



بررسی و اصلاح آیرودینامیکی مقطع برج بین المللی تهران در معرض بادهای سالیانه

علی صابرمقدم، علیرضا جهانگیریان*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۸
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

کلمات کلیدی:

دینامیک سیالات محاسباتی
ضرایب آیرودینامیکی
جریان باد
ریزش گردابه
مقطع برج بین المللی تهران

خلاصه: مطالعه جریان باد حول برجهای بلند به دلیل ریزش نامتقارن گردابه ها و در نتیجه وارد شدن نیروهای نوسانی به سازه از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. هر چند تحلیل این پدیده در شرایط خاص از قبیل سرعت و جهت جریان باد قبلاً صورت پذیرفته ولی تاکنون یک معیار کمی برای ارزیابی آیرودینامیکی وضعیت برج در معرض انواع بادهای با سرعتها و در جهات مختلف با توجه به موقعیت خاص جغرافیایی محل صورت پذیرفته است. در پژوهش حاضر شبیه سازی عددی جریان باد حول هندسه مقطع برج بین المللی ۵۶ طبقه تهران در معرض سرعت های مختلف باد در جهات متفاوت انجام و نیروهای آیرودینامیکی و دامنه و فرکانس نوسانات آنها محاسبه گردیده است. سپس با توجه به نامطلوب بودن هرگونه نیروی آیرودینامیکی وارده به برج از دیدگاه سازه ای، از ترکیب مقادیر متوسط و دامنه نوسانات ضرایب آیرودینامیکی در هر سرعت و زاویه وزش در شهر تهران معیاری برای ارزیابی آیرودینامیکی برج بین المللی تهران در معرض بادهای سالیانه ارائه شده است. محاسبات عددی به صورت تراکم ناپذیر ناپایا و با بهره گیری از مدل توربولانسی ترابرد تنش برشی کی- امگا صورت پذیرفته اند. بحرانی ترین سرعتها و موقعیت های وزش باد بر برج از نظر مجموع ضرایب متوسط و دامنه نوسانات ضرایب برآ و پسا موقعیت وزش صفر و بیست درجه به ترتیب در سرعت های باد ۱۵ و ۱۰ متر بر ثانیه تشخیص داده شد. به منظور بهبود خواص آیرودینامیکی از جمله کاهش مقادیر متوسط و دامنه نوسانات نیروهای آیرودینامیکی، تغییراتی در هندسه برج اعمال گشته و هندسه جدیدی موسوم به هندسه اصلاحی معرفی و ضرایب آیرودینامیکی آن با هندسه فعلی برج مقایسه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده هندسه اصلاحی در همه موقعیت های بحرانی وزش باد دارای مجموع ضرایب آیرودینامیکی کمتری نسبت به هندسه اصلی بوده و به صورت میانگین کاهش ۲۱ درصدی مجموع ضرایب آیرودینامیکی را نسبت به هندسه اصلی سبب می شود.

۱- مقدمه

نیروهای وارده بر برجها از طریق وزش باد، موسوم به نیروهای آیرودینامیکی، نقش پراهمیتی در طراحی و ملاحظات سازه ای برج بازی می کنند. نیروهای وارده بر برجها به دلیل وجود پدیده ریزش گردابه ها^۱ دارای نوسان مقدار در طول زمان می باشد. وجود این نوسانات در نیروهای آیرودینامیکی سبب ایجاد پدیده ارتعاشات القایی گردابه ها^۲ در سازه برج می گردد. این ارتعاشات علاوه بر اینکه موجب بروز پدیده خستگی^۳ در سازه برج می شود، در صورت نزدیکی فرکانس پدیده ریزش گردابه ها با فرکانس

طبیعی برج، می تواند منجر به بروز پدیده خطرناک تشدید نیز گردد.

معماری نمای برجها معمولاً به گونه ای است که در برابر وزش جریان باد همانند یک جسم پخ^۴ عمل می کنند. پژوهش های بسیاری بر روی تأثیرات متقابل جریان و اجسام پخ صورت گرفته است. این پژوهشها با به صورت تجربی در تونل باد، یا به صورت شبیه سازی عددی جریان سیال موسوم به دینامیک سیالات محاسباتی^۵ انجام می شود. انجام محاسبات نیروهای آیرودینامیکی به وسیله شبیه سازی عددی می تواند با صرف هزینه کمتر، تقریب مناسبی از این نیروها در اختیار دهد.

برج بین المللی تهران^۶ یک برج مسکونی ۵۶ طبقه به ارتفاع ۱۶۲ متر

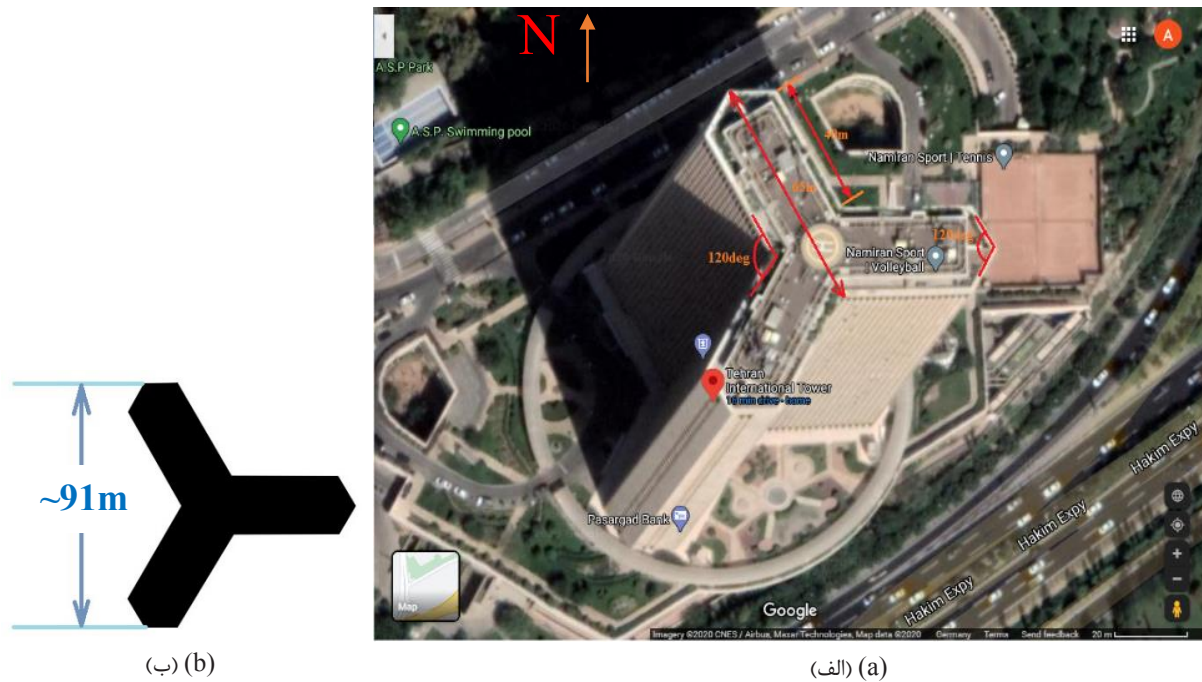
- 1 vortex shedding
- 2 Vortex Induced Vibrations (VIV)
- 3 fatigue

- 4 bluff body
- 5 Computational Fluid Dynamics
- 6 Tehran International Tower

* نویسنده عهده دار مکاتبات: ajahan@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱. (الف) تصویر ماهواره‌ای از برج بین‌المللی تهران، (ب) شکل مقطع مورد استفاده در محاسبه ضرایب آیرودینامیکی به همراه طول مشخصه

Fig. 1. (a) Satellite image of Tehran International Tower, (b) section used in calculating aerodynamic coefficients along with characteristic length

صورت تجربی، نتایج از لحاظ بهبود وضعیت آیرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. بر همه برج‌ها به جز برج با مقطع دایروی از دو جهت باد وزانده شد. ضرایب پسا و عدد استروهل در بازه اعداد رینولدز از ۲۰۰۰۰ الی ۱۴۰۰۰۰ به دست آورده شد. در پژوهش یو و کریم [۲] به صورت عددی و با استفاده از مدل‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰ جریان حول منشور با مقطع مربع به صورت دوبعدی و سه بعدی شبیه‌سازی گردید. مقادیر فشار متوسط و سرعت متوسط در جهت جریان با پژوهش‌های عددی و تجربی دیگر مقایسه شد. همچنین وابستگی ضریب فشار متوسط به ریزی شبکه و کوچکی گام زمانی با استفاده از قیاس با نتایج آزمایشگاهی بررسی گردید. برای تقطیع زمانی^۲ از روش‌های تفاضل مرکزی و کوپیک^۳ استفاده شد و در نهایت به واسطه انطباق بهتر با نتایج آزمایشگاهی روش کوپیک برگزیده گردید. در پژوهش کاوایی [۳] به صورت تجربی تأثیر پخ زدن، بریدن و گرد کردن گوشه‌ها در مقاطع به شکل مربع و مستطیل با نسبت

است که نزدیک به تقاطع بزرگراه‌های کردستان و حکیم واقع شده است. هندسه سطح مقطع این برج در پژوهش حاضر در عکس ماهواره‌ای و در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

به صورت ساده شده می‌توان هندسه برج بین‌المللی تهران را به صورت یک منشور با مقطع یک دوازده ضلعی به صورت شکل (۱-ب) دانست. پژوهش‌های بسیاری حول منشورها با سطوح مقطع مختلف انجام شده است. در این بخش مرور پژوهش‌هایی که بر روی منشورهایی با مقطع چندضلعی منتظم انجام شده صورت گرفته است. یکی از اهداف پژوهش حاضر تغییر شکل مقطع برج مورد بررسی به گونه‌ای است که نیروهای وارد بر آن کمتر شده یا دامنه نوسانات نیروها کاهش یابد. لذا بررسی پژوهش‌هایی که در آنها سعی شده با اعمال تغییراتی در شکل مقاطع گوناگون وضعیت آیرودینامیکی برج بهبود بخشیده شود نیز انجام شده است.

در پژوهش‌های اشیدا و آیوازا [۱] تغییراتی در مقطع برج‌های فرضی با سطح مقطع مثلث متساوی الاضلاع، مربع، دایره و Y شکل از قبیل پخ زدن، گرد کردن و یا بریدن قطعات مربعی از لبه‌ها انجام گردید و به

1 Large Eddy Simulation (LES)
2 Time discretization
3 QUICK

و با مدل‌های توربولانسی کی-اِپسیلون^۸ و ترابرد تنش برشی^۹ توزیع فشار بر سطوح مختلف یک برج با مقطع Y شکل در زوایای حمله صفر تا شصت به دست آمد. با توجه به اطاعات حاصله، دقت مدل توربولانسی کی-اِپسیلون از ترابرد تنش برشی بیشتر گزارش شده اما مدل ترابرد تنش برشی توانایی پیشبینی دقیق‌تر فشار در ناحیه با توربولانس بالا را داشته است. در پژوهش جباراج و کریستی [۸] به صورت عددی و با مدل توربولانسی ترابرد تنش برشی کی-امگا یک هشت ضلعی منتظم به صورت دوبعدی در زوایای حمله مختلف از صفر الی ۵۰ درجه در عدد رینولدز ۷۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت و نیروهای آیرودینامیکی وارده بر مقطع محاسبه گردید. با توجه به نتایج حاصله، زاویه وزش ۱۰ درجه دارای کمترین نیروهای پسای آیرودینامیک بوده است. در پژوهش یوان و همکاران [۹] تاثیرات باد بر ساختمان‌های با مقطع L شکل با نسبت‌های طول به عرض مختلف بوسیله شبیه‌سازی عددی به صورت دوبعدی و سه بعدی در پنج زاویه حمله و با مدل تنش رینولدز^{۱۰} بررسی گردید و وضعیت توزیع فشار روی سطوح مختلف به دست آورده شده است. در پژوهش یاگمور و همکاران [۱۰] با دو روش تجربی و عددی منشور با مقطع مثلث متساوی الاضلاع بررسی گردید. روش تجربی به وسیله سرعت سنجی تصویر ذره‌ها^{۱۱} در رینولدزهای ۲۹۰۰، ۵۸۰۰ و ۱۱۶۰۰ و روش عددی سه بعدی به وسیله شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تا رینولدز ۱۱۶۰۰۰ انجام شده و نمودارهای توزیع سرعت در پنج مقطع پشت جسم رسم گردیده است. همچنین کانتورهای توزیع سرعت متوسط در میدان به تصویر کشیده شده‌اند. بعلاوه مقادیر ضریب پسای متوسط و عدد استروهمال در رینولدزهای مختلف به دست آورده شده است. در پژوهش ینگ و همکاران [۱۱] با روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا^{۱۲} به صورت دوبعدی مقادیر ضریب پسای متوسط، توزیع ضریب فشار، توزیع سرعت، شکل جریان، عدد استروهمال در رینولدزهای ۲٫۵ میلیون، ۵ میلیون، ۱۰ میلیون و ۲۰ میلیون روی سیلندر با مقاطع مربع، شش ضلعی، هشت ضلعی، دوازده ضلعی و دایروی به دست آمد. در پژوهش دائمی و همکاران [۱۲] به صورت عددی تأثیر اعمال تغییراتی همانند پخ زدن و گرد کردن لبه‌های شکل مقطع مثلثی در یک برج بر نیروهای آیرودینامیکی بررسی گردید و ضریب پسا در همه حالات به دست آورده شد. کمترین میزان پسا در حالتی دیده می‌شود که لبه‌های مقطع مثلث گرد شده‌اند. در پژوهش

