

Code Evaluation of Wind Loading for High-Rise Buildings with Constant and Variable Cross Section in Tehran

Mohammad Reza Adlparvar^{*1}, Masud Mahmoodabadi², Mohammad Hossein Taghavi Parsa³

1- Associate Professor, Faculty of engineering, university of Qom, Qom, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of engineering, university of Qom, Qom, Iran

3- Ph.D. student of Civil Engineering, Structural Engineering, University of Qom, Iran

Abstract

Today, high-rise buildings are more welcomed due to the lack of space and the increasing population in large cities. The effect of wind on tall structures in the direction of the wind and its fluctuations are vulnerable. To design a structure against lateral loads such as wind load, the main design criterion should be provided. The importance of the impact of the lateral force increases with the height of the building. Thus, in this type of structures, mainly by wind power, design considerations with height, becomes more complicated. At a certain height, the lateral displacement of the longitudinal structures increases so that the controller's considerations are raised. The characteristics of the wind pressure on the structure are a function of the wind characteristics, structural geometry, and the characteristics of the adjacent region. Typically, standards for structures and buildings that have unusual shapes or positions are not used. The purpose of this study was to investigate the proposed design methods for calculating the wind load in international and domestic standards for the study of long and stable structures in Tehran. In this study, American, European, Japanese and Australian standards have been used for two types of structures, and their results have been compared to those derived from the National Building Regulations of Iran. The results of this study indicate that Iran's national regulations for proposed structures that are considered in Tehran are more conservative than the results of other standards

Keywords :High-rise Buildings, lateral load of Wind, Fixed and Variable Section, Buildings Force, Design Guidelines, Part Six (from the National Building Regulations of Iran).

بررسی آئین‌نامه‌ای بار باد سازه‌های بلند مرتبه بتنی با مقطع ثابت و متغیر واقع در شهر تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۰۸-۱۳

محمد رضا عدل پرور *

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

Adlparvar@Qom.ac.ir

مسعود محمودآبادی

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

m.mahmoudabadi@qom.ac.ir

محمد حسین تقوی پارسا

دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

mh.taghavi@mail.qom.ac.ir

چکیده

امروزه با توجه به کمبود فضا و افزایش روزافزون جمعیت در شهرهای بزرگ، ساختمان‌های بلند با استقبال بیشتری روبرو هستند. سازه‌های بلند در برابر تأثیرات باد در راستای جهت باد و نوسانات حاصل از آن آسیب‌پذیر هستند. برای طراحی یک سازه در برابر بارهای جانبی نظیر بار باد، معیار اصلی طراحی باید تأمین شود. اهمیت اثر نیروی جانبی با بالا رفتن ارتفاع ساختمان افزایش می‌یابد. از این رو در این نوع سازه‌ها، عمدتاً تحت تأثیر نیروی باد، ملاحظات طراحی با افزایش ارتفاع، پیچیده‌تر می‌شود. در ارتفاع معینی تغییر مکان جانبی سازه‌های بلند چنان افزایش می‌یابد که ملاحظات سختی کنترل کننده مطرح می‌گردند. ویژگی‌های فشار ناشی از باد بر سازه تابعی از ویژگی‌های باد، هندسه سازه و مشخصات منطقه مجاور آن است. معمولاً استانداردها برای سازه‌ها و ساختمان‌هایی که دارای شکل یا موقعیت غیرمعمول هستند استفاده نمی‌شوند. هدف از پژوهش حاضر بررسی روش‌های طراحی ارائه شده جهت محاسبه بار باد در استانداردهای بین‌المللی و داخلی جهت بررسی سازه‌های بلند با مقطع ثابت و متغیر واقع در شهر تهران است. در این پژوهش از استانداردهای آمریکا، اروپا، ژاپن و استرالیا برای دو نوع سازه بلند استفاده شده و نتایج آنها با خروجی حاصل از مقررات ملی ساختمان ایران مقایسه گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقررات ملی ایران برای سازه‌های مفروض که در شهر تهران در نظر گرفته شده است، نسبت به نتایج سایر استانداردهای مورد بررسی محافظه‌کارانه‌تر است. کلمات کلیدی: سازه بلند بتنی، بار جانبی باد، مقطع ثابت و متغیر، نیروی طبقات، آئین‌نامه‌های طراحی، مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران.

امروزه با توجه به کمبود زمین و افزایش روزافزون جمعیت در شهرهای بزرگ، ساختمان‌های بلند با استقبال بیشتری روبرو هستند. از منظر سازه‌ای، برای یک ساختمان بلند تعاریف متفاوتی ذکر شده است. پریود بیش از ۰/۷ ثانیه و نسبت ارتفاع به بعد برای یک سازه ملاک‌هایی برای تعریف یک سازه بلند بیان شده است [۱].

برای طراحی یک سازه در برابر بارهای جانبی نظیر بار باد، معیار اصلی طراحی باید تأمین شود. اهمیت اثر نیروی جانبی با بالا رفتن ارتفاع ساختمان افزایش می‌یابد. از این رو در این نوع سازه‌ها، عمدتاً تحت تأثیر نیروهای باد، ملاحظات طراحی با افزایش ارتفاع، پیچیده‌تر می‌شود. برای یک سازه بلند در ارتفاع معینی تغییر مکان جانبی چنان افزایش پیدا می‌کند که ملاحظات سختی کنترل‌کننده مطرح می‌گردند.

ویژگی‌های فشار ناشی از باد بر سازه‌ها تابعی از ویژگی‌های باد، هندسه سازه و هندسه منطقه مجاور آن است. همچنین طبق مطالعات مهندسی باد نیز اصلاحات آیرودینامیکی نظیر تغییر شکل و سطح بادگیر سازه تأثیر قابل توجهی در کاهش اثرات بار باد دارد [۱].

به طور کلی هر اقلیمی با توجه به باد حاکم بر آن از دستورالعمل خاصی جهت طراحی سازه‌های بلند آن منطقه استفاده می‌نماید. با این وجود، استانداردها برای سازه‌ها و ساختمان‌هایی که دارای شکل یا موقعیت غیرمعمول هستند استفاده نمی‌شوند. با گسترش صنعت ساخت و ساز و توسعه استانداردهای بین‌المللی نیاز به درک بهتر تفاوت‌های بین روش‌های مختلف بارگذاری باد مورد نیاز است. غالباً بار باد بر اساس این استانداردها با استفاده از رویکرد ارتعاش تصادفی اثر اوج باد تنظیم شده است.

در پژوهش حاضر ضمن بررسی روش طراحی بار باد در استانداردهای بین‌المللی و داخلی برای دو نوع سازه بلند، به مقایسه نتایج آنها برای سازه‌های مفروض پرداخته شده است.

۲- تاریخچه سازه‌های بلند

در اواخر قرن نوزدهم، ساختمان‌های بلند در ایالات متحده آمریکا ظهور پیدا کردند. نخستین ساختمان بلند در سال ۱۸۸۵ با نام ساختمان بیمه خانه واقع در شهر شیکاگو، با ارتفاع ۵۵ متر، اولین آسمان‌خراش جهان نام گرفته است [۲].

