواره با فیزیک پیچیده وجود دارد قابل بکارگیری نیست. در مقابل، روش الحاقی گسسته بر اساس معادلات دیفرانسیل جزئی سیال پایه‌گذاری نشده است؛ ولی از شکل خاص گسسته شده این معادلات استفاده می‌شود. در این شیوه، روش الحاقی بسیار محکم‌تر به حل کننده جریان متصل شده و اطلاعات ارزشمندی از حساسیت داده‌ها بدست خواهد داد. همچنین از این روش نیز می‌توان در مسائلی که شامل توابع دیواره و شرایط مرزی و یا دارای فیزیک پیچیده هستند استفاده کرد. در این تحقیق از روش الحاقی گسسته استفاده می‌شود و معادلات الحاقی بر اساس روش گیلس [19] به شکل زیر بدست می‌آیند:

$$\left[\frac{\partial \boldsymbol{R}}{\partial \boldsymbol{w}}\right]^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\psi} = \frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{w}} \quad (14)$$

به طوری که $F=F(w,S)$ تابع ناظر، w بردار متغیرهای مربوط به سیال مانند فشار و سرعت‌ها که به متغیر حالت نامیده می‌شود، S متغیرهای کنترلی که از حل جریان بدست می‌آیند، ψ متغیر الحاقی و R نیز بیان کننده همگرایی در معادلات سیال می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R(w^0,w^1,\ldots,w^{M-1};S)=0 \quad (15)$$

M تعداد سلول‌ها در مسئله است. در حقیقت مقادیر F، R و همچنین مشتقات آن بعد از حل جریان بدست خواهد آمد و بر اساس معادلات الحاقی و با حل آن، متغیرهای الحاقی قابل رویت است. میزان حساسیت تابع ناظر به متغیرهای کنترلی نیز بر اساس روش الحاقی به صورت رابطه زیر بدست می‌آید:

$$g = \frac{dF}{dS} = \frac{\partial F}{\partial S} - \psi^{\mathrm{T}}\left[\frac{\partial \tilde{R}}{\partial S}\right] \quad (16)$$

بر خلاف سیستم الحاقی در معادله (14)، اثر متغیرهای طراحی در معادله فوق به صورت گرادیانی تعریف شده است، اگرچه بردار و ماتریس به صورت مشتقات جزئی تعریف شده‌اند. همانند نحوه محاسبه ترم‌های موجود در معادله (14)، فرایند محاسباتی $\mathrm{d}F/\mathrm{d}S$ و $\mathrm{d}R/\mathrm{d}S$ به وسیله روش متوسط اتوماتیک دیفرانسیلی[1] بدست می‌آیند [20].

4-نتایج و بحث

در این مطالعه، ارائه راه حلی که منجر به بهینه‌سازی و اصلاح آیرودینامیکی برج‌های مرتفع شود مورد توجه است. لذا ابتدا شبیه‌سازی سه بعدی سازه‌های بلند و اثرات جریان باد بر آیرودینامیک آن مورد توجه قرار گرفته و پارامترهای موثر بر آیرونیامیک برج بررسی می‌شود. سپس با استفاده از روش الحاقی پیوسته حساسیت این پارامترها بر بارهای آیرودینامیکی محاسبه شده و در نهایت با استفاده از روش الحاقی گسسته اصلاحات آیرودینامیکی ارائه خواهد شد. ساختمان مورد نظر به صورت یک مدل سفت بدون هیچ‌گونه تغییر شکل الاستیکی در نظر گرفته شده و دارای ارتفاع ثابت 160 متر، عرض و طول متغیر بین 80-40 متر بسته به نوع شکل سطح مقطع می‌باشد. البته در شبیه‌سازی عددی از مقیاس طول 1/400 استفاده شده تا انجام محاسبات ساده‌تر باشد. شرط مرزی ورودی به صورت یک تابع نمایی[2] برحسب ارتفاع تعریف می‌شود که به دلیل در نظر گرفتن لایه مرزی شکل گرفته در مجاورت زمین است.

$$u = U_H\left(\frac{y}{H}\right)^{\alpha} \quad (17)$$

$$I = I_H\left(\frac{y}{H}\right)^{\alpha} \quad (18)$$

به طوری که سرعت (U_H)، ضریب نمایی (α) و شدت توربولانسی (I_H) در سطح فوقانی ساختمان به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شوند. شرایط جریان مد نظر در جدول (1) بیان شده است.

1- Mean of automatic differentiation
2- Power-Low

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]

جدول 1 مشخصات جریان باد و شدت توروبولانسی در شرایط مختلف جریان

Table 1 Flow characteristics and turbulence intensity in the different flow conditions

	رینولدز	ضریب نمایی	شدت توربولانسی	سرعت (متر بر ثانیه)
شرایط جوی اول	5.6×10^4	0.24	19	8
شرایط جوی دوم	4.5×10^4	0.13	15	6.5
شرایط جوی سوم	3.5×10^4	0.07	10	5

شبکه محاسباتی که حول ساختمان بکار رفته از نوع H بوده و ابعاد حوزه حل نیز به اندازه کافی بزرگ و مناسب در نظر گرفته شده است تا شرایط مرزی بر جریان نزدیک دیواره اثر نگذارند(شکل 1). در حالت استقلال از دامنه حل، فاصله مرز خروجی تا برج به اندازه 20 برابر اندازه طول ضلع ساختمان، مرزهای کناری و مرز بالا و همچنین مرز ورودی هر کدام 8 برابر اندازه طول ضلع برج فاصله دارند. تعداد سلول‌ها در حالت استقلال از شبکه، در مرز ورودی و خروجی برابر 18000 و تعداد آنها در مرزهای آزاد 21600 سلول در نظر گرفته شده است. تعداد سلول‌ها بر روی دیواره برج نیز برابر 6000 بوده به طوری که مقدار y^+ در این مرز کمتر از واحد می باشد. برای شبکه‌بندی نیز از شبکه با سازمان استفاده شده و در نواحی نزدیک به دیوار، شبکه لایه مرزی بکار گرفته نشده است ولی اندازه سلول‌ها در نواحی نزدیک به دیواره به گونه‌ای انتخاب شده که مقدار y^+ کمتر از واحد باشد.