طول به عرض ۲ در معرض جریان با عدد رینولدز ۳۴۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت روش گرد کردن گوشه‌ها مؤثرترین ترین روش برای کاهش پدیده ارتعاشات القایی گردابه‌ها معرفی گردید. همچنین روش بریدن قطعات مربعی از گوشه‌ها با نسبت طول برش به طول مقطع برابر ۰/۰۵ به دلیل ایجاد پدیده تعدیل آیرودینامیک^۱ مؤثر بوده است. در پژوهش نجات و همکاران [۴] مقطع برج میلاد که به شکل چهار پر می‌باشد به صورت عددی و با مدل توربولانسی آر.ان.جی. کی-اِپسیلون^۲ شبیه‌سازی گردید. همچنین نیروهای برآ و پسای وارده بر برج محاسبه شد. بعلاوه نوسانات نیروهای آیرودینامیکی به دلیل پدیده ریزش گردابه مطالعه و کانتورهای سرعت در میدان حل عددی ترسیم گردید. در پژوهش ژو و همکاران [۵] به صورت عددی جریان حول منشور با مقطع مربع با مدل‌های توربولانسی مختلف از جمله مدل استاندارد کی-اِپسیلون^۳، مدل آر.ان.جی. کی-اِپسیلون، مدل کی-اِپسیلون تفکیک‌پذیر^۴، مدل استاندارد کی-امگا^۵ و مدل کی-امگا اس.اس. تی.^۶ در عدد رینولدز ۲۱۴۰۰ بررسی گردید. در نهایت مدل توربولانسی ترابرد تنش برشی کی-امگا بهترین تطابق با نتایج آزمایشگاهی را نشان داده است. سپس اثر اعمال تغییراتی بر هندسه مقطع از جمله پخ زدن و گرد کردن گوشه‌ها بر شکل جریان نزدیک سطح با مدل توربولانسی ترابرد تنش برشی کی-امگا مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده گردید که جریان در گوشه‌های بریده شده بیشتر به ضلع کناری مربع نزدیک می‌گردد، لذا احتمال چسبیدن دوباره جریان به سطح بیشتر بوده و نیروی پسا در این حالت کمتر است. در پژوهش کومر و همکاران [۶] به صورت تجربی شش مدل ساختمان با سطح مقطع مثلث متساوی الاضلاع، مثلث متساوی الاضلاع با دوران مقطع حول محور در راستای ارتفاع، به میزان ۶۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ درجه و یک مقطع مشابه مقطع برج بین المللی تهران با گوشه‌های گرد در عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ و در پنج زاویه حمله صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ بررسی گردید و نیروهای آیرودینامیکی پسا و برآ ارائه شدند. نهایتاً نتیجه گرفته شد که مقطع مثلثی با دوران ۳۶۰ درجه حول محور ارتفاع کمترین مقدار نیروهای نوسانی را دارد. در پژوهش موخرجی و همکاران [۷] به صورت تجربی در تونل باد و به صورت عددی و به وسیله حلگر انسیس سی. اف. اکس.^۷

8 K-Epsilon
9 Shear Stress Transport (SST)
10 Reynolds stress model
11 Particle Image Velocimetry (PIV)
12 Detached Eddy Simulation (DES)

1 aerodynamic damping
2 K-Epsilon RNG
3 Standard K-Epsilon
4 Realizable K-Epsilon
5 Standard K-Omega
6 K-Omega SST
7 ANSYS CFX

جهات و سرعت‌های مختلف توسط پژوهش‌های دیگر بررسی نشده است. همچنین یک معیار کمی برای ارزیابی آیرودینامیکی برج در یک موقعیت جغرافیایی ارائه شده که از این معیار می‌توان در انتخاب وضعیت قرارگیری هر برج با مقطع نامتقارن از لحاظ گردشی حول محور ارتفاع استفاده کرد.

۲- روش حل و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر، موسوم به ناویر-استوکس^۱ توسط دو دسته از معادلات دیفرانسیل جزئی^۲ که معروف به پایستگی جرم و پایستگی تکانه خطی‌اند، بیان می‌شوند [۱۷]. به دلیل مغشوش بودن جریان در شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر فرم میانگین‌گیری شده عدد رینولدز معادلات ناویر استوکس موسوم به ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز^۳ [۱۸] آورده شده است. در این معادلات خواص جریان سیال به دو بخش متوسط و نوسانی تقسیم می‌گردد.

در ذیل معادله پایستگی جرم به فرم تانسوری مرور گردیده است. سرعت در سه جهت X, Y, Z و u_i و u_j نشان داده شده است و از آنجایی که در پژوهش حاضر سیال در محدوده تراکم ناپذیر قرار دارد، از تغییرات چگالی با زمان صرف نظر و معادله بدون تغییرات چگالی با زمان بازنویسی می‌شود.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

در ذیل فرم تراکم ناپذیر معادله پایستگی تکانه خطی به فرم تانسوری مرور گردیده است. اگر فشار با p و ضریب لزجت کینماتیک با ν نمایش داده شود خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\langle u_i \rangle \langle u_j \rangle) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \langle u_i'' u_j'' \rangle \right) \quad (2)$$

فرم استاندارد معادله‌ی کی-امگا در سال ۱۹۹۸ توسط ویلکاکس [۱۸] ارائه شد. فرم تراپردی تنش برشی دارای معادلات تراپردی یکسان برای کا و امگا می‌باشد با دو تفاوت، اول آن که در قسمت داخلی لایه مرزی فرم استاندارد کی-امگا وجود دارد و به مرور در قسمت خارجی لایه مرزی تبدیل

سانپال و دالوی [۱۳] قیاس بین ساختمان با مقطع Y شکل با انواع مختلف اصلاحات هندسی به صورت عددی به وسیله حلگر انسیس سی. اف. اکس. و با مدل‌های توربولانسی کی-اِپسیلون و تراپرد تنش برشی انجام گردیده است. در نهایت گرد کردن گوشه‌ها به همراه کاهش سطح مقطع به صورت گسسته در راستای افزایش ارتفاع به عنوان پربازده‌ترین بین همه اصلاحات هندسی انتخاب گردید. در پژوهش دیگری از سانپال و دالوی [۱۴] مقایسه فشار و بار ناشی از نیروی آیرودینامیکی حاصل از وزش باد بر ساختمان‌های با مقطع Y شکل با اصلاحات کناره‌ها از جمله پخ زدن و گردن کردن به وسیله حلگر انسیس سی. اف. اکس. و دو مدل توربولانسی کی. اِپسیلون و اس. اس. تی. انجام پذیرفت. داده‌ها با نتایج تجربی در وضعیت جریان مشابه مقایسه گردید و نتیجه گرفته شد که اصلاح به وسیله گرد کردن گوشه‌ها نسبت به پخ زدن در کاهش بار ناشی از باد پربازده‌تر است. در پژوهشی دیگر از سانپال و دالوی [۱۵] تغییرات فشار و بار ناشی از وزش باد بر یک ساختمان بلند با مقطع Y شکل که در آن با ثابت نگاه داشتن مساحت مقطع، نسبت طول به عرض در بازوها تغییر پیدا می‌کرد بررسی و در مورد مزایا و معایب هر کدام از نسبت‌های طول به عرض برای بازوها بحث گردیده است. سانپال و دالوی [۱۶] در مقاله دیگر فشار متوسط، ضرایب نیرو و ممان برای ساختمان‌های بلند با مقطع Y شکل با تغییر زاویه داخلی بین بازوها را تا سی درجه برای زوایای حمله صفر تا صد و هشتاد درجه در بازه‌های سی درجه‌ای به دست آوردند. توزیع فشار روی سطوح، ضرایب متوسط فشار و نیروها برای همه مدل‌های ساختمان‌های Y شکل به دست آورده شد. نتایج به صورت گرافیکی ارائه شدند تا وسعت ناهمگونی‌ها به خاطر اصلاحات زاویه‌ای درک شود. همچنین جملات فوریه برای پیشبینی ضرایب نیروها و ممان‌ها به عنوان تابعی از زاویه حمله پیشنهاد گردید.

در ادامه این مقاله معادلات حاکم بر جریان سیال و مدل توربولانسی استفاده شده در این پژوهش معرفی خواهد گردید. سپس در مورد شرایط مرزی و تقسیم بندی دامنه حل عددی توضیح داده خواهد شد و استقلال نتایج از شبکه محاسباتی بررسی خواهد گردید. روش حل عددی نیز به وسیله قیاس با نتایج تجربی اعتبارسنجی می‌گردد. نهایتاً نیروهای آیرودینامیکی حاصله از جریان سیال بر هندسه اصلی برج و هندسه اصلاحی ارائه شده و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. سپس روشی که به وسیله آن عملکرد آیرودینامیکی برج با وضعیت تعداد روزهای وزش و سرعت و جهت بادها در موقعیت اقلیمی قرارگیری بررسی شده معرفی می‌گردد. تا به حال اینچنین مطالعه و قیاسی بین عملکرد آیرودینامیکی برج با در نظر گرفتن احتمال سالانه وزش باد از

1 Navier-Stokes
2 Partial Differential Equations (PDE)
3 Reynolds Averaged Navier Stokes

جدول ۱. ثابت‌های موجود در معادلات مدل توربولانسی کا-امگا اس. اس. تی [۱۹]

Table 1. The constants in the K-Omega S.S.T. turbulence model [19]

R_k	β_i	$\sigma_{k,1}$	$\sigma_{\omega,1}$	$\sigma_{k,2}$	$\sigma_{\omega,2}$	α_1	$\beta_{i,1}$	$\beta_{i,2}$	α_{∞}^*	α_{∞}	α_0	β_{∞}^*	R_{β}	R_{ω}	M_{t0}
۶	۰/۰۷۲	۱/۱۷۶	۲	۱	۱/۱۶۸	۰/۳۱	۰/۰۷۵	۰/۰۸۲۸	۱	۰/۵۲	۱/۹	۰/۰۹	۸	۲/۹۵	۰/۲۵

جدول ۲. پارامترهای مختلف سیال عامل

Table 2. Different physical properties of the fluid used in the simulation

سیال عامل	هوا
چگالی سیال	۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب
دمای سیال	۳۰۰ کلوین
لزجت سیال	$۱/۷۸۹۴ \times ۱۰^{-۵}$

صورت مطلق^۵ خواهد بود. برای شبیه‌سازی توربولانس به صورت عددی در پژوهش حاضر از مدل ترابرد تنش برشی کی-امگا استفاده شده است. به منظور کوپل کردن معادلات سرعت و فشار از روش سیمپل^۶ استفاده شده است. همچنین برای گسسته‌سازی ها نیز از روابط با دقت مرتبه دوم استفاده گردیده است. پارامترهای مختلف سیال استفاده شده در شبیه‌سازی های عددی پژوهش حاضر به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین انواع شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی پژوهش حاضر به شرح ذیل می‌باشد.

$$V_{\infty} = ۱,۵,۱۰,۱۵ = \text{ورودی سرعت}^۷ \text{ و ورودی}$$

$$\text{فشار جو} = \text{فشار خروجی}^۸$$

$$\text{شدت اغتشاش}^۹ = ۰/۲\%$$

$$\text{لزجت اغتشاش}^۱۰ = ۱۰$$

$$\text{دیواره بدون برش}^۱۱ = \text{دیواره‌های دامنه}$$

به نسخه رینولدز بالای مدل کی-اپسیلون می‌شود. دوم آنکه معادلات لزجت معشوش^۱ به نحوی تغییر یافته‌اند که تاثیرات ترابرد تنش برشی معشوش پایه^۲ را به حساب آورد.

معادلات ترابرد مدل توربولانسی کا-امگا اس. اس. تی. به شرح ذیل

می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega} + S_{\omega} \quad (۴)$$

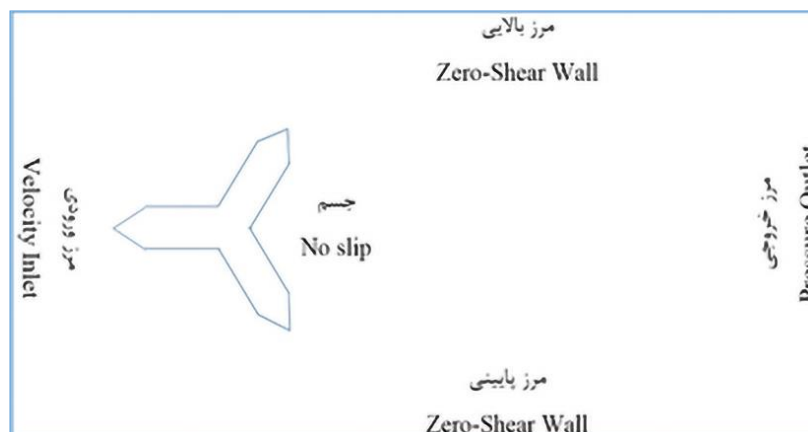
تمامی ثوابت موجود در معادلات مدل توربولانسی کا-امگا اس. اس. تی.

در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به بررسی اثر نیروهای آیرودینامیکی ایجاد شده بر برج در سرعت باد حداکثری ۱۵ متر بر ثانیه می‌توان گفت که عدد ماخ جریان برابر ۰/۰۴ می‌باشد، که این مقدار بسیار کوچکتر از آستانه تراکم پذیری جریان می‌باشد. لذا برای شبیه‌سازی با شرایط جوی پژوهش حاضر به وسیله نرم افزار انسیس فلونت از روش پایه فشار^۳ بهره‌گیری شده است. همچنین با توجه به ماهیت نوسانی نیروهای آیرودینامیکی برآ و پسا در رژیم جریانی پژوهش حاضر، می‌بایست حل به صورت گذرا^۴ انجام پذیرد. فرمولاسیون سرعت هم به

- 5 absolute
- 6 SIMPLE
- 7 Velocity inlet
- 8 Pressure Outlet
- 9 Turbulent Intensity
- 10 Turbulence Viscosity Ratio
- 11 Zero Shear Wall

- 1 Turbulent Viscosity
- 2 Principal Turbulent Shear Stress
- 3 pressure based
- 4 transient



شکل ۲. موقعیت شرایط مرزی در دامنه حل

Fig. 2. The location of the boundary conditions in the solution domain

۳- بررسی استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی روش حل عددی

شبکه‌ای که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته عبارت است از یک شبکه دایروی حول جسم شکل ۳ و قرار گیری آن در یک میدان مستطیلی شکل ۴. استفاده از این نوع دامنه در پژوهش‌های مشابه بسیار رایج می‌باشد.