امروزه با وجود عوامل پیچیده اقتصادی، زیبایی‌شناسی، فن‌آوری، مقررات و سیاست‌های شهری، ساختمان‌های بلند به سرعت در بخش‌هایی از جهان، به ویژه در کشورهای آسیایی مانند چین، اندونزی، ژاپن و امارات متحده عربی در حال احداث بوده و به نماد برجسته شهرها تبدیل شده است [۲].

در حال حاضر بیش از صد ساختمان بلند بالای ۳۰۰ متر ساخته شده در جهان وجود دارد. در حال حاضر برج خلیفه^۱ در دبی امارات متحده عربی بلندترین ساختمان جهان است که ۱۶۳ طبقه و ۸۲۹/۸ متر ارتفاع دارد. انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۰، این رکورد با ظهور برج جده که یک ساختمان ۱۶۷ طبقه ۱۰۰۰ متری در حال ساخت در شهر جده است، شکسته شود [۲]. همچنین تعداد کل ساختمان‌های بلند ساخته شده در کشورهای مختلف تا سال (۲۰۱۷ میلادی) در جدول (۱) آمده است. مطابق شکل (۲) نیز روند افزایش ارتفاع سالیان گذشته سازه‌های بلند بالای ۴۰۰ متر نشان داده شده است. جدول (۲) لیست ۲۸ برج شکل (۲) را نشان می‌دهد.

۳- مروری بر ادبیات فنی

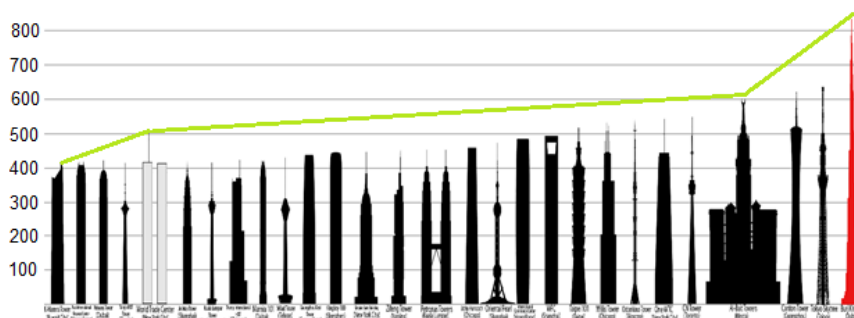
مطالعه و بررسی بار باد وارد بر سازه‌های مختلف طی سالیان گذشته مورد توجه محققان بوده است. با توجه به شکل (۳) بررسی مقالات منتشر شده در ۱۰ سال اخیر حاکی از کاهش توجه به موضوع بررسی و طراحی سازه‌های بلند در برابر بار

^۱ Burj Khalifa

جانبی باد در تحقیقات محققان طی سال‌های اخیر است. بیشترین تعداد مقالات بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ با بیش از ۱۰۰ مقاله پژوهشی معتبر بوده است.

جدول (۱): تعداد کل ساختمان‌های بلند ساخته شده در مختلف تا سال (۲۰۱۷ میلادی) [۲]

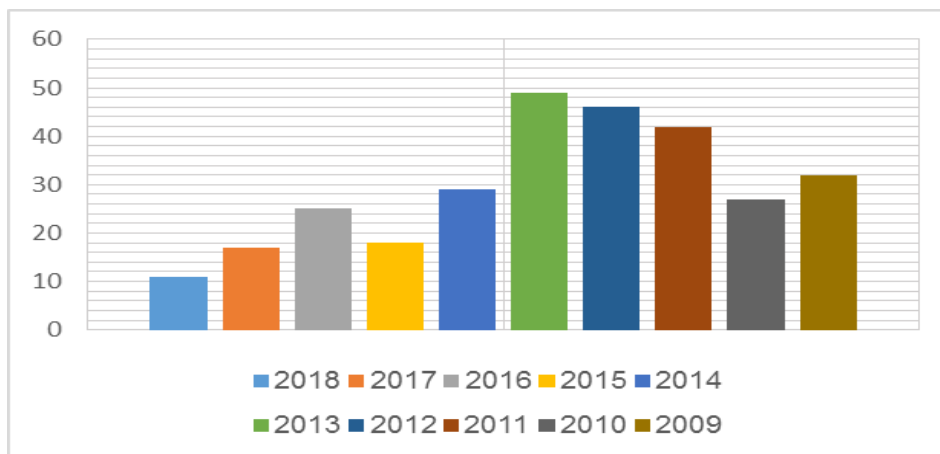
ردیف	کشور	تعداد کل سازه‌های بلند	بالای ۱۰۰ متر	بالای ۲۰۰ متر	بالای ۳۰۰ متر
۱	ایالات متحده امریکا	۴۶۶۴	۲۵۱۷	۱۸۰	۱۷
۲	چین	۲۸۲۹	۱۸۹۹	۵۰۳	۴۹
۳	کانادا	۱۰۵۲	۴۷۲	۲۱	۰
۴	استرالیا	۹۳۰	۳۴۹	۳۱	۱
۵	روسیه	۷۹۷	۲۱۸	۱۶	۵
۶	اندونزی	۵۹۷	۱۵۴	۳۱	۰
۷	ژاپن	۵۵۶	۴۶۷	۳۷	۱
۸	برزیل	۵۳۲	۱۷۶	۱	۰
۹	امارات متحده عربی	۴۱۳	۲۸۳	۹۱	۲۳
۱۰	انگلستان	۳۶۸	۶۶	۵	۱



شکل (۲): بلندترین سازه‌های جهان (۴۰۰ متر به بالا)