شرایط مرزی در نظر گرفته شده به اینصورت است که در مرز ورودی شرط مرزی سرعت و در مرز خروجی شرط مرزی فشار به عنوان شرایط مرزی فیزیکی در نظر گرفته شده اند. همچنین مرزهای کناری و سطح بالا دارای شرط مرزی تقارنی بوده و برای سطح پایین و ساختمان شرط مرزی دیواره بدون لغزش در نظر گرفته شده است.

بعد از تعیین حوزه حل جریان و شرایط مرزی، دستیابی به شبکه‌ای که از جواب مستقل باشد از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین منظور در اولین گام، اثر تعداد سلول‌ها بررسی شده و جریان حول ساختمان مر بعی شکل که جریان هوا بدون زاویه حمله به آن برخورد می کند، با 3 شبکه با تعداد سلول‌های متفاوت حل شده است. سپس ضریب پسا اعمالی بر ساختمان به ازای این شبکه‌ها مقایسه شده است (جدول 2)؛ به طوری که جدول ذیل نشان می‌دهد که وقتی تعداد سلول‌ها به 2880000 سلول می رسد ضریب پسا نزدیک‌ترین مقدار به نتایج تجربی را دارد.

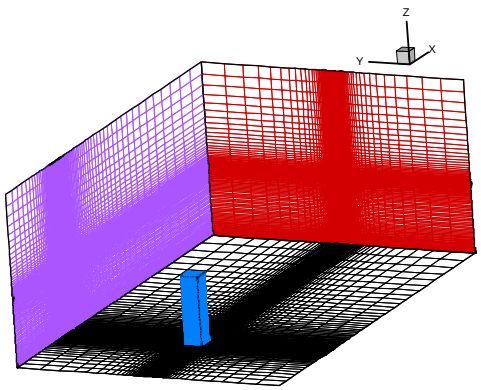


Fig. 1 Domain, mesh and model

شکل 1 دامنه حل، شبکه بندی و مدل

جدول2 مقایسه ضریب پسا به ازای تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی حول برج مربعی در شرایط جوی 1

Table 2 Comparison of drag coefficient according to different mesh cells around the square building in BL1

تعداد سلول	ضریب پسا	درصد خطا(%)
548000	0.986	5.2
2880000	1.024	1.5
5270000	1.11	6.9
ضریب پسا تجربی [6]	1.04	

به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی، بخشی از نتایج حاصله با نتایج تجربی منتشر شده [6] مقایسه شدند که انطباق بسیار خوب بین نتایج تایید کننده صحت حل عددی می‌باشد(جدول3). همچنین در شکل (2) ضریب پسا حاصله از حل عددی با نتایج تجربی [6] مقایسه شده‌اند که تطابق بین این ضرایب نشان‌دهنده صحت شبیه‌سازی می‌باشد.

چالش اصلی در شبیه‌سازی عددی جریان باد محیطی، مدل کردن جدایش‌ها و گردابه‌های تشکیل شده حول ساختمان‌ها است. در ابتدا تلاش شد که با استفاده از مدل‌های توربولانسی متوسط‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس این جریان را شبیه‌سازی کنند [21-28]؛ ولی از آنجایی که فرایند متوسط گیری رینولدز سبب فیلتر کردن بخشی از اطلاعات نوسانی جریان که نقش پررنگی در حرکت دینامیکی سازه‌ها دارند می‌شود، لذا

جدول 3 مقایسه ضریب پسا ساختمان مربعی با نتایج منتشر شده [6] به ازای شرایط مختلف

Table 3 Comparison of the present drag coefficient with published results [6] around the square building in different conditions

زاویه حمله	شرایط جوی دوم			شرایط جوی اول		
	درصد خطا(%)	ضریب پسا [6]	ضریب پسا	درصد خطا(%)	ضریب پسا [6]	ضریب پسا
0	1.4	1.19	1.173	1.5	1.04	1.024
15	7.6	0.98	1.054	4.8	0.9	0.943
30	8.3	0.99	0.908	11.7	0.92	0.812
45	9.8	1.02	1.120	11.1	0.94	1.044

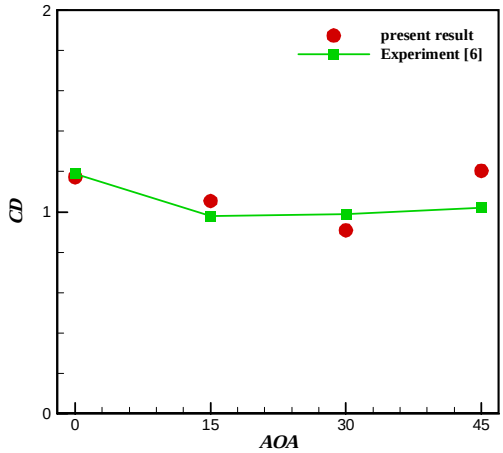


Fig. 2 Comparison of the present drag coefficients with the experimental ones [6] according to various *AOA* around the square building in BL2

شکل 2 مقایسه ضریب پسا حاصله از حل عددی با نتایج تجربی [6] بر حسب زوایای حمله مختلف حول ساختمان مربعی در شرایط جوی 2

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]