یانگ و همکاران [۱۱] در بررسی حل عددی جریان حول سیلندر دوبعدی با مقاطع چند ضلعی‌های منتظم تا رینولدز بیست میلیون از دامنه مستطیلی با ابعاد 40×16 برابر قطر مشخصه استفاده نموده‌اند. همچنین یاگمور و همکاران [۱۰] در بررسی عددی سه بعدی سیلندر با مقطع مثلث متساوی‌الاساقین تا رینولدز 116000 دامنه مکعبی با ابعاد $30 \times 9/5$ برابر طول مشخصه استفاده کرده است. لازم به ذکر است که در راستای ارتفاع نیز ابعاد دامنه حل 12 برابر طول مشخصه بوده است. لطیفی و جهانگیری [۲۰] در بررسی عددی دوبعدی سیلندر با مقطع دایروی با رینولدز تا 100000 در سال 1398 تأثیر دامنه‌های مستطیلی با ابعاد گوناگون 21×11 و 41×21 را بر تغییرات ضریب پسا بررسی نمودند که میزان این تغییرات تنها در حدود $0/02$ بوده است. با توجه به نزدیکی عدد رینولدز جریان در تحقیق یانگ و همکاران، با پژوهش حاضر از ابعاد دامنه مشابه استفاده شده است. به این صورت که ابعاد دامنه حل در بالادست و در بالا و پایین جسم 8 برابر طول

دیواره بدون سرش $1 =$ دیواره‌های جسم

زبری سطح دیواره‌ها برابر صفر می‌باشند. عدد استفاده شده برای پارامترهای شدت اغتشاش و لزجت از پژوهش عددی جباراج و کریستی [۸] بر روی هشت ضلعی منتظم اتخاذ گردیده است.

در شکل ۲ شرایط مرزی اعمال شده در روی مرزهای مختلف نشان داده شده است.

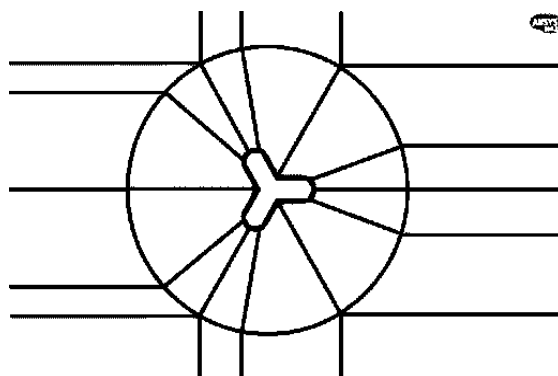
به منظور به دست آوردن نیروهای برآ و پسا از روابط (۵) و (۶) بهره گرفته شده است.

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U^2 S} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 S} \quad (6)$$

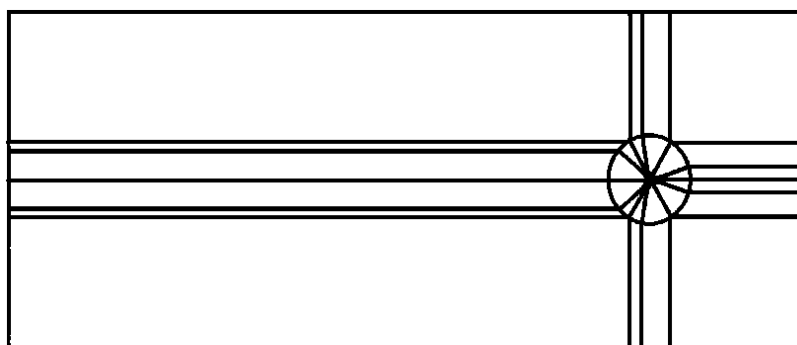
که در این روابط C_D و C_L به ترتیب ضرایب برآ و پسا و F_L و F_D به ترتیب نیروهای برآ و پسا وارده از طرف سیال به جسم می‌باشند. همچنین ρ چگالی و U سرعت سیال می‌باشد و S مساحت مشخصه جسم می‌باشد.

1 No Slip



شکل ۳. تقسیم بندی میدان حل حول هندسه مقطع برج

Fig. 3. Divisions of the solution domain around the geometry of the cross section



شکل ۴. تقسیم بندی میدان حل

Fig. 4. Divisions of the solution field

کوچکتر و بزرگتر متفاوت می‌باشند. تغییرات تقسیم بندی‌های روی اضلاع و تأثیر آن بر المان‌های شبکه‌ی محاسباتی و بر میزان ضریب پسا در جدول ۳ آمده است.

همانگونه که در جدول ۳ قابل ملاحظه می‌باشد، افزایش تعداد تقسیمات در مرحله آخر یعنی افزایش تعداد تقسیمات روی اضلاع از اندازه‌ی ۲۳×۱۱ به ۳۰×۱۵ تنها یک صدم به مقدار ضریب پسا افزوده است و دارای تأثیر محسوسی نمی‌باشد. لذا برای شبیه‌سازی‌ها از همان اندازه تقسیمات ۲۳×۱۱ بهره خواهیم جست. شبکه عددی حول جسم و در میدان حل به صورت شکل ۵ می‌باشد.

ضخامت اولین لایه پس از دیواره تابعی از سرعت جریان، طول مشخصه، چگالی، لزجت سیال و $+Y$ لازم می‌باشد. با توجه به بهره‌گیری از مدل

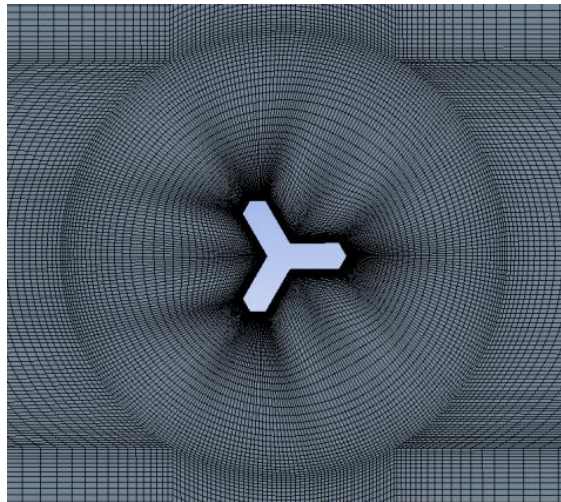
مشخصه و در پایین دست ۳۲ برابر طول مشخصه قرار داده شده است. همچنین برای قطر قسمت O شکل دامنه حل از قطر ۴ برابر طول مشخصه استفاده شده است.

به منظور بررسی استقلال نتایج از میزان ریزی شبکه‌ی محاسباتی، بررسی میزان تغییرات مقدار ضریب پسا با افزایش تعداد تقسیم بندی‌های روی جسم و در طول و عرض شبکه محاسباتی انجام شده است. باید توجه داشت که به دلیل حفظ همگن بودن افزایش ابعاد سلول‌ها در کل شبکه محاسباتی افزایش تعداد تقسیم بندی‌های روی جسم سبب افزایش تعداد المان‌ها در کل شبکه‌ی محاسباتی می‌شود. با توجه به هندسه مقطع پژوهش حاضر که یک شکل دوازده ضلعی است که شش ضلع مساوی با طول کوچک‌تر و شش ضلع مساوی با طول بزرگتر دارد، تعداد تقسیم بندی‌ها در اضلاع

جدول ۳. میزان تغییرات مقدار ضریب پسا با افزایش تعداد تقسیمات روی جسم

Table 3. The amount of change in the value of the drag coefficient by increasing the number of divisions on the object

۱۵	۱۱	۵	۴	۲	تعداد تقسیمات روی ضلع کوچکتر
۳۰	۲۳	۱۵	۱۰	۵	تعداد تقسیمات روی ضلع بزرگتر
۴۲۱۵۰	۳۰۹۱۶	۱۸۹۶۰	۱۲۹۸۲	۷۱۰۲	تعداد مجموع المان‌ها در شبکه‌ی محاسباتی
۳/۰۳	۳/۰۲	۲/۹۷	۲/۹	۲/۱۲	مقدار ضریب پسا



شکل ۵. شبکه عددی حول جسم

Fig. 5. Numerical grid around the object cross section

زمانی متوسط موجود در هر سیکل تغییرات آورده شده است. با توجه به داده‌های موجود در جدول فوق می‌توان گفت که اولاً با توجه به کوتاه‌تر بودن سیکل تغییرات نیروی پسا نسبت به نیروی برآ می‌بایست این نیرو را ملاک تعداد متوسط مقادیر موجود در هر سیکل قرار داد. دوماً در صورتی که گام زمانی را برابر 0.7 ثانیه قرار دهیم می‌توان از نظر گام زمانی، از درستی شبیه‌سازی مطمئن بود. همچنین تغییرات ضریب پسا بین دو گام زمانی 0.7 و 0.5 بسیار ناچیز می‌باشد که بیانگر مناسب بودن انتخاب گام زمانی 0.7 ثانیه برای شبیه‌سازی عددی می‌باشد. باید توجه داشت که داده‌های جدول فوق در حالتی ثبت شده‌اند که جهت جریان به سمت بال مقطع برج است و سرعت جریان نیز برابر 15 متر بر ثانیه می‌باشد لذا در زوایای وزش دیگر نیز کوچکی گام زمانی بررسی شده است.

توربولانسی ترابرد تنش برشی کی - امگا در پژوهش حاضر از $Y+$ برابر 1 استفاده شده است. همچنین طول مشخصه برابر حدوداً نود و یک متر و سرعت‌های جریان برابر 1 ، 5 ، 10 و 15 متر بر ثانیه می‌باشند. در نتیجه ضخامت اولین لایه به ترتیب حدود $10^{-4} \times 8/35$ ، $10^{-4} \times 1/96$ ، $10^{-4} \times 1/0.5$ و $10^{-5} \times 7/32$ متر برای این سرعت‌ها می‌باشد.

به منظور اطمینان از میزان کوچکی گام زمانی در هر شبیه‌سازی می‌بایست تغییرات نیروهای برآ و پسا را با زمان بررسی نمود. در هر سیکل تغییرات مقدار نیروهای برآ و پسا می‌بایست حدود بیست گام زمانی وجود داشته باشد تا بتوان از میزان ریزی گام زمانی مطمئن بود. همچنین می‌توان با کاهش اندازه گام زمانی و پایش تغییرات اندازه ضریب پسا گام زمانی مناسب را برای شبیه‌سازی عددی انتخاب کرد. در جدول ۴ تعداد گام‌های

جدول ۴. تعداد متوسط مقادیر در هر سیکل تغییرات نیروهای برآ و پسا بر حسب گام زمانی

Table 4. The average number of values in each period of oscillation in lift and drag forces with respect to the time step

گام زمانی (ثانیه)	۲	۱/۵	۱	۰/۷	۰/۵
تعداد گام زمانی در هر سیکل تغییرات ضریب برآ	۱۷	۲۳	۳۶	۵۳	-
تعداد گام زمانی در هر سیکل تغییرات ضریب پسا	۹	۱۲	۱۸	۲۵	-
ضریب پسا	۳/۰۴	۲/۹۶۵	۲/۹۵۳	۳/۰۰۶	۳/۰۰۲

آزمایشگاهی و عددی دیگر بهره گرفته شده است. نتایج قیاس ضرایب فشار متوسط روی سطح استوانه به صورت شکل ۶ می‌باشد.

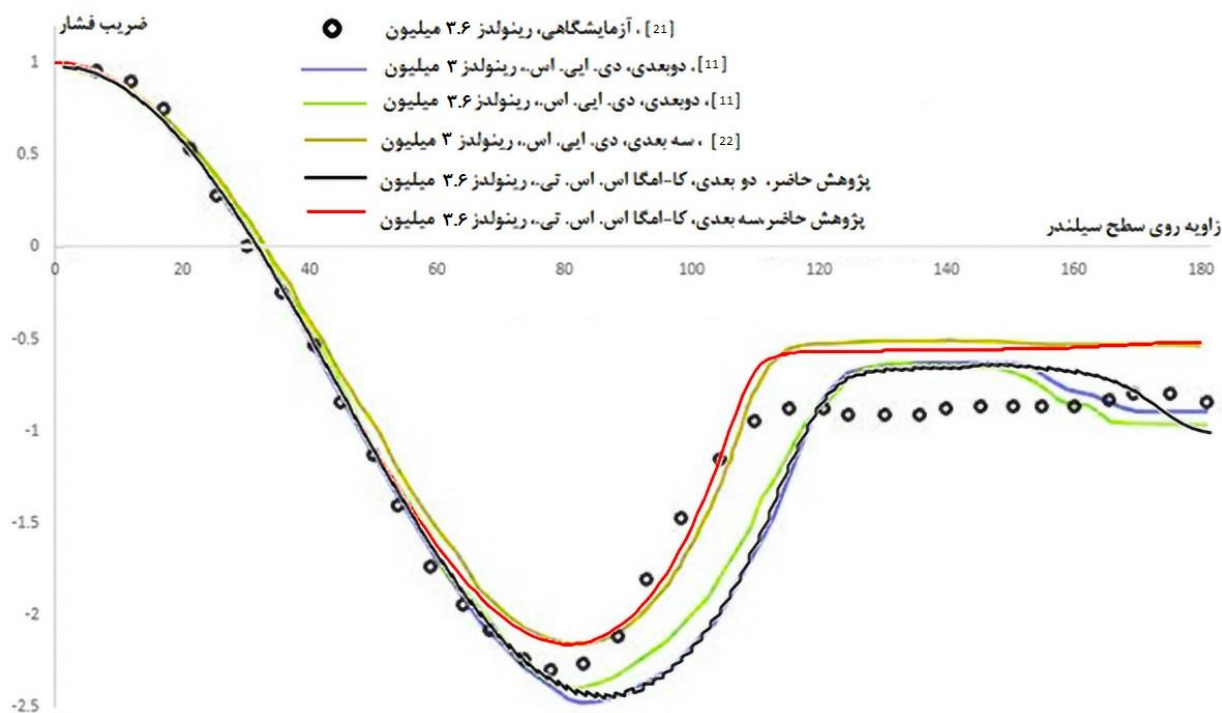
به منظور اعتبارسنجی روش عددی در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی عددی ابتدا به صورت دوبعدی صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی دوبعدی تطابق رضایت بخشی با داده آزمایشگاهی نداشته و دارای خطای بیشینه حدودی ۲۶ درصدی است که می‌توان دلیل آن را در ماهیت سه بعدی پدیده توربولانس جستجو کرد، ولی با نتایج پژوهش‌های دوبعدی دیگر همچون کار یانگ و همکاران که با مدل‌سازی توربولانس متفاوت شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شبیه‌سازی را انجام داده‌اند مشابه است. لذا شبیه‌سازی به صورت سه بعدی تکرار گردیده است. با توجه به پژوهش‌های مشابه همانند یاگمور و همکاران که شبیه‌سازی عددی را روی منشور با مقطع مثلث متساوی الاضلاع به صورت سه بعدی انجام داده‌اند، عمق ۱۲ برابر طول مشخصه برای انجام شبیه‌سازی سه بعدی در نظر گرفته شد. همانگونه که در شکل ۶ قابل ملاحظه است، ضریب فشار متوسط به دست آمده توسط شبیه‌سازی عددی سه بعدی روی سطح استوانه با نتایج آزمایشگاهی تطابق بهتری دارد و دارای خطای حداکثری حدودی برابر ۱۲ درصد می‌باشد. همچنین می‌توان دید که نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر بسیار نزدیک به پژوهش تراوین و همکاران [۲۲] است که در رینولدز نزدیک به پژوهش حاضر به صورت سه بعدی و با مدل توربولانسی دی. ای. اس. شبیه‌سازی را انجام داده‌اند.