جدول (۲): لیست ساختمان‌های بلند بالای ۴۰۰ متر

ردیف	نام برج (کشور - سال ساخت)	ارتفاع	طبقات	ردیف	نام برج (کشور - سال ساخت)	ارتفاع	طبقات
۱	برج خلیفه، دبی، (امارات-۲۰۱۰)	۸۲۸	۱۶۰	۱۵	برج زیفنگ، نانجینگ، (چین-۲۰۰۹)	۴۵۰	۸۹
۲	توکیو اسکای تری، توکیو، (ژاپن-۲۰۱۲)	۶۳۴	۳۲	۱۶	ساختمان امپایر استیت، نیویورک، (امریکا-۱۹۳۱)	۴۴۳	۱۰۲
۳	برج کانتون، گوانگژو، (چین-۲۰۰۹)	۶۰۰	۳۷	۱۷	کی کی ۱۰۰، شنژن، (چین-۲۰۱۱)	۴۴۲	۱۰۰
۴	برج آبراه البیث، مکه- (۲۰۱۱)	۶۰۱	۱۲۰	۱۸	مرکز تجارت جهانی گوانگژو، (چین-۲۰۱۰)	۴۳۹	۱۰۳
۵	برج سیان، تورنتو، (کانادا-۱۹۷۶)	۵۵۳	۱۴۷	۱۹	برج میلاد، (تهران-۲۰۰۷)	۴۳۷	۱۲
۶	مرکز تجارت جهانی یک، (امریکا-۲۰۱۳)	۵۴۱	۱۰۴	۲۰	مارینا ۱۰۱، (دبی-۲۰۰۶)	۴۲۵	۱۰۱
۷	برج استانکینو، مسکو، (روسیه-۱۹۶۷)	۵۴۰	۱۲۰	۲۱	برج و هتل بین‌المللی ترامپ، (امریکا-۲۰۰۹)	۴۲۳	۹۸
۸	برج ویلیس، شیکاگو، (امریکا-۱۹۷۴)	۵۲۷	۱۰۸	۲۲	برج کوالالامپور، (مالزی-۱۹۹۵)	۴۲۱	۶
۹	تایپه ۱۰۱، تایپه، (تایوان-۲۰۰۳)	۵۰۹	۱۰۱	۲۳	برج جین مائو، (شانگهای-۱۹۹۸)	۴۲۰	۸۸
۱۰	مرکز تجارت جهانی، (چین-۲۰۰۸)	۴۹۲	۱۰۱	۲۴	مرکز تجارت جهانی، (نیویورک-۱۹۷۳)	۴۱۵	۱۱۰
۱۱	مرکز تجارت بین‌المللی، (هنگ کنگ-۲۰۱۰)	۴۸۴	۱۱۸	۲۵	برج رادیو و تلویزیونی تیانجین، (چین-۱۹۹۱)	۴۱۵	-
۱۲	برج مروارید خاور، (چین-۱۹۹۶)	۴۶۸	۱۴	۲۶	برج پرنسس، (دبی، ۲۰۱۲)	۴۱۴	۱۰۱
۱۳	مرکز جان هنکاک، شیکاگو، (امریکا-۱۹۶۹)	۴۵۷	۱۰۰	۲۷	مرکز تجارت بین‌المللی، (هنگ کنگ-۲۰۰۳)	۴۱۳	۸۸
۱۴	برج پتروناس، کوالالامپور، (مالزی-۱۹۹۸)	۴۵۲	۸۸	۲۸	برج الحمراء، (کویت-۲۰۱۲)	۴۱۲	۸۰



شکل (۳): تعداد مقالات منتشر شده در ۱۰ سال اخیر به تفکیک سال

نخستین بار در سال ۱۹۸۲ کلارک [۳] با هدف ارائه جنبه‌های طراحی ساختاری مورد نیاز در یک آئین‌نامه ساختمان ساحلی با استفاده از دستورالعمل‌های موجود و به طور خاص برای ساختمان‌های ساحلی فلوریدا پرداخت. او در نهایت بیان داشت که استانداردهای طراحی ویژه برای ساخت سازه‌های ساحلی در معرض طوفان مورد نیاز است. همچنین اینکه نیاز است تا یک آئین‌نامه ساختمان‌های ساحلی به منظور تکمیل حداقل استانداردهای طراحی ساختمان‌ها توسعه یابد.

سال ۲۰۰۲ سعادت و همکاران [۴] نیز با استفاده از الگوریتم شبکه‌های عصبی و داده‌های به دست آمده از آزمایش تونل باد برای برآورد بارهای باد، به تخمین دقیق بارهای باد وارد بر یک ساختمان سه طبقه ساحلی پرداخته و برش پایه این سازه را محاسبه نمودند.

در سال ۲۰۰۷ مندیس و همکاران [۵] به بررسی بارگذاری بار باد بر روی سازه‌های بلند پرداختند. آنها بیان داشتند که بارگذاری استاتیکی سازه‌های بلند بر خلاف سازه‌های معمولی با ارتفاع کم و متوسط در طراحی مقابل بار باد می‌تواند نتایج غیر قابل قبولی در پی داشته باشد. به این ترتیب ممکن است، به راحتی منجر به نتایج اشتباه و تخمین‌های پایین‌تر از حد واقعیت شود. آنها در مقاله خود یک طرح کلی برگرفته از روش‌های طراحی پیشرفته بار باد نظیر دستورالعمل بار باد استرالیا را مد نظر قرار داده و مسائل طراحی کلیدی از جمله پاسخ دینامیکی، اثرات رزونانس، شتاب، دمیدن، سختی سازه را دخالت دادند. در نهایت بر انجام آزمایش تونل باد، که دارای مزایای بالقوه در تولید بار باد طراحی و اثرات آن بر ساختمان‌های بلند است نیز تأکید شده است.

هولمز و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۸ سه نوع ساختمان مشخص را تحت شرایط بادگیری متفاوت در مناطق ساحلی، روستایی و شهری مورد بررسی قرار دادند. طبق فرض آنها ساختمان ۴۸ متری سازه با ارتفاع متوسط و ساختمان ۱۸۳ متری، سازه بلند در نظر گرفته شد. آنها در تحقیق خود نتایج حاصل از آئین‌نامه‌های ۱۵ کشور مختلف را با یکدیگر مقایسه نمودند. در نهایت مشخص گردید که آئین‌نامه‌های کشورهای آسیای شرقی و اقیانوسیه در مورد سازه بلند مورد بررسی پاسخگو نیستند. همچنین اختلاف نتایج با یکدیگر بین ۱۴ تا ۱۸ درصد بوده است. البته این نتیجه ممکن است به این دلیل باشد که بسیاری از روش‌ها مشابه با یکدیگر هستند؛ برای مثال، چندین دستورالعمل کشورهای شرقی از روش‌های استفاده شده در استانداردهای کشور آمریکا و استرالیا و مقررات ملی کانادا برای پاسخ در امتداد باد استفاده می‌کنند.

گو در سال ۲۰۰۹ [۷] مطالعه‌ای بر روی پاسخ سازه‌های بارهای باد ساختمان‌های بلند انجام داده است. در این تحقیق ضمن انجام مطالعه موردی در نهایت، کاربرد عملی مطالعات مقاومت سازه در برابر باد بر روی ساختمان‌ها و سازه‌های بلند، با استفاده از برج تلویزیون جدید گوانگژو ارائه شده است.

میتال و همکاران [۸] نیز در سال ۲۰۱۴ به معضلات یک ساختمان بلند خاص واقع در کشور هند، با توجه به نیروهای باد پرداختند. آنها در تحقیق خود با استناد به مقررات ملی کشور هند (IS-875-Pt.3) و داده‌های تونل باد پارامترهای طراحی را برای یک برج بلند ۲۲۰ متری مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که نتایج دستورالعمل این کشور نسبت به نتایج تونل باد بسیار محافظه‌کارانه هستند و هزینه ساخت و ساز را برای چنین ساختمان‌هایی به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. بنابراین استفاده از تونل باد و استناد به نتایج آن را به عنوان یک روش معقول معرفی نمودند.

در سال ۲۰۱۸ نیز شاعر [۹] در تز دکتری خود به بررسی شکل آیرودینامیکی بهینه سازه‌های بلند در برابر بار جانبی باد پرداخت. او در نهایت با روش عددی به این نتیجه رسید که سازه با مقطع تابیده در برابر پدیده گرداب‌های بادی^۱ بهترین عملکرد را داشته است.

در پژوهش حاضر از چهار استاندارد بین‌المللی استفاده شده است. دستورالعمل ایالات متحده آمریکا توسط انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE) تهیه شده است. مطابق فصل ششم آئین‌نامه حداقل بارهای طراحی برای ساختمان‌ها و سازه‌های دیگر (ASCE 7) [۱۰] بارهای باد طراحی برای ساختمان‌ها و اجزای آن باید با استفاده از یکی از روش‌های ساده شده برای ساختمان‌های مشخص، روش تحلیلی و روش تونل باد تعیین شود.