به نتایج حاصله نمی‌توان اتکا کرد. شبیه‌سازی ادی بزرگ یکی دیگر از انواع مدل توربولانسی می‌باشد که ادی‌های بزرگ توربولانسی را به طور صریح بدستمی‌دهد و ادی‌های کوچک را بر اساس مدل‌های مقیاس زیر شبکه‌ها[1] مدلسازی می‌کند. اما این روش به شبکه بسیار ریز در لایه مرزی و نواحی نزدیک به دیواره نیاز دارد تا بتواند ساختار آشفتگی‌های کوچک را بدست دهد که این امر منجر به افزایش هزینه محاسباتی خواهد شد. اما در ادامه روش شبیه‌سازی ادی جدا شده[2] که یک مدل توربولانسی ترکیبی است مورد استفاده قرار گرفت [29-31]. با توجه به سه بعدی بودن حوزه حل و نیز آشفته بودن جریان اطراف ساختمان‌های بلند، بررسی مدل‌های توربولانسی مختلف حائز اهمیت بوده و تعیین مناسب‌ترین مدل توربولانسی می‌تواند سبب افزایش دقت حل در شبیه‌سازی گردد.

به این منظور، جریان حول ساختمان مربعی شکل به ازای مدل‌های توربولانسی مختلف حل شده و ضریب پسای حاصله در جدول (4) با نتایج تجربی مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل توربولانسی شبیه‌سازی ادی جدا شده تاخیری کمترین اختلاف را با نتایج تجربی دارد و مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی‌های ساختمان‌های بلند است.

همانطور که قبلا بیان شد چهار پارامتر سطح مقطع ساختمان، زاویه برخورد جریان سیال با آن، نحوه قرارگیری سازه در مقابل باد و شرایط محیطی در ابتدا بررسی شد. در مبحث آیرودینامیک برج‌ها، یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی که اثر مستقیمی بر آنها دارد، شکل سطح مقطع ساختمان است که در این تحقیق چهار ساختمان با شکل سطح مقطع‌های مربع، دایره، مستطیل و مثلث مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (5) ضریب پسای این ساختمان‌ها با هم مقایسه شده‌اند و ساختمان دایره‌ای کم‌ترین ضریب پسا را دارد که این رفتار به خاطر شکل خاص آن است؛ در حالی که بیشترین ضریب پسا به ساختمان با سطح مقطع مربعی اعمال می‌گردد.

همچنین در این جدول ضرایب پسا به ازای شرایط جوی متفاوت مقایسه شده و نتایج حاصله نشان می‌دهند که با افزایش سرعت ضریب پسا کاهش می‌یابد.

جدول 4 بررسی اثرات مدل‌های توربولانسی مختلف و درصد خطا

Table 4 Study on the effects of various turbulence models and the error

مدل توربولانس	ضریب پسا	درصد خطا
اسپالارت-آلماراس[3]	1.401	34.7
کی-اپسیلون استاندارد[4]	1.245	22.6
کی-اپسیلوننوع گروه نرملایز شده رینولدزی[5]	1.553	49.3
کی-اپسیلون تحقق‌پذیر[6]	1.425	37
کی-امگا نوعاستاندارد	1.635	57.2
کی-امگا نوع انتقال تنش برشی	0.998	4
روش تنش رینولدز[7]	0.866	16.8
شبیه‌سازی ادی بزرگ	1.057	1.7
شبیه‌سازی ادی جدا شده تاخیری	1.024	1.5
[6]	1.04	

1- subgrid-scale
2- Detached-Eddy Simulation (DES)
3- Spalart–Allmaras
4- k – ε Standard
5- k – ε Re-Normalization Group (RNG)
6- k – εRealizable
7- Reynolds Stress Method (RSM)

جدول 5 مقایسه ضریب پسا ساختمان‌ها با سطح مقطع متفاوت به ازای شرایط مختلف

Table 5 Comparison of the drag coefficient of different buildings in several flow conditions

	شرایط جوی اول	شرایط جوی دوم	شرایط جوی سوم
مربع	1.024	1.173	1.199
دایره	0.423	0.4021	0.385
مستطیل	1.176	1.230	1.268
مثلث	0.871	0.846	0.84

دلیل این امر را می‌توان به نحوه شکل‌گیری لایه مرزی بر سطوح این ساختمان‌ها مرتبط دانست.

علت کم بودن ضریب پسای ساختمان دایره‌ای را می‌توان در اختلاف توزیع ضریب فشار سطح جلو و پشت ساختمان جستجو کرد. در شکل (3) توزیع ضریب فشار در سطح جلویی و سطح پشت ساختمان‌های مختلف در راستای عمودی آن با هم مقایسه شده اند. هر چه اختلاف فشار کم‌تر باشد نشان‌دهنده نیروی پسای کم‌تری خواهد بود. همانطور که از شکل مشخص است این اختلاف فشار برای ساختمان‌های دایره‌ای کم‌ترین اختلاف را در بین همه ساختمان‌ها دارد.

البته نحوه قرارگیری سازه در مقابل جریان باد نیز تاثیر بسزایی دارد، به طوری که اگر نوک ساختمان مثلثی در مقابل جریان باد قرار گیرد و یا اینکه به صورت برعکس باشد بر مقدار نیروهای اعمالی بر سازه اثر دارد. به همین منظور این دو سازه مورد بررسی قرار گرفته اند. برای ترسیم بهتر این تمایز، خطوط جریان حول ساختمان مثلثی با موقعیت قرارگیری متفاوت در شکل (4) نشان داده شده است.