مقایسه ضریب فشار متوسط به دست آمده توسط شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی برای اعتباربخشی به مقادیر به دست آمده برای ضریب برآ توسط شبیه‌سازی عددی کفایت می‌کند. اما مقدار ضریب پسا باید به صورت جداگانه بین شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردد. دلیل این امر وابستگی مقدار ضریب پسا به تنش برشی می‌باشد. مقدار ضریب پسا در

به منظور حصول اطمینان از دقت نتایج می‌بایست اعتبارسنجی روش صورت گیرد. در پژوهش حاضر از داده‌های تجربی پژوهش‌هایی استفاده خواهد شد که در گذشته انجام شده و دارای محدوده رینولدز و هندسه تقریباً مشابه مقطع برج در پژوهش حاضر می‌باشند. مطالعات انجام شده روی سیلندر با مقطع دایروی از نظر تعداد و بازه عدد رینولدز بسیار کثیر می‌باشند. از همین جهت در پژوهش حاضر به منظور اعتبارسنجی از هندسه سیلندر دایروی استفاده شده است. سرعت باد در پژوهش حاضر در حالت بیشینه برابر پانزده متر بر ثانیه می‌باشد، لذا با توجه به طول مشخصه انتخاب شده در برج که حدوداً برابر ۹۱ متر می‌باشد، می‌توان انتظار عدد رینولدزهایی در بازه نود میلیون را داشت. لذا مرور پژوهش‌های انجام شده روی سیلندر دایروی ضروری می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که داده‌های تجربی انتخاب شده به منظور قیاس با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی پژوهش حاضر، می‌بایست اعداد رینولدز حدوداً هم مرتبه داشته باشند.

در پژوهش آخنیخ [۲۱] توزیع فشار و اصطکاک پوسته‌ای روی مقطع وسط یک استوانه تا اعداد رینولدز پنج میلیون به صورت تجربی محاسبه گردید. به وسیله مقادیر توزیع اصطکاک پوسته‌ای و توزیع فشار روی سطح استوانه مقادیر پسای کل، پسای فشاری و پسای اصطکاک به دست آمد. همچنین مکان‌های جدایش روی سطح استوانه معین گردید. در پژوهش تراوین و همکاران [۲۲] جریان حول استوانه با مقطع دایروی به صورت سه بعدی و با روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا تا رینولدز سه میلیون مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور مقایسه، از شبیه‌سازی‌های عددی دوبعدی و سه بعدی مربوط به یانگ و همکاران [۱۱] نیز بهره گرفته شده است.

به منظور اعتبارسنجی روش عددی در پژوهش حاضر از مقایسه ضریب فشار متوسط به دست آمده روی سطح استوانه با نتایج پژوهش‌های



شکل ۶. مقایسه ضرایب فشار روی سطح استوانه به منظور اعتبارسنجی بین پژوهش حاضر و پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی دیگر در رینولدزهای ۳ و ۳/۶ میلیون

Fig. 6. Comparison of the pressure coefficients on the surface of the cylinder in order to validate the current research by other numerical and experimental researches at 3 and 3.6 million Reynolds

شبیه‌سازی عددی قرار گیرد و نتایج به‌دست آمده قابل تعمیم به مابقی هندسه می‌باشند.

شبیه‌سازی عددی جریان حول مقطع برج در هر یک از هفت جهت وزش در چهار سرعت ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه انجام شده است. به منظور مقایسه بحرانی بودن شرایط آیرودینامیکی، مقادیر متوسط و دامنه (فاصله قله و قعر) و فرکانس نوسانات ضرایب برآ و پسا به دست آمده‌اند. دامنه نوسانات به وسیله آنالیز فوری محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته در سرعت‌ها و جهات وزش مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ قابل مشاهده است.

به منظور درک بهتر نحوه نوسان نیروهای آیرودینامیکی در طول گذر زمان، نمودارهای تغییرات ضرایب برآ و پسا با گام زمانی به عنوان نمونه در سرعت وزش ۱۵ متر بر ثانیه و در جهات وزش صفر، سی و شصت درجه در شکل ۱۱ آورده شده است.

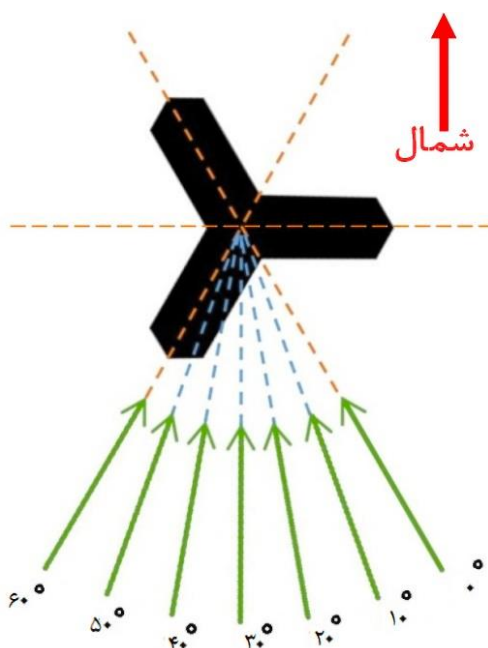
حال به منظور درک بهتر تاثیرات جریان، کانتورهای فشار حول جسم

پژوهش آخباخ [۲۱] در رینولدز ۳ میلیون برابر ۰/۶ می‌باشد. در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی دوبعدی پسای متوسطی با مقدار برابر ۰/۶۷۵ به دست می‌دهد که بیانگر خطایی حدوداً ۱۲ درصدی می‌باشد. این مقدار خطا تقریباً برابر مقدار خطایی است که یانگ و همکاران [۱۱] در مقایسه ضریب پسای شبیه‌سازی دوبعدی خود با مدل توربولانسی شبیه‌سازی گردابه‌های جدا در رینولدز ۲/۵ میلیون، با داده‌های تجربی به دست آوردند. بنابراین می‌توان دقت روش عددی انتخاب شده را با روشهای معتبر عددی دیگر مشابه در نظر گرفت.

۴- بررسی نتایج

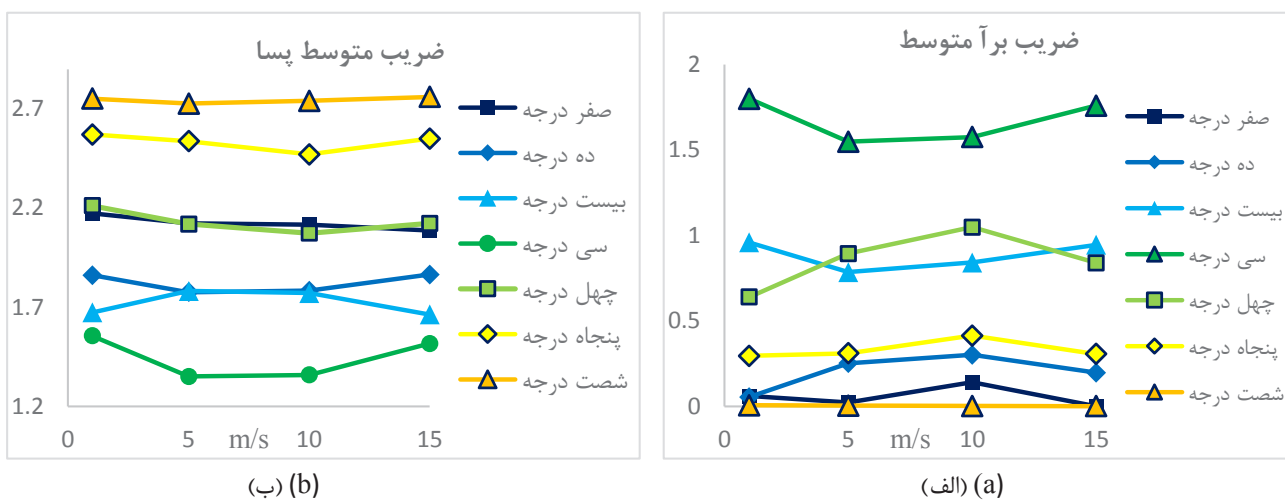
۴-۱- بررسی جهت قرارگیری

همانگونه که در شکل ۷ مشخص است، مقطع برج بین المللی تهران دارای سه محور تقارن می‌باشد. در نتیجه تنها کافی است که یک ششم هندسه برج از لحاظ عملکرد در مقابل وزش باد مورد بررسی به صورت



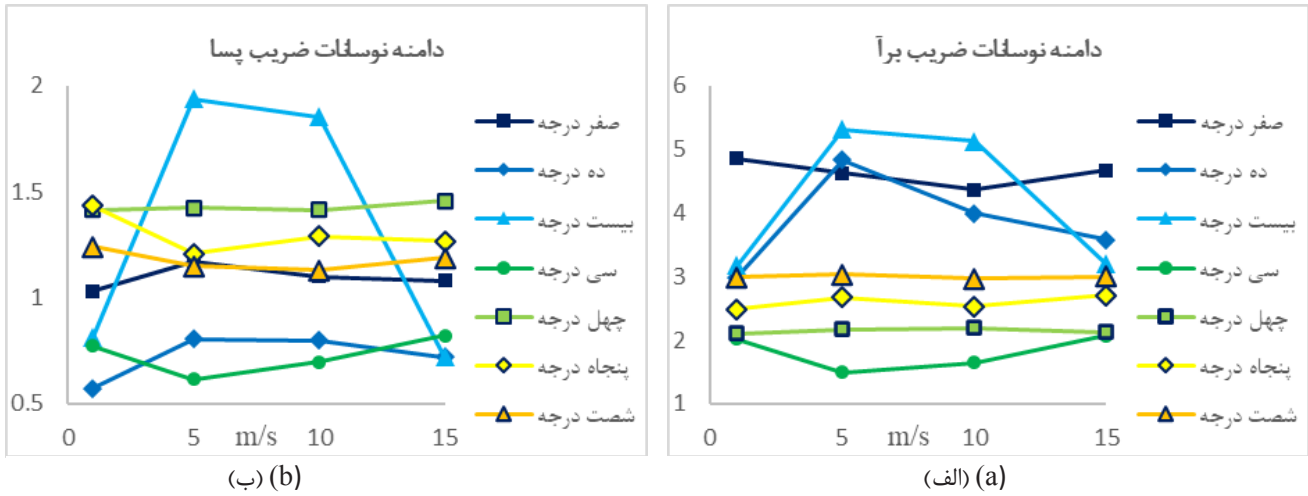
شکل ۷. زوایای وزش مختلف در شبیه سازی عددی از ۰ الی ۶۰ درجه (خط چین های نارنجی بیانگر خطوط تقارن برج هستند).

Fig. 7. Different wind incident angles in numerical simulation from 0 to 60 degrees (the orange dashed lines represent the lines of symmetry of the tower).



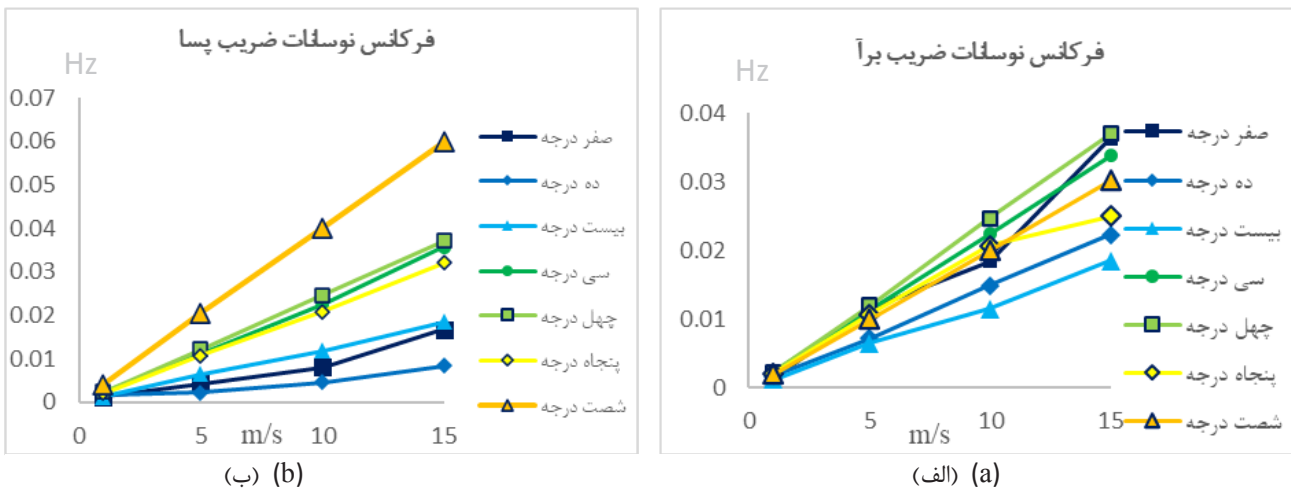
شکل ۸. نمودار مقادیر ضرایب (الف) برآ و (ب) پسا متوسط در زوایای وزش و سرعت های مختلف حول هندسه مقطع برج

Fig. 8. Diagrams of coefficients of averaged (a) lift and (b) drag at different wind incident angles and velocities around the geometry of the tower section