دستورالعمل بارهای روی سازه‌های اروپا (Eurocode 1) در بخش چهارم خود به بارهای باد وارد بر سازه پرداخته است. الزامات طراحی این بخش برای ساختمان‌های با ارتفاع تا ۲۰۰ متر و پل‌ها با دهانه تا ۲۰۰ متر، ضمن تأمین معیارهای مورد نیاز پاسخ دینامیکی قابل استفاده است. همچنین ارتعاشات پیچشی که در ساختمان‌های بلند با هسته مرکزی تشکیل می‌گردد را در نظر نمی‌گیرد [۱۱].

دستورالعمل ژاپن (AIJ) در فصل ششم خود به بارهای باد وارد بر سازه پرداخته است. در این فصل، بارهای باد برای طراحی ساختمان‌هایی که در معرض بادهای قوی انعطاف‌پذیری به خود را حفظ می‌کنند، توصیف می‌شود. همچنین بارهای طراحی برای سازه و اجزای آنها بیان شده است. مطابق این آئین‌نامه برای طراحی بار باد وارد بر هر سازه، ترکیبی از بار باد جانبی و بار باد سقف باید در نظر گرفته شود. برای تعیین بار باد هر سازه نیز باید بار باد وارد بر سازه در جهت باد در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

در دستورالعمل طراحی بارهای وارد بر سازه که به صورت مشترک توسط استرالیا و نیوزیلند منتشر شده، بخش دوم به بارهای باد پرداخته است. این استاندارد در اصل بر اساس دستورالعمل ISO-4354 تهیه شده است. در استاندارد (AS/NZS 1170.2) علاوه بر بیان بادهای غالب سالیانه در منطقه، روشی را برای تعیین سرعت باد و اعمال باد در طراحی سازه‌ها و مواردی که موجب گردباد می‌شود، بیان شده است. این استاندارد ساختمان‌هایی که کمتر از ۲۰۰ متر ارتفاع دارند و سازه‌های غیر از سازه‌های دریایی، نظیر پل‌ها و برج‌های مخابراتی را نیز تحت پوشش قرار می‌دهد [۱۳].

در داخل کشور نیز مبحث ششم مقررات ملی ساختمان که مربوط به بارهای وارد بر ساختمان‌ها است، در بخش ششم به بارهای باد پرداخته شده است [۱۴]. اخیراً نیز پرداختن به موضوع بار باد وارد بر سازه‌های بلند بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. البته بیشتر تحقیقات داخلی صورت گرفته در این حوزه، پیرامون سیستم‌های سازه‌ای بوده است. در حوزه طراحی در برابر بار باد، محمودی و همکاران [۱۵] روش‌های مختلف تحلیل یک سازه بلند را تحت اثر بار باد مورد بررسی قرار دادند. آنها ضمن پرداختن به تعاریف سازه‌های بلند و بررسی اثرات بار باد بر این سازه‌ها در نهایت بیان داشتند که بررسی اثر این بار در سازه‌های بیش از ۱۰ طبقه الزام دارد. همچنین بیان نمودند که شکل و نوع سازه می‌تواند تأثیر بسزایی در پاسخ و مقاومت سازه‌های بلند در برابر فشارهای ناشی از باد داشته باشد. دنیایی [۱۶] نیز در مقاله خود ضمن بررسی اثر بار جانبی باد بر ساختمان‌های بلند، به تأثیر شکل ساختمان بر کاهش این نیرو بر سازه پرداخته است. نژادخیز [۱۷] در مطالعه خود به ارزیابی سازه‌ای ساختمان‌های بلندمرتبه تحت نیروی جانبی باد و تأثیر شکل ساختمان‌ها

¹ Vortex shedding

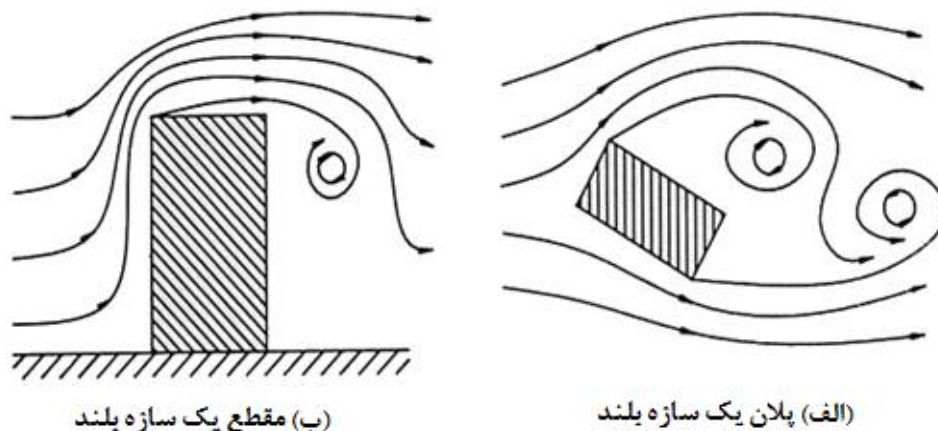
بر کاهش این نیروها پرداخته است. در این تحقیق عوامل مؤثر بر طرح ساختمان‌های بلند شرایط زمانی و مکانی، تناسبات و فرم، کاربری و عملکرد، ارتفاع و مقیاس انسانی بیان شده است. عظیم زادگان و همکاران [۱۸] در تحقیق خود به بررسی اثر باد بر سازه با روش‌های استاتیکی و دینامیکی که در مبحث ششم مقررات ملی ذکر شده و همچنین روش تحلیل تاریخیچه زمانی پرداخته‌اند. در نهایت نتایج آنها نشان داد که، نامنظمی باعث تمرکز نیروها در طبقات پس‌نشسته و در نتیجه افزایش جابجایی نسبی طبقات می‌شود که این اثر با استفاده از روش تحلیل تاریخیچه زمانی بحرانی‌تر تعیین می‌گردد. یکی از مهمترین سازه‌های بلند شهر تهران، برج میلاد تهران است. تحقیقات گسترده‌ای پیرامون این سازه صورت پذیرفته است. نصیری [۱۹] با انجام آزمایش‌های تونل باد در دانشگاه علم و صنعت به تحلیل استاتیکی معادل برج میلاد تهران پرداخته است. کریمیان و همکاران [۲۰] در دانشگاه امیرکبیر، با انجام آنالیز تونل باد و با مدلسازی ۲ بعدی در ترازهای ۶۰ و ۱۲۰ و ۱۸۰ متری به بررسی فیزیکی جریان هوا اطراف پایه برج و توزیع فشار و نیروهای تناوبی پرداخته‌اند. امیری و همکاران [۲۱] نیز به بررسی رفتار سازه‌های بلند تحت بارگذاری جانبی باد پرداخته و در نهایت بیان نمودند که برج میلاد تهران در برابر بار جانبی باد طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، رفتار قابل قبولی دارد. در پژوهش حاضر به بررسی روش‌های طراحی ارائه شده جهت محاسبه بار باد در استانداردهای امریکا، اروپا، ژاپن و استرالیا برای دو نوع سازه بلند پرداخته می‌شود. سپس نتایج به دست آمده با خروجی حاصل از استفاده مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران برای سازه‌های مقایسه می‌گردد.