نکته دیگری که از مقایسه ضرایب پسای ساختمان‌ها می‌توان دریافت این است که ساختمان مستطیلی ضریب پسا کمتری نسبت به مربعی دارد. علت این امر را می‌توان ناشی از بیشتر بودن طول ضلع مستطیل نسبت به مربع دانست، هرچند که عرض مستطیل با طول ضلع مربع برابر است. از پارامتر موثر دیگر بر آیرودینامیک سازه‌های بلند، جهت جریان باد و زاویه برخورد آن با سازه می‌باشد. در این تحقیق، اثرات عبور جریان سیال با زوایای 0، 15 و 30 درجه به ساختمان‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل (5) ضریب پسا ساختمان‌های متفاوت به ازای زوایای حمله مختلف رسم شده است.

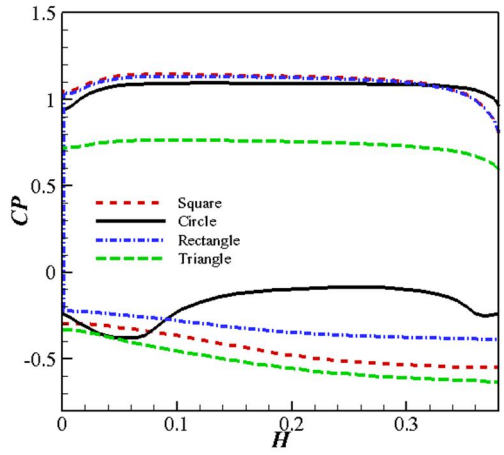


Fig. 3 Comparison of the pressure coefficient distributions on the front and back surfaces of the several buildings at *AOA* = 0, BL2

شکل 3 مقایسه توزیع ضریب فشار روی سطوح جلو و پشت ساختمان‌های مختلف در جوی 2 و زاویه حمله صفر درجه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]

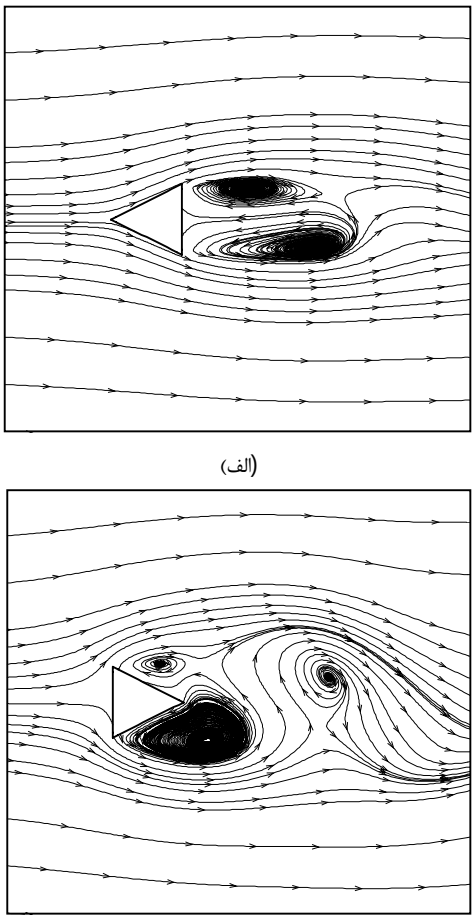


Fig. 4 Stream line distribution around the triangular building in the two different positions(a) direct, (b) reverse at *AOA* = 0, BL3

شکل 4 توزیع خطوط جریان در اطراف ساختمان مثلثی با موقعیت قرارگیری (الف) مستقیم، (ب) معکوس در شرایط جوی 3 و زاویه حمله صفر درجه

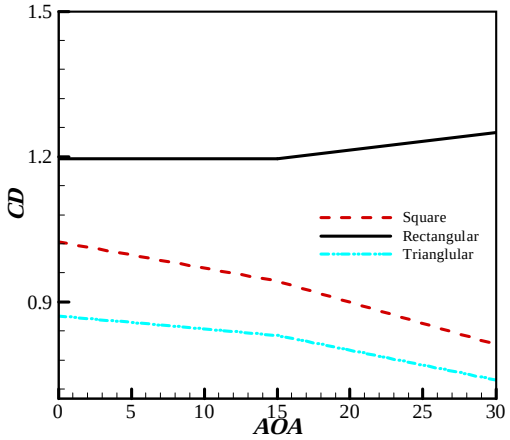


Fig. 5 Comparison of the drag coefficient of several buildings in different angles of attack at BL1

شکل 5 مقایسه ضریب پسا به ازای زوایای حمله مختلف در ساختمان‌های متفاوت در شرایط جوی 1

همانطور که از شکل پیدا است هر چه زاویه برخورد جریان باد به ساختمان بیشتر می‌شود ضریب پسا کاهش می‌یابد. البته فقط در ساختمان مستطیلی با افزایش زاویه حمله، این ضریب روند افزایشی دارد. علت این رفتار معکوس را می‌توان ناشی ازشکل خاص آن دانست. از آنجایی که در ساختمان مستطیلی شکل طول سطوح کناری ساختمان بیشتر از عرض آن است به ازای افزایش زاویه حمله، جریان باد با سطح بیشتری از بدنه ساختمان برخورد می‌کند و مانعی که در مقابل جریان قرار گرفته، بزرگ‌تر خواهد بود. به همین دلیل ضریب پسا رشد پیدا می‌کند. با توجه به اینکه در این تحقیق فاکتورهای اساسی موثر بر عملکرد آیرودینامیکی ساختمان‌های مرتفع مورد بررسی قرار گرفته است، لذا شناسایی اینکه چه پارامتری اثرگذاری بیشتری دارد می‌تواند در طراحی بهینه آیرودینامیکی برج‌ها کمک شایانی کند.