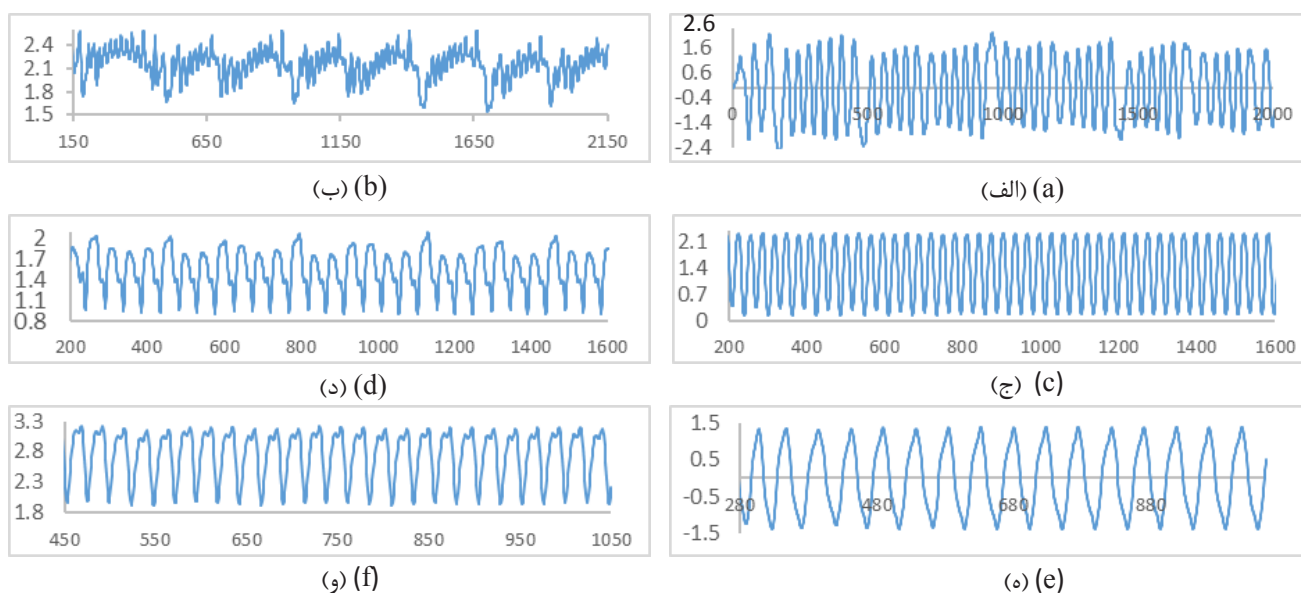
شکل ۹. نمودار مقادیر دامنه‌های نوسانات ضرایب (الف) برآ و (ب) پسا در زوایای وزش و سرعت‌های مختلف حول هندسه مقطع برج

Fig. 9. Diagrams of the amplitudes of fluctuations of coefficients (a) lift and (b) drag at different wind incident angles and velocities around the geometry of the tower section



شکل ۱۰. نمودار مقادیر فرکانس‌های نوسانات ضرایب (الف) برآ و (ب) پسا متوسط در زوایای وزش و سرعت‌های مختلف حول هندسه مقطع برج

Fig. 10. Diagrams of the values of fluctuation frequencies of the averaged (a) lift and (b) drag coefficients at different wind incident angles and velocities around the geometry of the tower section



شکل ۱۱. نمودارهای تغییرات ضرایب آیرودینامیکی (ستون راست ضریب برآ و ستون چپ ضریب پسا) بر حسب گام زمانی در سرعت وزش ۱۵ متر بر ثانیه و در جهات وزش (الف) و (ب) صفر درجه، (ج) و (د) سی درجه و (ه) و (و) شصت درجه. (هر گام زمانی برابر ۰/۷ ثانیه می‌باشد)

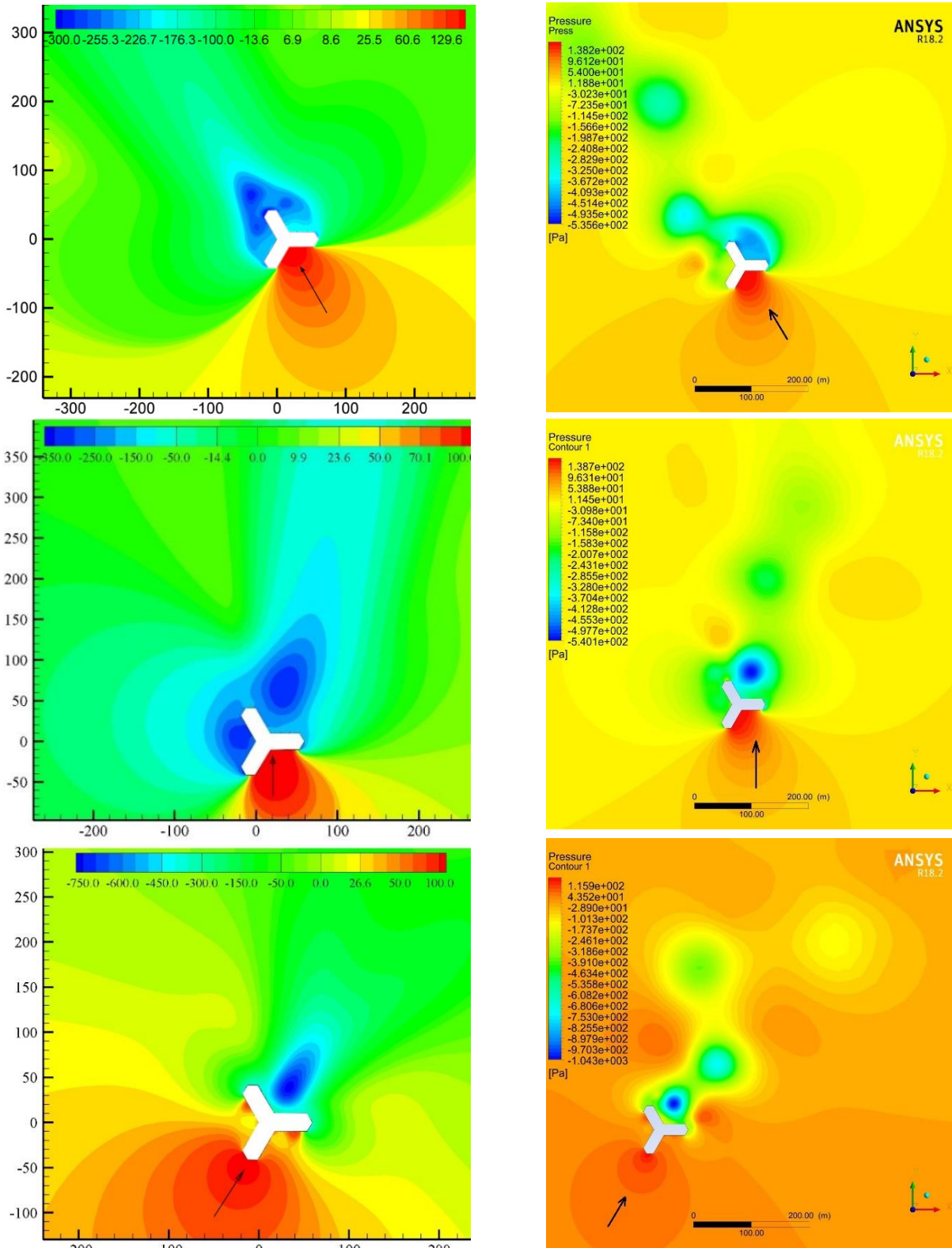
Fig. 11. Diagrams of the changes in aerodynamic coefficients (right column represents lift coefficient and left column represents drag coefficient) versus time step in wind velocity of 15 m/s and wind directions of (a) and (b): zero degree, (c) and (d): thirty degrees and (e) and (f): sixty degrees. (Each time step is equal to 0.7 seconds)

بال دیگر جسم دیده می‌شوند. ناحیه کم فشار بالای مقطع نیز دوباره یک تکه شده است.

باید توجه داشت که در همه محاسبات ضرایب برآ و پسا، طول مرجع برابر طول مشخصه مقطع در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور متوسط گیری از ضرایب نیروهای آیرودینامیکی، مقادیر این نیروها در طول زمان شبیه‌سازی با هم جمع و تقسیم بر تعداد گام‌های زمانی شده است. به منظور مقایسه وضعیت جریان در جهات و سرعت‌های وزش مختلف از لحاظ بحرانی بودن شرایط آیرودینامیکی می‌توان کمیت‌های مقادیر متوسط و دامنه‌های نوسانات ضرایب برآ و پسا را در هر موقعیت وزش با یکدیگر جمع و در پارامتر تابع وزنی $\frac{V_{\infty}^2}{V_{\infty}^2 \max}$ ضرب نمود تا تاثیرات اهمیت بیشتر نیروهای آیرودینامیکی در سرعت‌های بزرگتر را نمایان کند و این پارامتر را معیار بحرانی نامید و در سرعت‌های یکسان با هم مقایسه نمود تا جدول ۵ حاصل گردد. (V_{∞} سرعت در شبیه‌سازی می‌باشد و V_{\max} بیشترین سرعت مورد بررسی یا ۱۵ متر بر ثانیه است.)

در میدان حل عددی در دو حالت متوسط گیری شده در زمان و لحظه‌ای در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه و در سه جهت وزش صفر، سی و شصت درجه در شکل ۱۲ به نمایش در آمده است.

همانگونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود در موقعیت وزش صفر درجه در کانتور فشار میانگین گیری شده تقارن در راستای وزش جریان دیده می‌شود که دلیل این امر هم راستایی جهت جریان و راستای خط تقارن مقطع می‌باشد. در حالی که در کانتورهای لحظه‌ای (سمت راست) بدلیل وجود گردابه‌های نامتقارن لحظه‌ای این تقارن دیده نمی‌شود. در موقعیت وزش سی درجه در کانتور میانگین گیری شده، تقارنی در راستای وزش جریان دیده نمی‌شود چرا که راستای وزش جریان در راستای خط تقارن مقطع نیست. ناحیه کم فشار سمت چپ جسم هم به دو قسمت تقسیم شده است. در موقعیت وزش شصت درجه مشابه حالت صفر درجه در کانتور میانگین گیری شده تقارن کامل در جهت وزش جریان مشاهده می‌شود. همچنین علاوه بر نقطه سکون اصلی دو نقطه سکون کوچکتر بر روی دو



شکل ۱۲. کانتورهای فشار متوسط (چپ) و لحظه‌ای (راست) در میدان حل عددی در سه جهت وزش از بالا به پایین صفر، سی و شصت درجه و سرعت وزش ۱۵ متر بر ثانیه

Fig. 12. Contours of average (left) and instantaneous (right) pressure in the numerical solution domain in three wind directions of from top to bottom, zero, thirty and sixty degrees and wind velocity of 15 m/s.

جدول ۵. رتبه بندی بحرانیترین موقعیت وزش بر حسب سرعت وزش برای هندسه اولیه برج

Table 5. Ranking of the most critical wind direction with respect to the wind velocity based on the unmodified geometry of the tower

سرعت وزش (متر بر ثانیه)	بحرانی ترین موقعیت وزش (درجه)	معیار بحرانیت
۱۵	۰	۷/۸۳۹
۱۰	۲۰	۴/۲۶
۵	۲۰	۱/۱
۱	۰	۰/۰۳۶

بر ثانیه شکل (ب) تعداد روزهای وزش در دورتادور جهات جغرافیایی پخش است و نمی‌توان جهت غالبی را برای بیشترین تعداد روزهای بادی با سرعت ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفت و در نهایت برای سرعت ۱ متر بر ثانیه شکل (الف) بیشترین روز بادی از جانب شمال است و باقی جهات وزش دارای تعداد روزهای قابل اغماض‌اند. بحرانی‌ترین موقعیت وزش در سرعت وزش ۱ متر بر ثانیه طبق جدول ۵ موقعیت صفر درجه می‌باشد که با توجه به موقعیت قرار گیری فعلی برج به سمت شمال شرق واقع می‌شود. حال در کل می‌توان گفت که برای سرعت‌های ۱۵ و ۱۰ متر بر ثانیه که مولد نیروهای بزرگتری هستند موقعیت‌های وزش بحرانی با جهاتی که بیشترین تعداد روز بادی را داشته‌اند هم سو شده‌اند. لذا این مسئله می‌تواند با چرخش برج حول محور ارتفاع به اندازه از سی تا پنجاه درجه بهبود یابد.

۴-۲- بررسی شکل مقطع

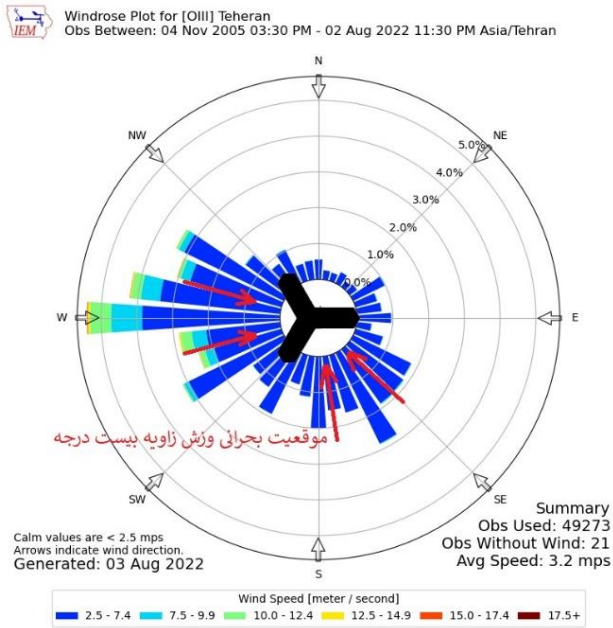
روش‌های متعددی برای اصلاح هندسه برج در پژوهش حاضر وجود دارد همانند پخ زدن، گرد کردن و برش قطعات مربعی از لبه‌ها. در پژوهش حاضر به عنوان اصلاح هندسه برج لبه‌های تیز سرتاسر هندسه مقطع بصورت منحنی درآمد شکل ۱۴ و خصوصیات آئرودینامیکی آن به صورت عددی شده است.

شبیه‌سازی عددی جریان حول مقطع اصلاحی برج نیز در هر یک از هفت جهت وزش در چهار سرعت ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه انجام شده است. به منظور مقایسه بحرانی بودن شرایط آئرودینامیکی، مقادیر متوسط و دامنه و فرکانس نوسانات ضرایب برآ و پسا محاسبه شده‌اند و در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ به نمایش در آمده‌اند.

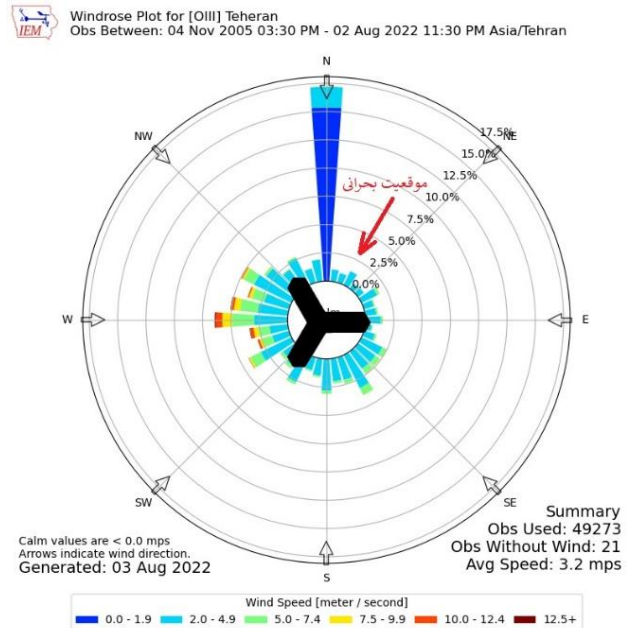
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵ می‌توان مشاهده نمود که در هر سرعت جریان باد کدام یک از موقعیت‌های وزش دارای بیشترین مجموع ضرایب و دامنه نوسانات آئرودینامیکی می‌باشد.