۴- سرعت باد

میانگین سرعت باد در یک دوره زمانی، ده دقیقه یا بیشتر است که همراه با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد. این در حالی است که شدت باد با افزایش ارتفاع، کاهش می‌یابد. بردار باد در یک نقطه را می‌توان به صورت مجموع میانگین نوسان مؤلفه استاتیک $\bar{V}(z)$ و مؤلفه دینامیک بردار باد $v(z,t)$ به صورت رابطه زیر بیان نمود [۵]:

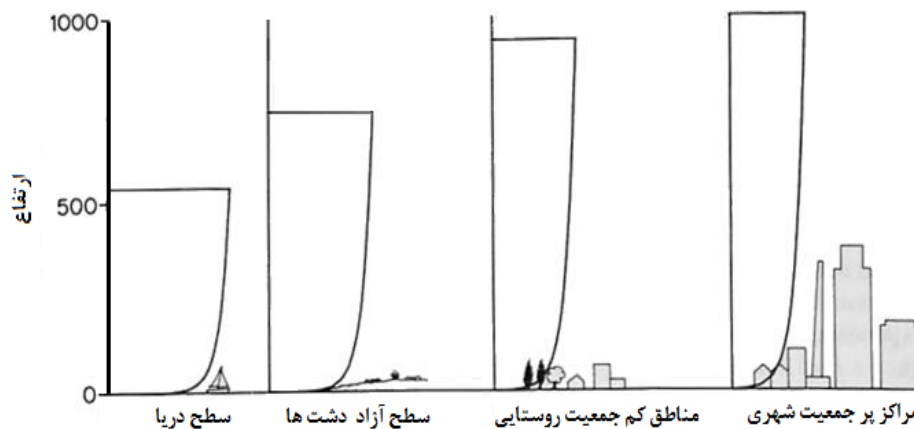
$$V(z,t) = \bar{V}(z) + v(z,t) \quad (1)$$

بارگذاری دینامیکی باد روی سازه بستگی به اندازه جریان دارد. هم‌زمان با روند ساخت سازه‌های بلند، جریان‌های بزرگی در اطراف سازه باعث افزایش فشارهای مرتبط می‌شود. جریان‌های ایجاد شده در اطراف یک سازه در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): تولید جریان باد اطراف یک سازه بلند [۵]

در مناطق نزدیک‌تر به سطح زمین، سرعت باد تحت تأثیر جریان هوا در منطقه قرار می‌گیرد. یک لایه مرزی وجود دارد که با توجه به آن سرعت باد از صفر در سطح تا شتاب سرعت باد در ارتفاع متغیر است. ضخامت این لایه مرزی می‌تواند از ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر با توجه به نوع منطقه متغیر باشد. پروفیل سرعت باد در شکل (۵) ترسیم شده است.



شکل (۵): تولید جریان باد اطراف یک سازه بلند [۵]

۵- بار باد وارد بر سازه

در تمام استانداردها، نیروی بار باد در امتداد طول، توسط حاصل ضرب فشار باد در سطح بادگیر و رو به باد ساختمان تعیین می‌شود. بیان کلی رابطه فشار بر روی یک ساختمان بر اساس استانداردها می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۲۲]:

$$P = q \cdot G \cdot C_p \quad (2)$$

در این رابطه q فشار سرعت، G ضریب اثر اوج باد و C_p ضریب فشار است. بارها توسط ترکیب فشار بر روی دیوار و ناحیه وابسته آن تعیین می‌شوند. همچنین نیروها و لنگر برشی بر اساس مجموع بارها و لنگرها در هر تراز تعیین می‌شوند. لنگر حاصل ضرب بار در یک ارتفاع مشخص نسبت به تراز مورد نظر است. رابطه عمومی فشار ناشی از سرعت باد را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان نمود [۲۲]:

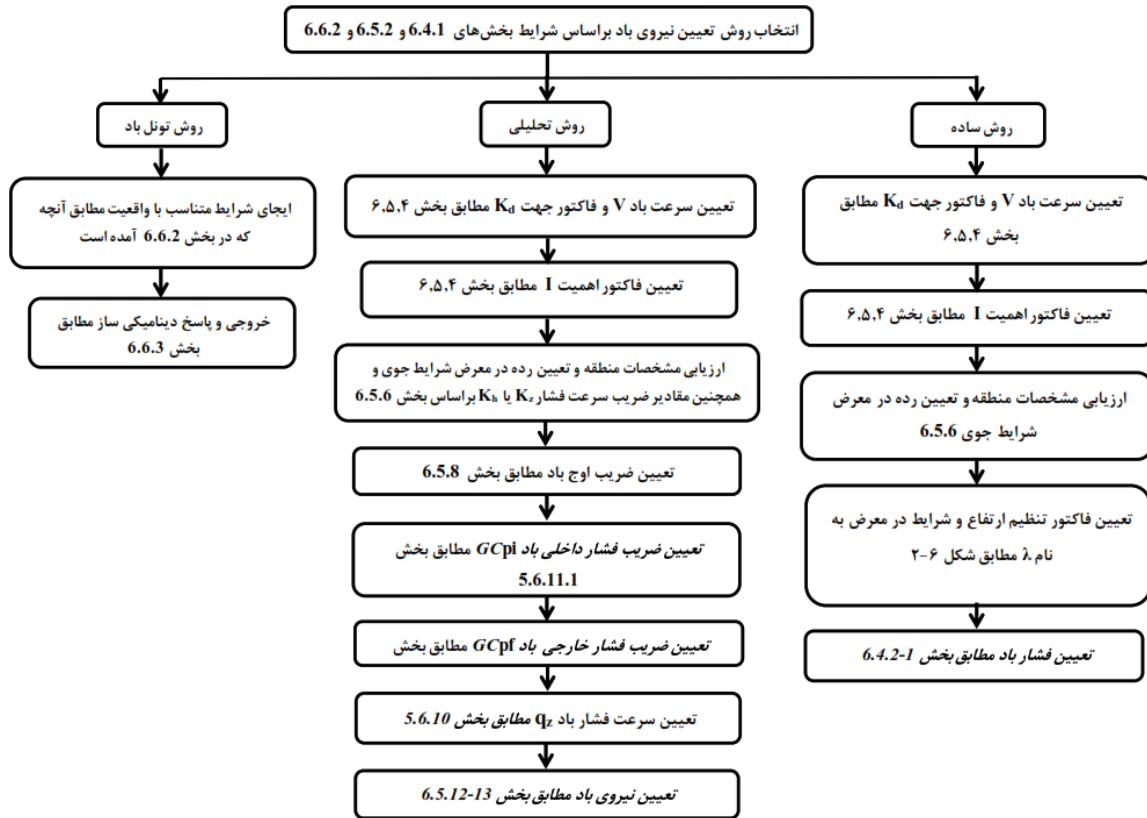
$$q = 0.5 \rho V_0^2 \cdot C_{exposure} \cdot C_{terrain} \cdot C_{direction} \cdot C_{importance} \cdot C_{other} \quad (3)$$

در این رابطه ρ چگالی هوا، V_0 سرعت مبنای باد، $C_{exposure}$ پارامتر مشخصه سرعت، $C_{terrain}$ پارامتر مربوط به زمین و توپوگرافی، $C_{direction}$ عامل جهت‌گیری، $C_{importance}$ اهمیت ساختمان و C_{other} یک فاکتور برای عوامل دیگری از جمله ناحیه طوفان، محافظ، یا میانگین بازه زمانی است.