به همین دلیل از روش الحاقی پیوسته استفاده شده و میزان حساسیت (تاثیرگذاری) هر یک از این فاکتورها ارزیابی شده است. شکل (6) به مقایسه حساسیت‌های پارامترهای مورد مطالعه بر ضریب برآ برج پرداخته است و بیان‌کننده این مطلب است که پارامتر شکل ساختمان بیشترین تاثیرگذاری را بر روی این ضریب داشته و سپس موقعیت قرارگیری ساختمان به عنوان دومین عامل تاثیرگذار می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در صورت نیاز به تغییر در مقدار ضریب برآ ساختمان بلند، مهم‌ترین پارامتر شکل آن می‌باشد و به دلیل وابستگی کم‌تر این ضریب به شرایط جوی، می‌توان گفت که تقریبا مستقل از آن است.

شکل (7) نیز میزان حساسیت پارامترهای مختلف بر ضریب پسا را نشان می‌دهد و چنین برمی‌آید که این ضریب نیز بیشتر به شکل سازه وابسته است.

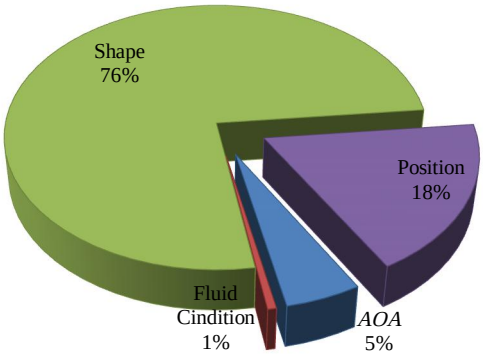


Fig. 6 The lift sensitivity of tall buildings based on the several parameters; building shape, position of buildings, angle of attack and atmospheric conditions

شکل6 میزان حساسیت ضریب برآ ساختمان‌های بلند به پارامترهای شکل، موقعیت قرارگیری ساختمان، زاویه حمله و شرایط جوی

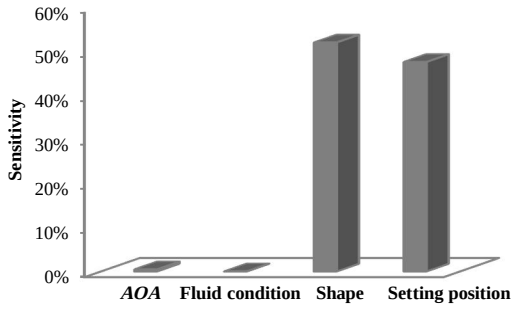


Fig. 7 The drag sensitivity of the tall buildings based on the various parameters; building shape, position of buildings, angle of attack and atmospheric conditions

شکل 7 میزان حساسیت ضریب پسا ساختمان‌های بلند به پارامترهای شکل، موقعیت قرارگیری ساختمان، زاویه حمله و شرایط جوی اطراف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]

از مقایسه این دو شکل نیز می‌توان دریافت که زاویه حمله جریان باد حدود 5% از مقدار ضریب برآ را تشکیل می‌دهد، ولی میزان تاثیرگذاری این پارامتر بر روی ضریب پسا 0.5% است. به عبارت دیگر، زاویه حمله 10 برابر تاثیر بیشتری بر ضریب برآ در مقایسه با ضریب پسا دارد.

مهمترین نتیجه‌ای که می‌توان از میزان حساسیت پارامترهای موثر بر آیرودینامیک ساختمان‌ها دریافت، این است که شکل سطح مقطع برج‌ها بیشترین اثرگذاری را دارد و در صورت نیاز به اصلاح آیرودینامیکی، می‌توان تغییراتی در آن ایجاد کرد. اما بزرگ‌ترین چالش پیشرو این است که کدام قسمت از برج اثر بیشتری بر این بارهای آیرودینامیکی دارد. آنچه که می‌توان ادعا کرد فهم این مطلب به هیچ عنوان از طریق تست‌های تونل باد امکان‌پذیر نیست و حتی در شبیه‌سازی‌های عددی نیز چنین امکانی فراهم نشده است. لذا در این تحقیق، روش الحاقی گسسته برای ارزیابی مناطق مختلف ساختمان استفاده شده و بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی، معادلات الحاقی در هر سلول حل و میزان حساسیت قسمت‌های مختلف ساختمان بدست می‌آید.

از آنجایی که ساختمان با سطح مقطع مربعی تحت بار آیرودینامیکی بیشتری قرار دارد و از طرفی از این نوع ساختمان عملا استفاده بیشتری می‌شود، لذا لزوم اصلاح آیرودینامیکی در آن بیشتر به چشم می‌آید و به همین دلیل معادلات الحاقی حول این نوع ساختمان حل شده است. در شکل (8) بردار حساسیت حول برج مربعی ترسیم شده است و کانتور حساسیت به شکل نیز نمایش داده شده است. همانطور که از شکل مذکور قابل دریافت است بیشترین حساسیت را لبه‌های جلویی ساختمان به خود اختصاص دادند و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای اصلاح آیرودینامیکی این برج، با تغییر لبه‌های آن می‌توان کاهش چشمگیری در بارهای آیرودینامیکی وارده ایجاد کرد. لذا برای کاهش بارهای وارده می‌توان گوشه‌های ساختمان را به صورت پخ درآورد. حالت‌های مختلفی از اصلاح گوشه‌ها را می‌توان در نظر گرفت که در شکل (9) شماتیک آن‌ها به نمایش گذاشته شده است؛ به طوری که اندازه این اصلاحات حدود 10% عرض ساختمان در نظر گرفته شده است.