حال بررسی می‌شود که برج از لحاظ موقعیت گردشی حول محور ارتفاع در وضعیت مساعدی واقع شده است یا خیر. بدین منظور باید بررسی کرد که جهات جغرافیایی که دارای بیشترین روز بادی در سرعت‌هایی که برای برج بحرانی‌تراند، با موقعیت‌هایی از برج که در صورت وزش باد بر آنها شرایط بحرانی‌تری به وجود می‌آید، رو در رو نگردند. به این منظور از نمودارهای گلباد شهر تهران در چهار محدوده سرعتی به گونه‌ای که سرعت‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر را برجسته کنند بهره گرفته شده است. نمودارهای گلباد به وسیله داده‌های باد استخراج شده از فرودگاه مهرآباد طی بیست سال اخیر توسط وبسایت دانشگاه ایالتی ایوا [۲۳] ترسیم شده و در شکل ۱۳ قابل رویت است. موقعیت برج بین المللی تهران و جهت وزش بحرانی در هر سرعت بر روی شکل با فلش قرمز رنگ نشان داده شده است.

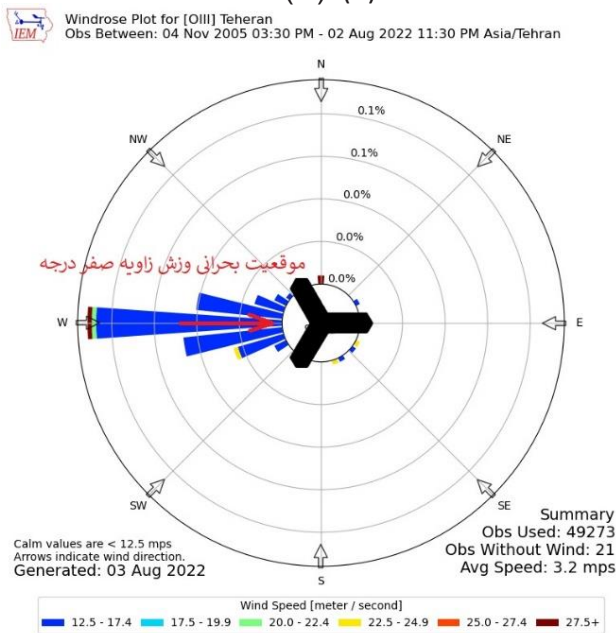
همانگونه که در شکل ۱۳ قابل رویت است بادهایی که با سرعت حدود ۱۵ متر بر ثانیه می‌وزند شکل (د) دارای بیشترین تعداد روز وزش از جهت غرب می‌باشند. از جهتی طبق جدول (۵) بحرانی‌ترین موقعیت وزش در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه برابر با موقعیت صفر درجه می‌باشد که دقیقاً در موقعیت قرارگیری برج، به سمت غرب واقع شده است. بادهایی که با سرعت حدود ۱۰ متر بر ثانیه می‌وزند شکل (ج) همچنین دارای بیشترین تعداد روز وزش از جهت غرب می‌باشند و بحرانی‌ترین موقعیت وزش در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه طبق جدول (۵) برابر موقعیت وزش ۲۰ درجه، و در مقام بعد از آن صفر درجه است که متاسفانه به سمت غرب می‌باشند. برای سرعت ۵ متر



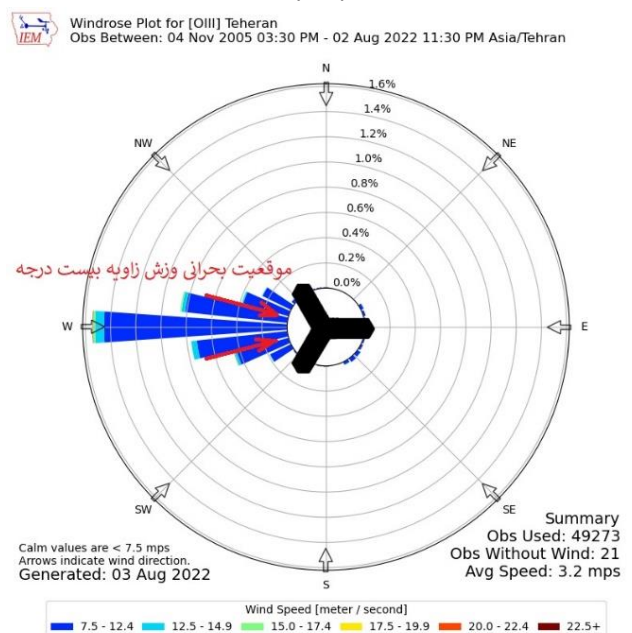
(ب) (b)



(الف) (a)



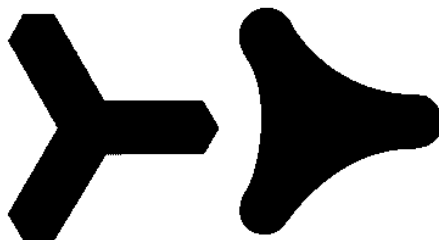
(د) (d)



(ج) (c)

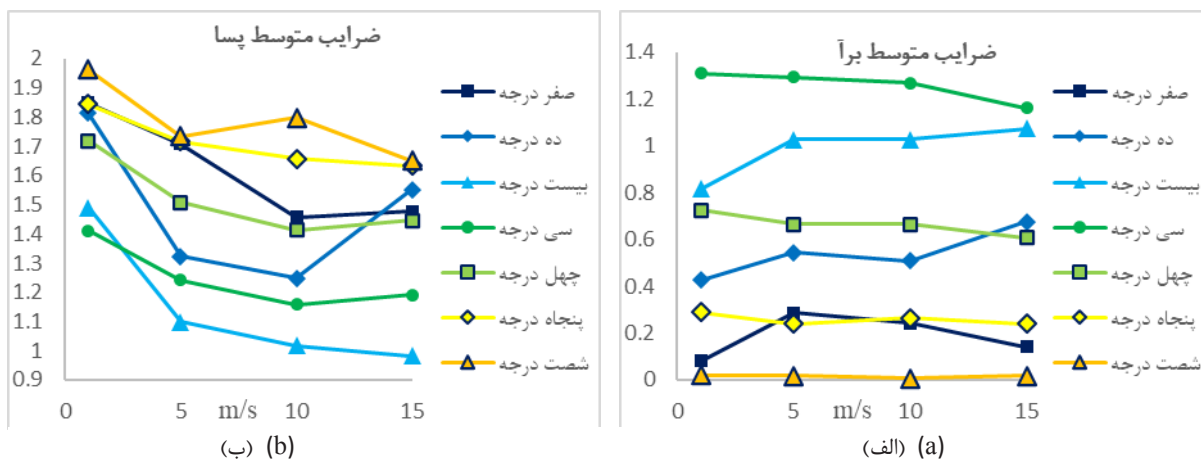
شکل ۱۳. نمودارهای گلباد شهر تهران فرودگاه مهرآباد [۲۳] (الف) با برجسته سازی سرعت ۱ متر بر ثانیه (ب) با برجسته سازی سرعت ۵ متر بر ثانیه (ج) با برجسته سازی سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و (د) با برجسته سازی سرعت ۱۵ متر بر ثانیه

Fig. 13. wind rose diagrams of Tehran city at Mehrabad Airport [23] (a) 1 m/s velocity highlighted (b) 5 m/s velocity highlighted (c) 10 m/s velocity highlighted and (d) 15 m/s velocity highlighted



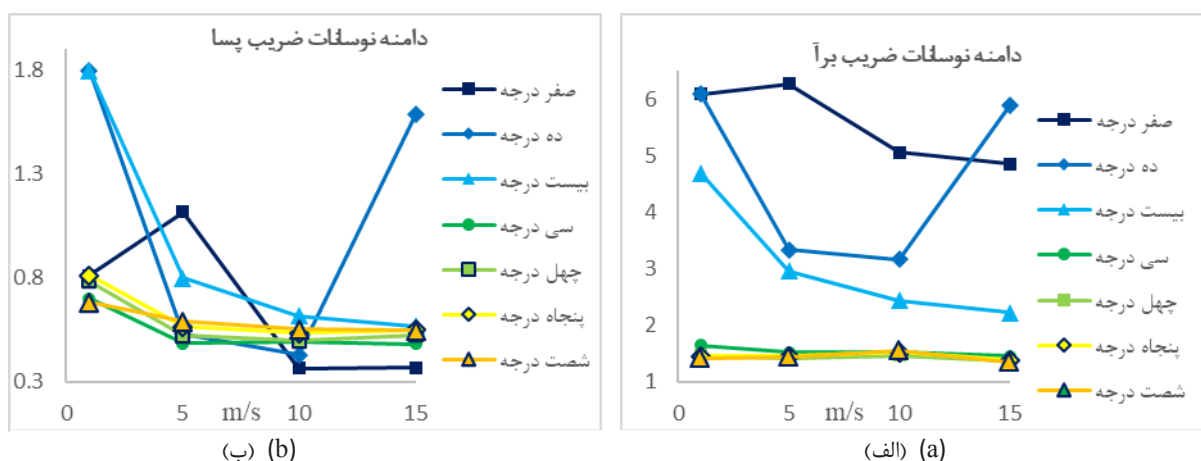
شکل ۱۴. هندسه اصلاح شده (راست) و هندسه اصلی (چپ)

Fig. 14. Modified geometry (right) and original geometry (left)



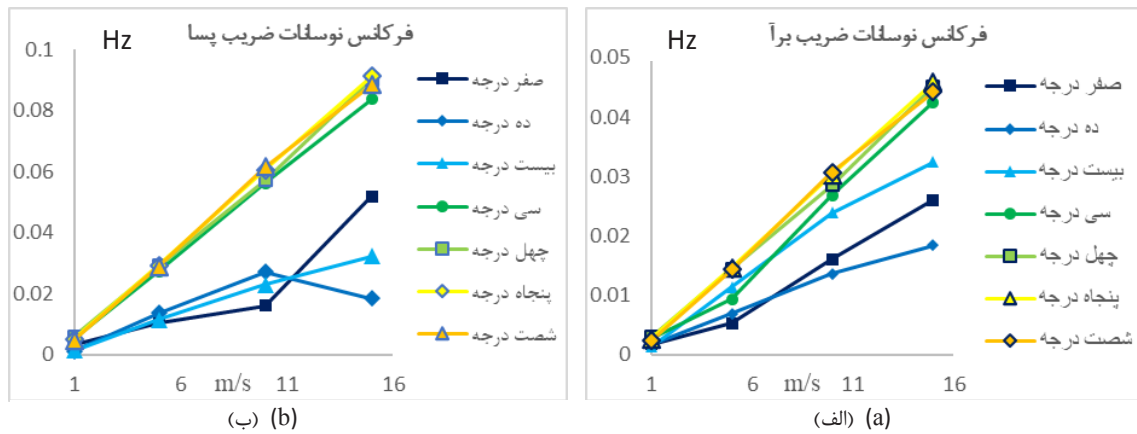
شکل ۱۵. نمودار مقادیر ضرایب (الف) برآ و (ب) پسا متوسط در زوایا وزش و سرعت‌های مختلف حاصله از شبیه سازی عددی جریان حول هندسه اصلاحی مقطع برج

Fig. 15. The diagrams of the averaged (a) lift and (b) drag coefficients at different wind incident angles and velocities resulting from the numerical simulation of the flow



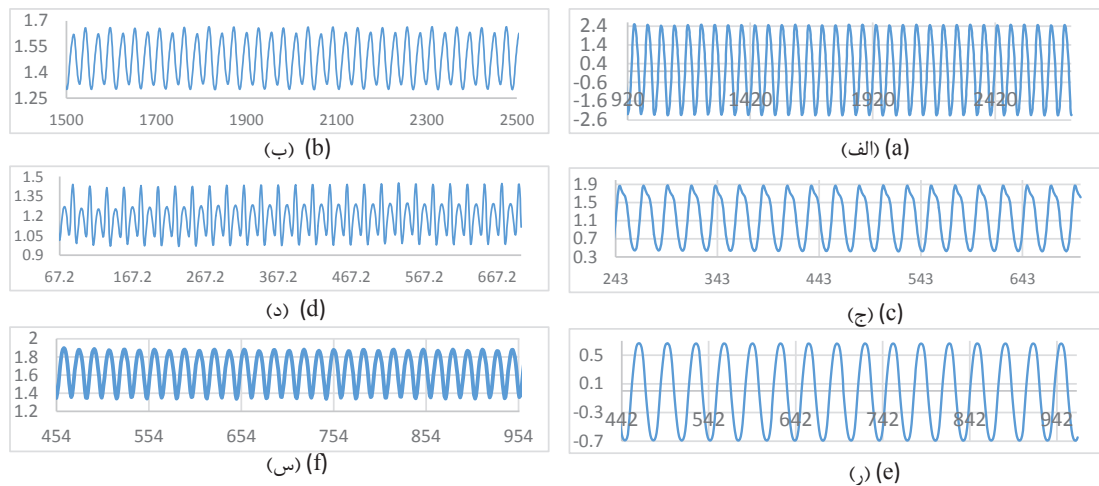
شکل ۱۶. نمودار مقادیر دامنه‌های نوسانات ضرایب (الف) برآ و (ب) پسا متوسط در زوایا وزش و سرعت‌های مختلف حاصله از شبیه سازی عددی جریان حول هندسه اصلاحی مقطع برج

Fig. 16. The diagrams of the amplitudes of fluctuations of averaged (a) lift and (b) drag coefficients at different wind incident angles and velocities resulting from the numerical simulation of the flow around the modified geometry of the tower section



شکل ۱۷. نمودار مقادیر فرکانس‌های نوسانات ضرایب (الف) برآ و (ب) پسا متوسط در زوایا وزش و سرعت‌های مختلف حاصله از شبیه سازی عددی جریان حول هندسه اصلاحی مقطع برج

Fig. 17. The diagrams of the values of the fluctuations of the averaged (a) lift and (b) drag coefficients at different wind incident angles and velocities resulting from the numerical simulation of the flow around the modified geometry of the tower section.