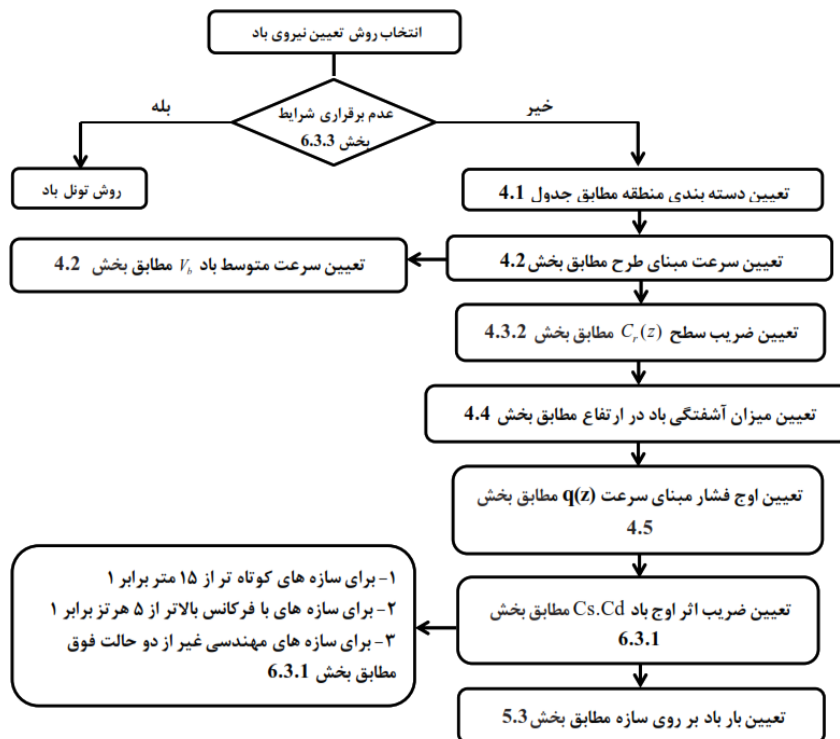
۶- فرضیات و روش تحقیق

۶-۱- دستورالعمل طراحی

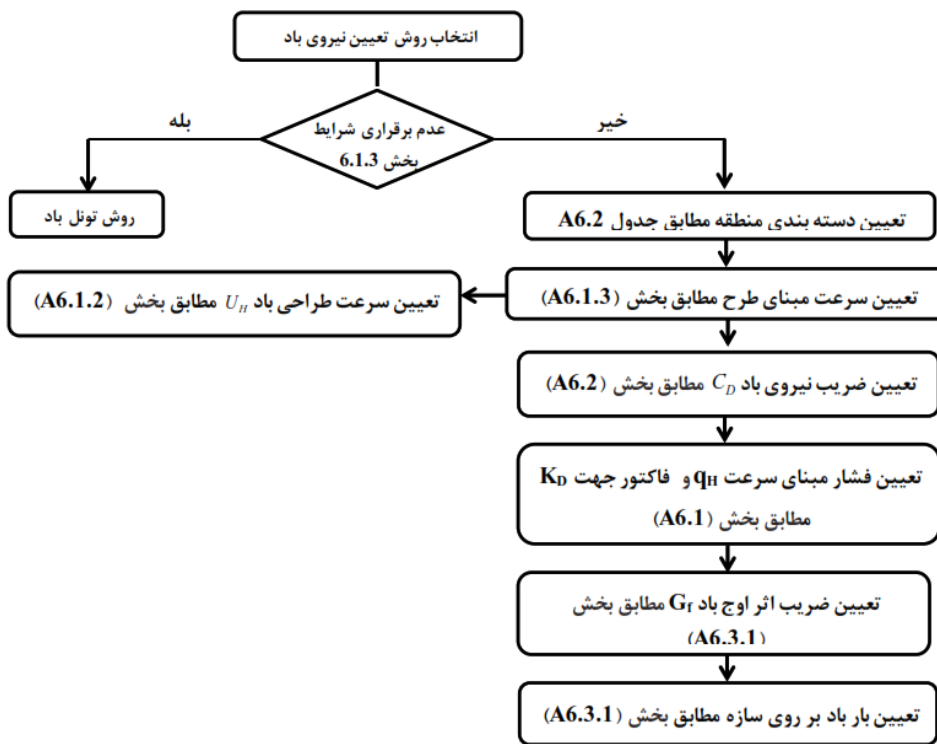
در بارگذاری باد وارد بر یک سازه، عوامل زیادی از جمله شکل سازه، محیط احداث سازه، پستی بلندی‌های اطراف سازه، توپوگرافی و سرعت مبنای باد منطقه باید مدنظر قرار گیرند. جهت انجام یک مقایسه میان نتایج آئین‌نامه‌های مختلف، این موارد در روند محاسبه کلیه آئین‌نامه‌ها یکسان فرض می‌گردد. همچنین با توجه به این که مطالعه حاضر پیرامون سازه‌های بلند است، مطابق مبحث ششم مقررات ملی ایران [۱۴] در این موارد تحلیل دینامیکی و اثراتی همچون اثر اوج باد نیز نیاز به محاسبه دارد. در این تحقیق، طراحی سازه‌های بلند مفروض بر اساس استانداردهای امریکا، اروپا، ژاپن و استرالیا و ایران است [۱۰-۱۴]. در این پژوهش نمودار طراحی یک سازه بلند در برابر بار جانبی باد بر اساس آئین‌نامه‌های امریکا، اروپا، ژاپن و استرالیا استخراج شده که نتایج آن در اشکال (۶) تا (۹) به ترتیب نشان داده شده است.



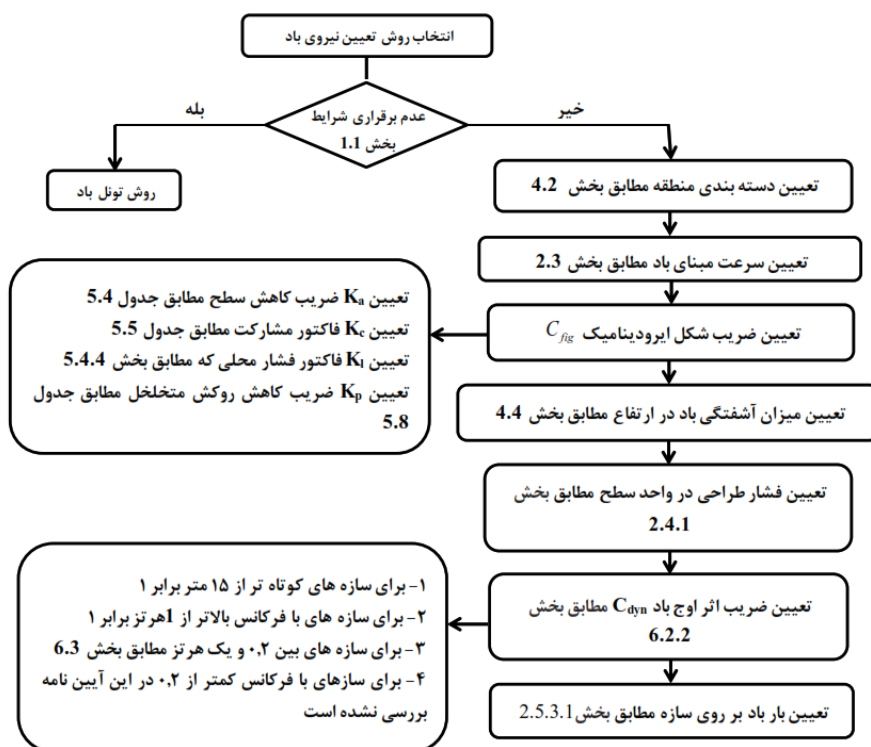
شکل (۶): فلوجارت طراحی یک سازه بلند تحت اثر بار باد در استاندارد امریکا ASCE [10]