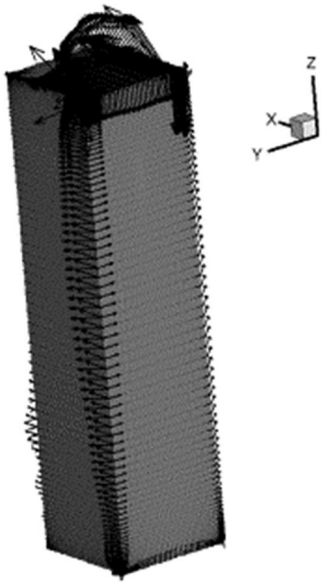


Fig. 8 Sensitivity vector around the square building at *AOA* = 0, BL1

شکل 8 بردار حساسیت حول ساختمان مربعی در شرایط جوی 1 و زاویه حمله صفر درجه

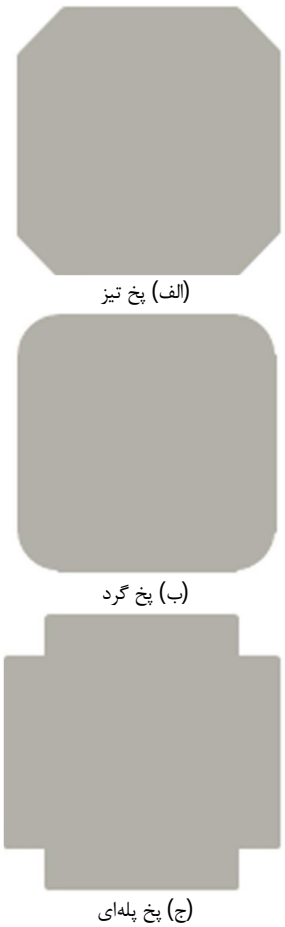


Fig. 9 Aerodynamic modification of a designed square section based on Adjoint Method

شکل 9 اصلاح آیرودینامیکی سطح مقطع مربعی طراحی شده بر اساس آنالیز الحاقی

در جدول (6) ضریب پسا سازه مربعی و ساختمان‌هایی با اصلاح آیرودینامیکی مقایسه شده اند. همانطور که این جدول نشان می‌دهد کل نیروهایی که به سازه‌های پخی وارده می‌شود نسبت به سازه مربعی کاهش یافته است. به عبارت دیگر این جدول بیان می‌کند که در صورت استفاده از پخ در گوشه‌های ساختمان نیروهای وارده به آن کاهش می‌یابد.

علت این کاهش را می‌توان ناشی از اصلاحات آیرودینامیکی انجام شده در گوشه‌های ساختمان دانست. این اصلاحات سبب می‌شوند که جریان سیال راحت‌تر از اطراف ساختمان عبور کرده و حتی سبب کاهش گردابه‌های تشکیل شده در پشت ساختمان و نیز کناره‌های آن می‌شوند.

در شکل (10) خطوط جریان سیال عبوری از اطراف این سازه‌ها بلند، مقایسه شده‌اند. شکل (10)-الف خطوط جریان حول ساختمان مربعی و شکل (10)-ب خطوط جریان سیال حول ساختمان پخ گرد را نشان می‌دهد. همانطور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، با اضافه کردن پخ در گوشه‌ها جریان سیال با سرعت بیشتری از روی سطوح کناری ساختمان عبور کرده و جدایش جریان اتفاق نمی‌افتد. همچنین گردابه‌هایی که در پشت ساختمان مربعی تشکیل شده بسیار بزرگ‌تر از ساختمان پخی است و به همین دلیل ضریب پسای این ساختمان مقدار بیشتری دارد.

همچنین در سطوح کناری ساختمان مربعی جدایش جریان اتفاق افتاده و گردابه‌هایی بر روی این دیواره‌ها تشکیل شده است. به همین علت است که جریان باد به این ساختمان گشتاور بیشتری اعمال می‌کند. البته این

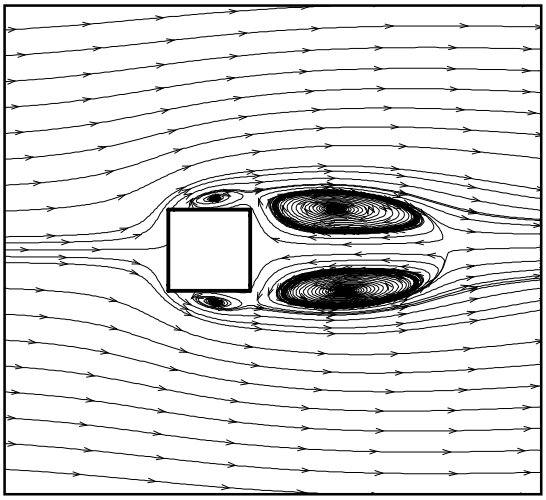
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]

اصلاحات سبب شده است که میزان حساسیت جریان به شکل برج کاسته شود. در شکل (11) کانتور حساسیت جریان به شکل برج به ازای سه ساختمان با اصلاحات آیرودینامیکی انجام شده به تصویر کشیده شده است. از مقایسه این شکل‌ها با شکل (8) به وضوح می‌توان دید که این اصلاحات انجام شده بسیار تاثیرگذار بوده و از شدت حساسیت کاسته شده است.