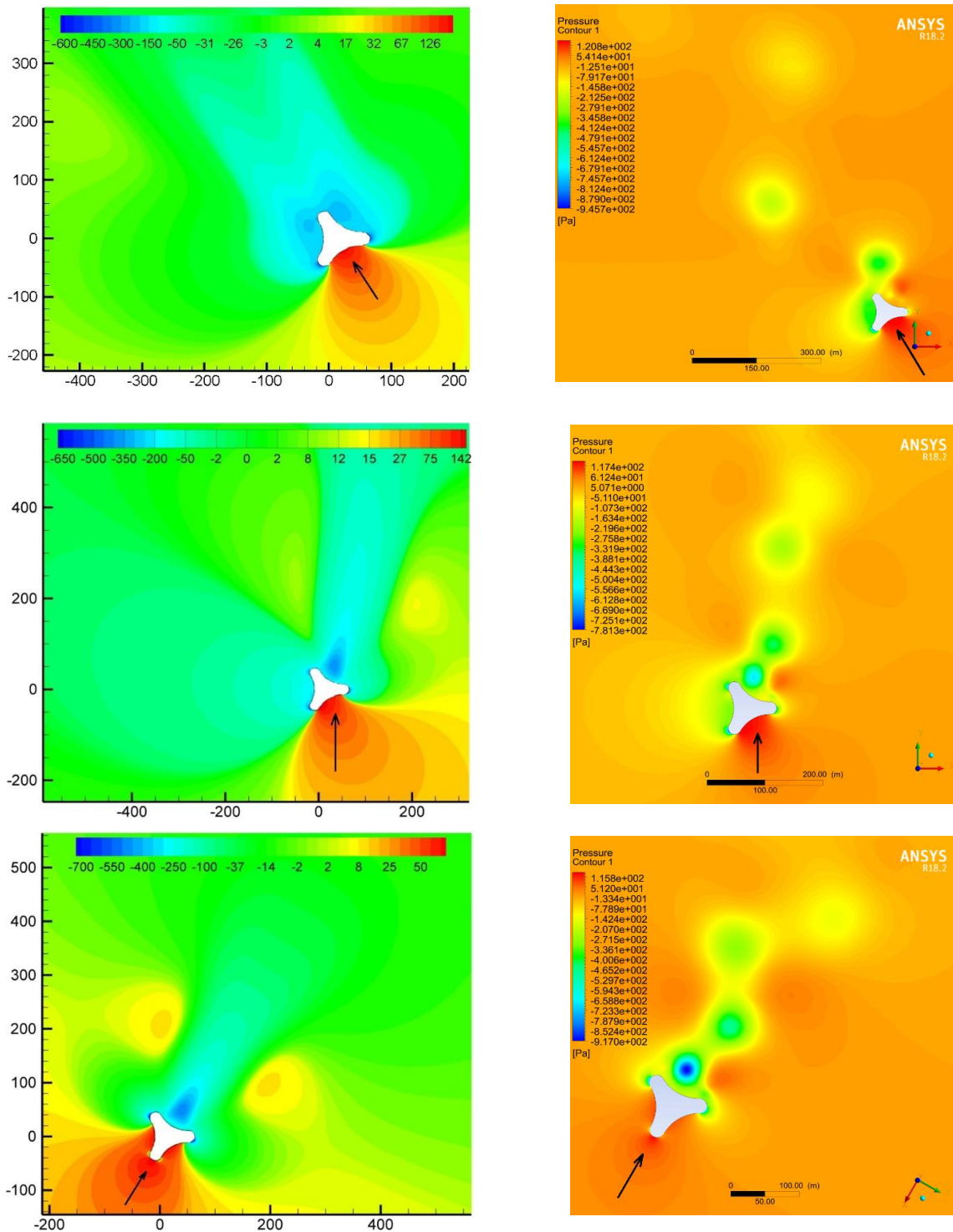


شکل ۱۸. نمودارهای تغییرات ضرایب آیرودینامیکی (ستون راست ضرایب برآ و ستون چپ ضرایب پسا) بر حسب گام زمانی در سرعت وزش ۱۵ متر بر ثانیه و در جهات وزش (الف) و (ب) صفر درجه، (ج) و (د) سی درجه و (ر) و (س) شصت درجه. (هر گام زمانی برابر ۰/۷ ثانیه می‌باشد)

Fig. 18. Diagrams of the changes in aerodynamic coefficients (right column represents lift coefficient and left column represents drag coefficient) versus time step in wind velocity of 15 m/s and wind directions of (a) and (b): zero degree, (c) and (d): thirty degrees and (e) and (f): sixty degrees. (Each time step is equal to 0.7 seconds)

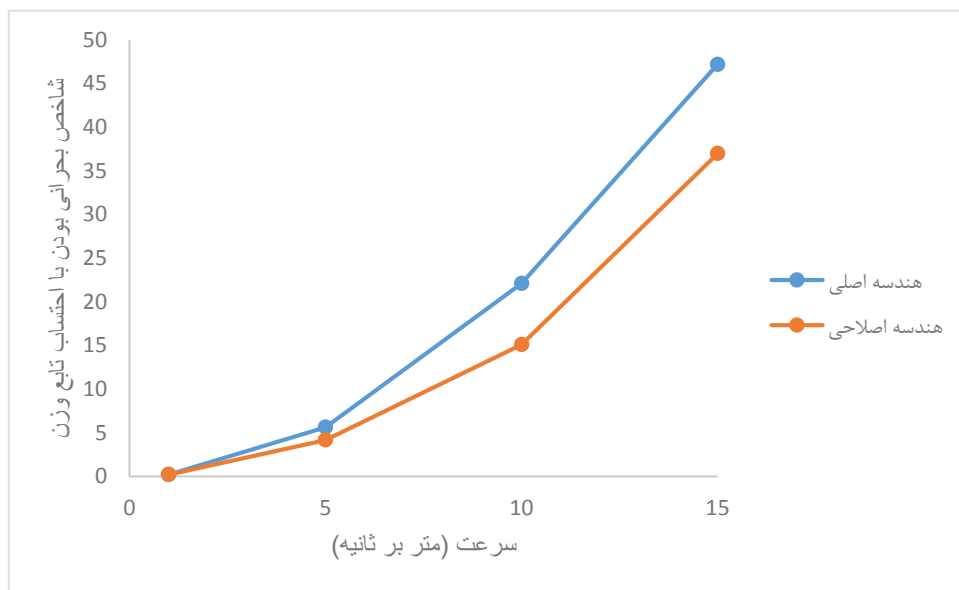
سی درجه منظم‌تر و قابل پیش بینی تر گردیده‌اند. حال به منظور درک بهتر جریان در اطراف برج، کانتورهای فشار حول جسم در میدان حل عددی در دو حالت متوسط‌گیری شده در زمان و لحظه‌ای در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه و در سه جهت وزش صفر، سی و شصت درجه در شکل ۱۹ به نمایش در آمده است. در اینجا هم همانگونه که در شکل ۱۹ قابل رؤیت می‌باشد در حالت صفر و ۶۰ درجه شکل جریان متوسط گیری شده تقریباً متقارن است. در موقعیت

به منظور درک بهتر نحوه نوسان نیروهای آیرودینامیکی در طول گذر زمان، نمودارهای تغییرات ضرایب برآ و پسا با گام زمانی به عنوان نمونه در سرعت وزش ۱۵ متر بر ثانیه و در جهات وزش صفر، سی و شصت درجه در شکل ۱۸ آورده شده است. همانگونه که در شکل ۱۸ قابل رؤیت است، تغییرات ضرایب آیرودینامیکی نسبت به زمان در هندسه اصلاح شده نسبت به هندسه اصلی مخصوصاً در موقعیت وزش صفر درجه و تا حدی در تغییرات ضرایب پسا در موقعیت وزش



شکل ۱۹. کانتورهای فشار متوسط (چپ) و لحظه‌ای (راست) در میدان حل عددی در دو جهت وزش از بالا به پایین صفر، سی و شصت درجه و سرعت وزش پانزده متر بر ثانیه

Fig. 19. Contours of average (left) and instantaneous (right) pressure in the numerical solution domain in three wind directions of from top to bottom, zero, thirty and sixty degrees and wind velocity of 15 m/s.



شکل ۲۰. مقایسه مجموع ضرایب آیرودینامیکی بین هندسه اصلی و اصلاحی در سرعت‌های مختلف

Fig. 20. Comparison of the summation of aerodynamic coefficients between original and modified geometry at different wind velocities

AoA موقعیت‌های وزش باد به برج می‌باشد که از ۰ تا ۶۰ درجه با فواصل ۱۰ درجه متغیر است. عبارت X_{AoA} از مقیاس بحرانی بودن سرعت وزش که در سرعت‌های وزش از ۱ تا ۱۵ متر بر ثانیه به صورت ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه متغیر است. همانگونه که در شکل ۲۰ قابل رؤیت است، هندسه اصلاحی در همه سرعت‌های وزش عملکرد بهتری نسبت به هندسه اصلی دارد. بنابراین می‌توان اذعان نمود از لحاظ مجموع ضرایب آیرودینامیکی هندسه اصلاحی عملکرد بهتری نسبت به هندسه اصلی برج دارد.

به منظور مقایسه هرچه بهتر و دقیق‌تر نتایج دو هندسه اصلی و اصلاح شده با یکدیگر نتایج شبیه‌سازی برای ضرایب آیرودینامیکی برآ و پسا در دو حالت مقادیر متوسط و مقادیر نوسانی در جدول ۶ آورده شده است.

حال با توجه به اهمیت فرکانس نوسانات ضرایب آیرودینامیکی برآ و پسا می‌بایست ابتدا فرکانس طبیعی سازه را معین نماییم. هرچه فرکانس نوسانات ضرایب آیرودینامیکی به فرکانس طبیعی سازه نزدیکتر باشد شرایط بحرانی‌تر خواهد بود. فرکانس طبیعی سازه به وسیله رابطه تقریبی که توسط راسمن و همکاران [۲۴] با استفاده از مجموعه داده‌های آسمان خراش‌های با ارتفاع‌های مختلف به دست آمده‌اند حدوداً برابر $0.278/\text{Z}$ تقریب زده شده

وزش صفر درجه در وضعیت میانگین‌گیری شده، ناحیه دنباله جریان به دو قسمت تقسیم شده است. همچنین دو ناحیه جدایش نیز دیده می‌شود. در موقعیت وزش سی درجه همچنان دنباله جریان به دو قسمت تقسیم شده با این تفاوت با موقعیت وزش صفر درجه که در موقعیت وزش سی درجه تفاوت فشار بین دو ناحیه زیاد می‌باشد. همچنین تعداد نواحی جدایش به سه ناحیه اضافه گردیده است. در موقعیت وزش شصت درجه دنباله جریان یک تکه شده است. تعداد نواحی جدایش چهار ناحیه می‌باشد که دو ناحیه دارای فشار کمتر هستند و دو ناحیه دارای فشار بیشتر می‌باشند

به منظور قیاس دو هندسه اصلی و اصلاحی، می‌توان کمیت‌های مقادیر متوسط و دامنه‌های نوسانات ضرایب برآ و پسا را در هر موقعیت وزش از صفر تا شصت درجه با یکدیگر جمع و در پارامتر تابع وزنی $\frac{V_{\infty}}{V_{\max}}$ ضرب نمود تا تاثیرات اهمیت بیشتر نیروهای آیرودینامیکی در سرعت‌های بزرگتر را نمایان کند (معادله (۵)) تا شکل ۲۰ به دست آید.

$$X_{AoA} = \sum_{AoA=0,10}^{60} \left(\frac{V_{\infty}^2}{V_{\max}^2} \right) \times \left(\overline{C_D} + (C_{D_{\max}} - C_{D_{\min}}) \right) + \left(\overline{C_L} + (C_{L_{\max}} - C_{L_{\min}}) \right) \quad (7)$$

جدول ۶. ضرایب آیرودینامیکی برای هندسه اصلی و اصلاح شده در موقعیت‌ها و سرعت‌های وزش مختلف

Table 6. Aerodynamic coefficients for the original and modified geometry at different wind incident angles and wind velocities