شکل (۷): فلوجارت طراحی یک سازه بلند تحت اثر بار باد در استاندارد اروپا [11]



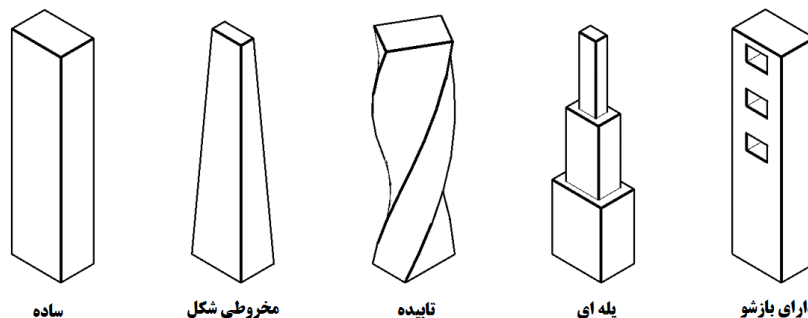
شکل (۸): فلوجارت طراحی یک سازه بلند تحت اثر بار باد در استاندارد کشور ژاپن [۱۲]



شکل (۹): فلوجارت طراحی یک سازه بلند تحت اثر بار باد در استاندارد کشور استرالیا [۱۳]

۶-۲-مقطع هندسی و جزئیات سازه‌ای

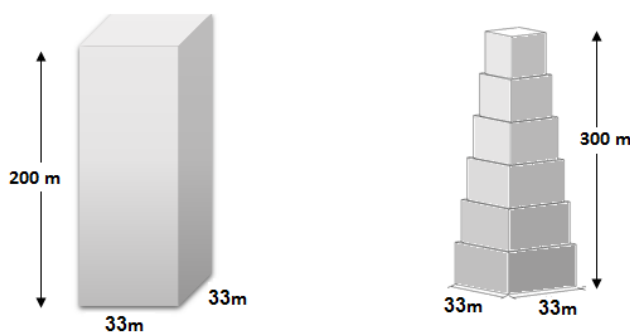
طبق شکل (۱۰) به طور کلی پنج نوع مقطع ساده، مخروطی، تابیده، پله‌ای و دارای بازشو برای سازه‌های بلند در نظر گرفته می‌شود [۹]. در تحقیق حاضر برای شکل مقطع سازه، دو نوع ساده و پله‌ای در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۰): انواع مختلف مقاطع یک سازه بلند [۹]

برای مقایسه استانداردهای بارگذاری باد، مطابق شکل (۱۱)، دو ساختمان بلند بتنی که یکی از آنها با پلان ثابت و مقطع مربع تا ارتفاع ۲۰۰ متر، به ضلع ۳۳ متر و دیگری ساختمانی با پلان متغیر و مقطع مربعی تا ارتفاع ۳۰۰ متری که طول هر ضلع آن در طبقه همکف ۳۳ متر بوده و به ازای هر ۵۰ متر ارتفاع، ۳ متر از طول اضلاع هر بعد پلان کاسته می‌شود، در نظر گرفته شده است.

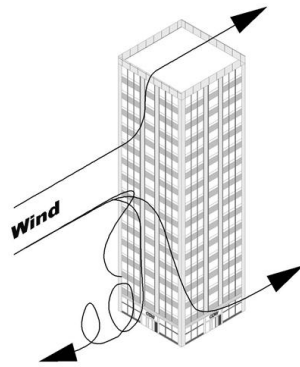
سازه با پلان ثابت دارای فرکانس طبیعی برای جهت باد ۰/۳ هرتز و میرایی ۰/۰۱ درصد در تمام جهات، شکل مد خطی، چگالی وزنی ساختمان ۱۸۰ کیلوگرم در مترمکعب، تراکم هوای ۱/۲۲ کیلوگرم در مترمکعب و برای ساختمان با پلان متغیر فرکانس طبیعی در جهت باد ۰/۲۵ هرتز، میرایی ۰/۰۱ درصد در تمام جهات، شکل مد خطی، چگالی وزنی ساختمان ۱۸۰ کیلوگرم در مترمکعب، تراکم هوای ۱/۲۲ کیلوگرم در مترمکعب مفروض است.



شکل (۱۱): جزئیات سازه بلند با پلان ثابت و متغیر

۶-۳-سرعت مبنای باد

جهت یکسان‌سازی نتایج خروجی آئین‌نامه‌های مختلف نیاز است شرایط منطقه احداث سازه تعریف شود. از این رو سازه بلند مفروض در منطقه شهری با تراکم مشابه با شهر تهران با سرعت مبنای باد ۲۷/۷ متر بر ثانیه (۱۰۰ کیلومتر بر ساعت) در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل (۱۲)، جهت نیروی باد وارد بر سازه نیز نشان داده شده است.

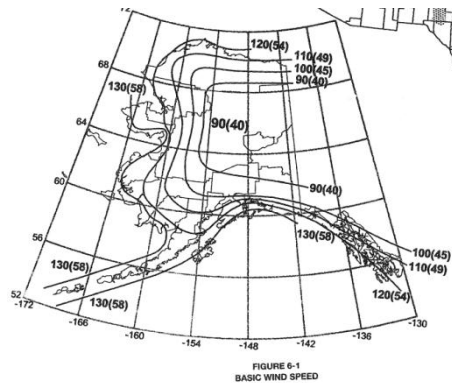


شکل (۱۲): جهت نیروی باد وارد بر سازه

۷- طراحی سازه در برابر بار باد

۱-۷ بارگذاری مطابق استاندارد امریکا (ASCE 7)

در این استاندارد جهت بارگذاری بار باد روی سازه، ابتدا سرعت مبنای باد هر منطقه مشابه شکل (۱۳) پیش‌بینی می‌گردد. سرعت مبنای باد برای کل مناطق ایالات متحده امریکا، بر اساس بادی با زمان اوج ۳ ثانیه و ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین تعریف شده است. در این تحقیق سرعت مبنای باد برابر ۲۷/۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۳): نمونه‌ای از نقشه‌های تعیین سرعت مبنای باد ایالات متحده امریکا [۱۰]

سپس ضریب اهمیت سازه بر مبنای جدول (۴) تعیین می‌گردد. با توجه به نوع ساختمان‌ها در این تحقیق از دسته دوم با مقدار ضریب اهمیت یک استفاده شده است.