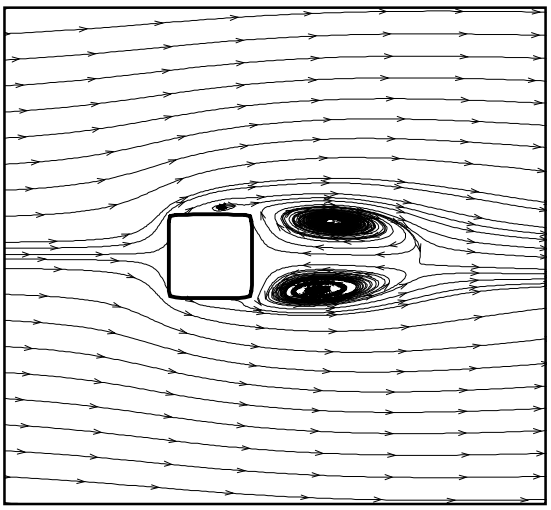
جدول 6 ضرایب پسا، برآ و گشتاور خمشی وارده بر ساختمان مربعی و پخی در شرایط جوی 1 و زاویه حمله صفر درجه

Table 6 Drag, lift and bending moment coefficients loaded on the square and oblong buildings at BL1, *AOA* = 0

	ضریب برآ	ضریب پسا
مربع	-0.0004	1.024
پخ تیز	-0.0033	0.783
پخ گرد	0.0068	0.7044
پخ پله‌ای	-0.0065	0.745



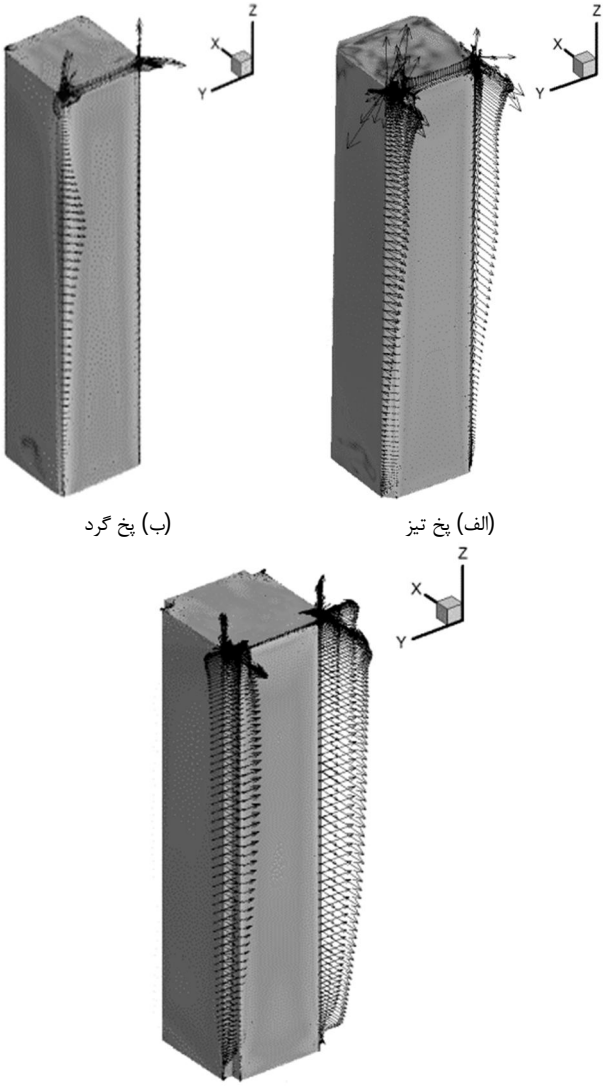
(الف)



(ب)

Fig. 10 Comparison of the stream lines around the buildings(a) square, (b) roundness oblong at *AOA* = 0, BL1

شکل 10 مقایسه خطوط جریان حول ساختمان (الف)مربعی، (ب)پخ گرد در شرایط جوی 1 و زاویه حمله صفر درجه



(الف) پخ تیز (ب) پخ گرد

(ج) پخ پله‌ای

Fig. 11 Sensitivity vector around the aerodynamic modified buildings at *AOA* = 0 and BL1, (a) chamfer, (b) roundness, (c) single recession

شکل 11 بردار حساسیت حول برج های اصلاح شده آیرودینامیکی در شرایط جوی 1 و زاویه حمله صفر درجه

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک تکنیک جدید ارائه شده که در بهینه‌سازی آیرودینامیکی برج‌های مرتفع و اصلاح شکل آن می‌تواند کمک شایانی نماید. این تکنیک تلفیقی از شبیه‌سازی عددی جریان سیال حول جسم و روش الحاقی است. ابتدا چهار پارامتر بسیار تاثیرگذار بر آیرودینامیک برج شامل نوع سطح مقطع، موقعیت قرارگیری آن، شرایط جریانی متفاوت و زاویه برخورد جریان به ساختمان در نظر گرفته شده و با استفاده از روش الحاقی پیوسته، میزان حساسیت این پارامترها بر نیروها و گشتاور آیرودینامیکی بدست آمده است. نتایج حاکی از این امر است که شکل سطح مقطع برج 76% بارهای آیرودینامیکی را شامل می‌شود. البته به دلیل عظیم بودن برج‌ها، ایجاد تغییرات کلی چندان مطلوب به نظر نمی‌رسد و هزینه زیادی در ساخت سازه را تحمیل می‌کند. به همین دلیل، با گسسته سازی معادله الحاقی در تمامی سلول‌های حوزه حل، مکان‌هایی از برج که اثرگذاری بیشتری دارند مشخص

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]

شد و با ایجاد تغییرات مطلوب در آن نواحی، اصلاحات آیرودینامیکی انجام شده که در نتیجه منجر به کاهش 31% بارهای وارده بر پیکره برج شده است. لذا این میزان کاهش چشمگیر بارهای وارده دلیل روشنی بر کارا بودن این تکنیک است و با صرف هزینه بسیار کم می‌توان بهینه‌سازی مطلوب را بر سازه‌های بسیار عظیم انجام داد. با توجه به ثابت شدن توانایی‌های این روش در این تحقیق، می‌توان از این متد به عنوان یک راه حل بسیار کارآمد در بسیاری از علوم مهندسی دیگر نیز استفاده کرد.

6- تقدیر و تشکر

این مقاله نتیجه طرح پژوهشی به شماره 17898 در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و با حمایت مالی آن سازمان انجام گردیده است.

7- مراجع

[1] T. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura, Mitigation of motion of all buildings with recent applications, *Wind and Structures*, Vol. 2, No. 3, pp. 201–251, 1999.