هندسه اصلاح شده							هندسه اصلی								
وزش موقعیت - مجموع	مجموع	ناپایا		پایا		سرعت (متر بر ثانیه)	موقعیت	مجموع موقعیت وزش	مجموع	ناپایا		پایا		سرعت (متر بر ثانیه)	موقعیت
		انوسانات ضریب پسا	انوسانات ضریب برآ	ضریب پسا	ضریب برآ					انوسانات ضریب پسا	انوسانات ضریب برآ	ضریب پسا	ضریب برآ		
۱۵/۳۴۸	۴/۰۷۳	۰/۶۸۳	۱/۴۰۸	۱/۹۶۲	۰/۰۲	۱	#	۲۷/۶۸	۶/۹۸۴۸	۱/۲۴	۲/۹۸۶	۲/۷۵۲	۰/۰۰۶۸	۱	
	۳/۷۸۵	۰/۵۹۱	۱/۴۴۴	۱/۷۳۴	۰/۰۱۶	۵			۶/۹۰۷	۱/۱۴۸	۳/۰۲۷	۲/۷۲۷	۰/۰۰۵	۵	
	۳/۹۲	۰/۵۵۳	۱/۵۶۳	۱/۷۹۹	۰/۰۰۵	۱۰			۶/۸۴۱۶۵	۱/۱۲۸	۲/۹۷	۲/۷۴۱	۰/۰۰۲۶۵	۱۰	
	۳/۵۷	۰/۵۴۶	۱/۳۵۶	۱/۶۵	۰/۰۱۸	۱۵			۶/۹۴۷	۱/۱۸۸	۲/۹۹۶	۲/۷۶۱	۰/۰۰۲	۱۵	
۱۶/۱۶۸	۴/۴۰۳	۰/۸۱۳	۱/۴۵۵	۱/۸۴۵	۰/۲۹	۱	#	۲۷/۰۳۹	۶/۷۹۱	۱/۴۳۳	۲/۴۹۱	۲/۵۷۱	۰/۲۹۶	۱	
	۳/۹۷۴	۰/۵۶۶	۱/۴۵۲	۱/۷۱۶	۰/۲۴	۵			۶/۷۲۸	۱/۲۰۷	۲/۶۷۲	۲/۵۳۸	۰/۳۱۱	۵	
	۳/۹۸۱	۰/۵۳۴	۱/۵۲۷	۱/۶۵۷	۰/۲۶۳	۱۰			۶/۶۹۷	۱/۲۸۸	۲/۵۲۴	۲/۴۷۱	۰/۴۱۴	۱۰	
	۳/۸۱	۰/۵۴۹	۱/۳۹	۱/۶۳۳	۰/۲۳۸	۱۵			۶/۸۲۳	۱/۲۶۶	۲/۶۹۹	۲/۵۵۱	۰/۳۰۷	۱۵	
۱۶/۸۰۹	۴/۶۹۲	۰/۷۸۴	۱/۴۶۵	۱/۷۱۹	۰/۷۲۴	۱	#	۲۶/۱۹۴	۶/۳۶۲	۱/۴۱۳	۲/۰۹۷	۲/۲۱۲	۰/۶۴	۱	
	۴/۱۲۲	۰/۵۲۳	۱/۴۲۷	۱/۵۰۸	۰/۶۶۴	۵			۶/۵۹۲	۱/۴۲۲	۲/۱۵۶	۲/۱۲	۰/۸۹۴	۵	
	۴/۰۴۷	۰/۴۹۸	۱/۴۷۲	۱/۴۱۲	۰/۶۶۵	۱۰			۶/۷۱	۱/۴۱۲	۲/۱۷۵	۲/۰۷۴	۱/۰۴۹	۱۰	
	۳/۹۴۸	۰/۵۲۶	۱/۳۶۹	۱/۴۴۵	۰/۶۰۸	۱۵			۶/۵۳	۱/۴۵۷	۲/۱۱	۲/۱۲۳	۰/۸۴	۱۵	
۱۸/۳۵۲	۵/۰۷	۰/۷	۱/۶۵	۱/۴۱	۱/۳۱	۱	#	۲۲/۵۹۷	۶/۱۴۹	۰/۷۷۱	۲/۰۲۲	۱/۵۵۶	۱/۸	۱	
	۴/۵۴۷	۰/۴۸۶	۱/۵۲۶	۱/۲۴۲	۱/۲۹۳	۵			۵/۰۰۴	۰/۶۱۴	۱/۴۹	۱/۳۵۱	۱/۵۴۹	۵	
	۴/۴۴۲	۰/۴۹۶	۱/۵۲۲	۱/۱۵۷	۱/۲۶۷	۱۰			۵/۲۷۸	۰/۶۹۷	۱/۶۴۶	۱/۳۵۹	۱/۵۷۶	۱۰	
	۴/۲۹۳	۰/۴۸۳	۱/۴۵۷	۱/۱۹۱	۱/۱۶۲	۱۵			۶/۱۶۶	۰/۸۲	۲/۰۶۹	۱/۵۱۷	۱/۷۶	۱۵	
۲۴/۶۲۹	۸/۷۹۲	۱/۸	۴/۶۸۷	۱/۴۹	۰/۸۱۵	۱	#	۳۲/۵۴۹	۶/۶۱۷	۰/۸۱۵	۳/۱۶۸	۱/۶۷۴	۰/۹۶	۱	
	۵/۸۸۸	۰/۸	۲/۹۶۳	۱/۰۹۸	۱/۰۲۷	۵			۹/۸۱۸	۱/۹۳۶	۵/۳۱۴	۱/۷۸۲	۰/۷۸۶	۵	
	۵/۱۰۱	۰/۶۱۸	۲/۴۳۹	۱/۰۱۷	۱/۰۲۷	۱۰			۹/۵۸۷	۱/۸۵۱	۵/۱۲۲	۱/۷۷۲	۰/۸۴۲	۱۰	
	۴/۸۴۸	۰/۵۷	۲/۲۲۳	۰/۹۸۲	۱/۰۷۳	۱۵			۶/۵۲۷	۰/۷۲	۳/۱۹۷	۱/۶۶۴	۰/۹۴۶	۱۵	
۳۰/۹۰۴	۱۰/۱۳۵	۱/۷۹۸	۶/۰۹۸	۱/۸۱۳	۰/۴۲۶	۱	#	۲۶/۳۷۷	۵/۴۷۹۸	۰/۵۷۴	۲/۹۸۹	۱/۸۶۲	۰/۰۵۴۸	۱	
	۵/۷۳۲	۰/۵۳۱	۳/۳۳۳	۱/۳۲۳	۰/۵۴۵	۵			۷/۶۶۳	۰/۸۰۶	۴/۸۲۸	۱/۷۷۶	۰/۲۵۳	۵	
	۵/۳۴۸	۰/۴۲۹	۳/۱۶۲	۱/۲۴۸	۰/۵۰۹	۱۰			۶/۸۷۴	۰/۷۹۸	۳/۹۹	۱/۷۸۴	۰/۳۰۲	۱۰	
	۹/۶۸۹	۱/۵۸۷	۵/۸۷۶	۱/۵۵۱	۰/۶۷۵	۱۵			۶/۳۶	۰/۷۲	۳/۵۷۸	۱/۸۶۵	۰/۱۹۷	۱۵	
۳۲/۱۵۸	۸/۸۲۸	۰/۸۱۲	۶/۰۸۸	۱/۸۴۸	۰/۰۸	۱	#	۳۱/۶۱۵	۸/۱۱۵	۱/۰۳	۴/۸۵۱	۲/۱۷۳	۰/۰۶۱	۱	
	۹/۳۷۹	۱/۱۱۸	۶/۲۶۸	۱/۷۰۷	۰/۲۸۶	۵			۷/۹۴	۱/۱۷۳	۴/۶۲	۲/۱۲۳	۰/۰۲۴	۵	
	۷/۱۲	۰/۳۶۵	۵/۰۵۵	۱/۴۵۸	۰/۲۴۲	۱۰			۷/۷۲	۱/۱	۴/۳۶۲	۲/۱۱۶	۰/۱۴۲	۱۰	
	۶/۸۲۱	۰/۳۶۸	۴/۸۴۶	۱/۴۷۷	۰/۱۴	۱۵			۷/۸۳۹۵۲	۱/۰۸۱	۴/۶۷۱	۲/۰۸۷	۰/۰۰۵۲	۱۵	

هندسه اصلی و موقعیت وزش ۱۰ درجه برای هندسه اصلاحی می‌باشد. بحرانی‌ترین فرکانس نوسانات ضرایب برآ و پسا با فرکانس طبیعی سازه قیاس شده که در زاویه وزش صفر درجه و سرعت پانزده متر بر ثانیه رخ می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده و جهت و سرعت وزش باد غالب در شهر تهران، در صورت گردش برج حول محور در راستای ارتفاع به اندازه سی الی پنجاه درجه ساعتگرد یا پادساعتگرد، برج از لحاظ روبرو قرار گرفتن موقعیت وزش‌های بحرانی با جهات دارای تعداد روزهای بادی بیشتر در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد. همچنین یک هندسه اصلاحی برای بهبود شرایط آیرودینامیکی برج پیشنهاد گردیده است که در همه موارد عملکرد بهتری از لحاظ پارامتر قیاسی تعریف شده X_{A0A} در سرعت‌های وزش مختلف نسبت به هندسه اصلی دارد. البته هندسه اصلاحی سبب افزایش فرکانس نوسانات ضرایب برآ و پسا می‌شود که با توجه به مقدار تقریب زده شده برای فرکانس طبیعی برج، این افزایش ناچیز است. لذا می‌توان گفت هندسه اصلاحی به طور کلی سبب بهبود خواص آیرودینامیکی مقطع برج گردیده است.

است. حال از آنجایی که بیشینه فرکانس نوسانات پسا و برآ در هندسه اصلی به ترتیب برابر ۰/۰۷ و ۰/۰۳۷ و در هندسه اصلاحی برابر ۰/۰۸۸۴ و ۰/۰۴۵۸ می‌باشد، شاهد افزایش ۲۰/۸ درصدی در فرکانس نوسانات ضریب پسا و ۱۹/۲ درصدی در فرکانس نوسانات ضریب برآ می‌باشیم. اما با توجه به اینکه فرکانس نوسانات ضرایب آیرودینامیکی برآ و پسا هنوز فاصله زیادی تا فرکانس طبیعی سازه دارد، می‌توان گفت که هندسه اصلاحی سبب بحرانی‌تر شدن شرایط نشده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق وزش باد در چهار سرعت متفاوت ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه و از هفت جهت وزش مختلف حول هندسه دوبعدی مقطع برج بین المللی تهران به صورت عددی شبیه‌سازی گردید و بحرانی‌ترین شرایط از نظر مجموع مقادیر متوسط و دامنه نوسانات ضرایب و همچنین مقادیر فرکانس نوسانات ضرایب برآ و پسا در سرعت‌های ثابت معین گردید. بحرانی‌ترین وضعیت وزش برای سرعت ۱۵ متر بر ثانیه موقعیت وزش صفر درجه برای

۶- فهرست علائم

t	زمان.....
ρ	چگالی.....
V	سرعت.....
P	فشار.....
τ_{ji}	تانسور تنش.....
μ	ضریب اولیة لزجت.....
F	نیروهای حجمی بر واحد جرم.....
λ	ضریب ثانویة لزجت.....
Γ_{ω} و Γ_k	انتشار مؤثر.....
σ_{ω} و σ_k	اعداد پرنتل مغشوش.....
μ_t	لزجت مغشوش.....
S	مقدار نرخ کرنش.....
D_{ω}	اصلاح انتشار پیوندی.....

- Instrumentation, 55 (2017) 23-36.
- [11] Y. Yang, R. Liu, R. Guo, L. Chen, P. Song, H. Hu, Numerical analysis of underwater flow past columnar projectile with different cross-sections at high Reynolds numbers, *International Journal of Vibroengineering*, 20(2) (2018) 1179-1193.
- [12] A. B. Daemei, E. M. Khotbehsara, E. M. Nobarani, P. Bahrami, Study on wind aerodynamic and flow characteristics of triangular shaped tall buildings and CFD simulation in order to assess drag coefficient, *Ain Shams Engineering Journal*, 10 (2019) 541–548.
- [13] P. Sanyal, S. K. Dalui, Comparison of aerodynamic coefficients of various types of Y-plan-shaped tall buildings, *Asian Journal of Civil Engineering*, 21 (2020) 1109–1127.
- [14] P. Sanyal, S. K. Dalui, Effect of Corner Modification on ‘Y’ Plan Shaped Tall Building Under Wind Load, *Wind and Structures*, 30(3) (2020) 245-260.
- [15] P. Sanyal, S.K. Dalui, Effects of side ratio for ‘Y’ plan shaped tall building under wind load, Tsinghua University Press and Springer-Verlag GmbH Germany, 14 (2020) 1221–1236.
- [16] P. Sanyal, S. K. Dalui, Effects of Internal Angle Between Limbs of “Y” Plan Shaped Tall Building Under Wind Load, *Journal of Building Engineering*, 33 (2021).
- [17] R.L. Panton, *Incompressible Flow*, 4 ed., John Wiley & Sons, 2013.
- [18] D. C. Wilcox., *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Inc. La Canada, California. (1998).
- [19] Ansys Documentation, *Fluent, Theory Guide, Turbulence, Standard BSL and SST K-Omega Models*
- [20] M. Latifi, A. R. Jahangirian, Solving the flow around cylinders with elliptical cross-sections at different Reynolds numbers, Amir Kabir University of Technology (Tehran Polytechnic), 2019. (In Persian)
- [21] E. Achenbach, Distribution of Local Pressure and Skin Friction Around a Circular Cylinder in Cross-Flow Up to $Re=5 \times 10^6$, *J. Fluid Mech.*, 34 (1968) 625-639.
- [22] A. Travin, M. Shur, M. Strelets, P. Spalart, Detached-
- [1] H. Hayashida, Y. Iwasa, Aerodynamic Shape Effects of Tall Building for Vortex Induced Vibrations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 33 (1990) 237-242.
- [2] D. Yu, A. Kareem, Numerical Simulation of Flow Around Rectangular Prism, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 68 (1997) 195-208.
- [3] H. Kawai, Effect of Corner Modifications on Aeroelastic Instabilities of Tall Buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 76 (1998) 719-729.
- [4] A. Nejat, A. R. Jahangirian, S. M. H. Karimian, Unsteady Flow Analysis Around Tall Tower Sections, in: *The First International and The Third National Iran Aerospace Association Conference*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2000, 99-107. (In Persian)
- [5] F. Xu, X. Ying, Z. Zhang, Prediction of unsteady flow around a square cylinder using RANS, *Applied Mechanics and Materials*, 54 (2011) 1165-1170.
- [6] B.E. Kumar, Y. Tamura, A. Yoshida, Y. C. Kim, Q. Yang, Local and Total Wind Force Characteristics of Triangular-Section Tall Buildings, in: *22nd Wind Engineering Symposium*, 2012, 179-184.
- [7] S. Mukherjee, S. Chakraborty, S. Dalui, A. K. Ahuja, Wind induced pressure on ‘Y’ plan shape tall building, *Wind and Structures an International Journal*, 19(5) (2014) 523-540.
- [8] B. G. Jebaraj, F. Christy, CFD Simulations of Flow Around Octagonal Shaped Structures, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9 (5) (2016) 72 - 76.
- [9] W. Yuan, Z. Wang, H. Chen, K. Fan, Numerical analyses of aerodynamic characteristics of integrated L-shaped high-rise building, *Advances in Engineering Software*, 000 (2017) 1–10.
- [10] S. Yagmur, S. Dogan, M. H. Aksoy, I. Goktepli, M. Ozgoren, Comparison of flow characteristics around an equilateral triangular cylinder via PIV and Large Eddy Simulation methods, *Flow Measurement and*

the fundamental natural frequencies of buildings and the implications concerning the dynamic analysis of structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 69 (1980) 763-776.

Eddy Simulations Past a Circular Cylinder, *Flow Turbulence and Combustion*, 63 (1999) 293-313.

[23] https://mesonet.agron.iastate.edu/sites/dyn_windrose.phtml?station=OIII&network=IR__ASOS

[24] B. R. Ellis, an assessment of the accuracy of predicting

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. S. Moqaddam, A. Jahangirian, *Aerodynamic Evaluation and Modification of Tehran International Tower Section Exposed to Annual Winds*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(11) (2023) 2519-2542.

DOI: 10.22060/mej.2022.21275.7415