[2] Y. Tamura, T. Miyagi, The effects of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83, No. 1, pp. 135–145, 1999.

[3] Y. M. Kim, K. P. You, N. H. Ko, Across-wind responses of an aeroelastic tapered tall buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 8, pp. 1307–1319, 2002.

[4] P. Irwin, J. Kilpatrick, A. Frisque, Friend or foe wind at height, *CTBUH 8th World Congress*, pp. 336–342, 2008.

[5] Y. C. Kim, J. Kanda, Effects of taper and set-back on wind force and wind-induced response of tall buildings, *Journal of Wind and Structures*, Vol. 98, No. 6, pp. 499–517, 2010.

[6] Y. C. Kim, J. Kanda, Characteristics aerodynamic forces and pressures on square plan buildings with height variations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, No. 8, pp. 449–465, 2010.

[7] J. Xie, Wind engineering studies for Shanghai Center Tower, *RWDI report*, 2009.

[8] K. T. Tse, P. A. Hitchcock, K. C. S. Kowk, S. Thepmongkorn, C. M. Chan, Economic perspectives of aerodynamic treatments of square tall buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, No. 9, pp. 455–467, 2009.

[9] Y. Tamura, Y. C. Kim, H. T. Anaka, E. K. Bandi, A. Yoshida, K. Ohtake, Aerodynamic and response characteristics of super-tall buildings with various configurations, keynotes. In: *Proceedings of the Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Chennai, India, 2013.

[10] H. Tanaka, Y. Tamura, K. Ohtake, M. Nakai, Y. C. Kim, Experimental Investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 107–108, No. 1, pp. 179–191, 2012.

[11] J. Xie, Aerodynamic optimization of super-tall buildings and its effectiveness assessment, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 130, No. 1, pp. 88-98, 2014.

[12] Y. Zhang, R. A. Khurram, W. G. Habashi, Multiscale finite element method applied to detached-eddy simulation for computational wind engineering, *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling Springer*, Berlin, Germany, 2012.

[13] Y. Tominaga, S. I. Akabayashi, T. Kitahara, Y. Arinami, Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations, *Building and Environment*, Vol. 84, No. 1, pp. 204-213, 2015.

[14] P. A. Irwin, Bluff body aerodynamics in wind engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 6, pp. 701-712, 2008.

[15] P. R. Spalart, W. H. Jou, M. K. Strelets, S. R. Allmaras, Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach, In: *Proceedings of the First AFOSR International Conference on DNS/LES*, Greyden Press.1997.

[16] P. R. Spalart, S. Deck, M. L. Shur, K. D. Squires, M. K. Strelets, A. Travin, A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 20, No. 3, pp. 181–195, 2006.

[17] M. S. Gritskevich, A. V. Garbaruk, J. Schütze, F. R. Menter, Development of DDES and IDDES Formulations for the k-ω Shear Stress Transport Model, *Flow, Turbulence and combustion*, Vol. 88, No. 3, pp. 431-449, 2012.

[18] F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, *Proceedings of the fourth international symposium on Turbulence, heat and mass transfer*, Begell House, Redding CT2003.

[19] M. B. Giles, N. Pierce, An introduction to the adjoint approach to design, *Flow, turbulence and combustion*, Vol. 65, No. 3, pp. 393-415, 2000.

[20] A. C. Marta, W. E. Van, J. J. Alonso, C. A. Mader, J. R. R. A. Martins, ADjoint: A methodology for the development of discrete adjoint solvers using automatic differentiation tools, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 21, No. 10, pp. 307-327, 2007.

[21] Y. Yang, M. Gu, S. Q. Chen, X. Y. Jin, New inflow boundary conditions for modeling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, No. 2, pp. 88–95, 2009.

[22] M. S. Aubé, W. G. Habashi, H. Z. Wang, D. Torok, On the impact of anisotropic mesh adaptation on computational wind engineering, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 63, No. 7, pp. 877–886, 2010.

[23] M. Lateb, C. Masson, T. Stathopoulos, C. Bédard, Comparison of various types of k-epsilon models for pollutant emissions around a two-building configuration, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 115, No. 1, pp. 9–21, 2013.

[24] G. Su S. Chen, Numerical Simulation of Wind Pressures and Wind Environment around a Complex-Shaped High-Rise Building, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 23, No. 8, pp. 144-149, 2006.

[25] S. Huang Q. Li, S. Xu, Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, No. 5, pp. 612-627, 2007.

[26] A. L. Braun, A. M. Awruch, Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation, *Computers & Structures*, Vol. 87, No. 9, pp. 564-581, 2009.

[27] S. Nie, X. Zhou, T. Zhou, Y. Shi, Numerical simulation of 3D atmospheric flow around a Bluff Body of CAARC Standard High-Rise Building Model, *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 6-12, 2009.

[28] Y. Zhang, W. G. Habashi, R. A. Khurram, Hybrid RANS/LES method for FSI simulations of tall buildings, *World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM12)*, Seoul, Korea, 2012.

[29] S. E. Haupt, F. J. Zajaczkowski, L. J. Peltier, Detached eddy simulation of atmospheric flow about a surface mounted cube at high Reynolds number, *Journal Fluids Engineering*, Vol. 133, No. 3, pp. 1-8, 2011.

[30] M. Huang, I. Lau, C. Chan, K. Kwok, G. Li, A hybrid RANS and kinematic simulation of wind load effects on full-scale tall buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, No. 11, pp. 1126-1138, 2011.

[31] Y. Zhang, W. G. Habashi, R. A. Khurram, Predicting wind-induced vibrations of high-rise buildings using unsteady CFD and modal analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 136, No. 1, pp. 165-179, 2015.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.41.0]