جدول (۴): جدول دسته‌بندی ضریب اهمیت انواع سازه‌ها در آئین‌نامه امریکا [۱۰]

دسته‌بندی	مناطق مستعد طوفان با سرعت ۴۴ متر بر ثانیه	مناطق بدون رخداد طوفان شدید و مناطق با طوفان با سرعت ۳۸ تا ۴۴ متر بر ثانیه و منطقه آلاسکا
۱	۰/۷۷	۰/۸۷
۲	۱	۱
۳	۱/۱۵	۱/۱۵
۴	۱/۱۵	۱/۱۵

مطابق این آئین‌نامه فشار مبنای باد جهت طراحی ساختمان‌های بلند با رابطه زیر تعریف شود [۱۰]:

$$P = qG_f C_p - q_i (GC_{pi}) \quad (N/m^2) \quad (۴)$$

در رابطه فوق مقدار $q_i(GC_{pi})$ جهت اندازه‌گیری باد در وجه پشت به باد است که در این تحقیق صفر فرض شده است. همچنین C_p ضریب فشار خارجی مطابق جدول (۵) برای سطوح روبه باد برابر با ۰/۸ است [۱۰].

جدول (۵): تعیین ضریب فشار خارجی آئین‌نامه آمریکا ASCE [۱۰]

Cp	نسبت طول به عرض سازه	سطوح
۰/۸	همه مقادیر	رو به باد
-۰/۵	۱-۰	پشت به باد
-۰/۳	۲	
-۰/۲	بزرگ‌تر از ۴	
-۰/۷	همه مقادیر	وجه کناری

همچنین ضریب اثر اوج باد G_f برای سازه‌های با فرکانس کمتر از ۱ هرتز به صورت رابطه زیر تعریف شده است [۱۰]:

$$G_f = 0.925 \left(\frac{1 + 1.7 I_z \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1.7 g_v I_z} \right) \quad (۵)$$

I_z مبین شدت آشفتگی است و مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد [۱۰].

$$I_z = c(33/z)^{1/6} \quad (۶)$$

طبق تعریف، \bar{z} معرف ارتفاع معادل برابر ۰/۶ ارتفاع کل سازه است. ضریب c در این رابطه فاکتور شدت آشفتگی است که مقدار آن مطابق آئین‌نامه برابر ۰/۳ است. پارامتر پاسخ رزونانس سازه R است که مقدار آن برابر با ۱/۳۳ و مقادیر g_Q و g_v به ترتیب ضریب بیشینه اثر پاسخ سازه و بیشینه اثر بار باد بوده و با توجه به آئین‌نامه برابر ۳/۴ در نظر گرفته می‌شود. Q پارامتر معرف ابعاد سازه و به صورت زیر تعریف شده است [۱۰]:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + 0.63 \left(\frac{B+h}{L_z} \right)^{0.63} \right)}} \quad (۷)$$

که در رابطه فوق مقادیر B عرض و h ارتفاع سازه و همچنین L_z با رابطه زیر بیان می‌شود [۱۰].

$$L_z = l(\bar{z})^{\epsilon} \quad (۸)$$

در این رابطه مقدار ϵ در آئین‌نامه مطابق شرایط منطقه تعیین می‌گردد. دیگر پارامتر رابطه (۴) ضریب اثر اوج باد است که وابسته به فرکانس سازه n_1 بوده و در آئین‌نامه به صورت زیر تعریف شده است:

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600n_1)}} \quad (۹)$$

در نهایت با مشخص شدن فشار مبنای سرعت باد q بر اساس رابطه زیر بار باد وارد بر سازه تعیین خواهد شد.

$$q(z) = 0.613 \times K_z \times k_{zt} \times k_d \times V^2 \times I \quad (۱۰)$$

در این رابطه V سرعت مبنای باد، ضریب فشار سرعت باد K_z مطابق رابطه زیر بر حسب ارتفاع سازه z محاسبه می‌گردد [۱۰]:

$$K_z = 2.01 \times \left(\frac{z}{Z_g} \right)^{(2/\alpha)} \quad \text{for } 4.5 \leq z \leq z_r \quad (۱۱)$$

$$K_z = 2.01 \times \left(4.5 / Z_g \right)^{(2/\alpha)} \quad \text{for } z < 4.5$$

مقادیر α مربوط به پارامتر قدرت طوفان و Z_g ارتفاع اسمی لایه مرزی جو که در این استاندارد استفاده می‌شود، با توجه به آئین‌نامه به ترتیب ۷ و ۹/۱۴ است. مقدار K_{zt} معرف ضریب شرایط توپوگرافی منطقه بوده و بر حسب فرض مسئله که سازه در یک مکان هموار و بدون پستی و بلندی قرار داشته است، مقدار آن برابر یک در نظر گرفته شده است. ضریب k_d عامل جهت‌گیری باد بوده که مطابق آئین‌نامه برابر ۰/۸۵ به دست می‌آید.

۲-۷ نتایج بار باد روی سازه بر اساس استاندارد امریکا (ASCE 7)

پارامترهای بارگذاری بار باد برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متر با مقطع ثابت و سازه ۳۰۰ متری با پلان متغیر در جداول (۶) ارائه شده است. ستون‌هایی که دو عدد در آنها درج شده مربوط به بیشینه و کمینه مقادیر هر یک از پارامترها است.

جدول (۶): پارامترهای آئین‌نامه امریکا برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متری با مقطع ثابت و با ارتفاع ۳۰۰ متری با پلان متغیر

سازه	سرعت مبنای باد (m/s)	ضریب اهمیت سازه	شرایط منطقه	شرایط توپوگرافی منطقه K_{zt}	ضریب فشار سرعت باد K_z	عامل جهت‌گیری باد K_d	ضریب اثر اوج باد g_R	ضریب فشار خارجی C_p	فشار مبنای باد جهت طراحی q	بار باد $P(N)$
	۲۷/۷	۱	B	۱	۱/۷	۱	۱/۲۳	۰/۸	۷۸۷	۱۲۹۹۰
					۰/۷		۰/۳		۳۲۶	۵۳۷۹
					۱/۹		۰/۹	۷۳۴	۷۴۳۲	
					۰/۷			۲۳۹	۳۹۵۴	

۳-۷ بارگذاری مطابق استاندارد اروپا (Eurocode 1)

در این دستورالعمل بار باد وارد بر سطوح سازه‌ای و غیر سازه‌ای مطابق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{ref} \quad (12)$$

در رابطه فوق $c_s c_d$ ضریب اثر ابعاد سازه، c_f ضریب شکل برای سازه یا عناصر سازه‌ای برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شده است. همچنین $q_p(z)$ فشار حداکثر سرعت در ارتفاع و A_{ref} نیز سطح اعمال بار باد است. مطابق تعریف مقدار اوج فشار سرعت باد به صورت زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$q(z) = 0.5 r_0 V_m^2(z) \times (1 + 7 \times I_v(z)) \quad (13)$$

r_0 چگالی هوای منطقه است. $V_m(z)$ نیز سرعت متوسط باد است. مقدار این پارامتر نسبت به ارتفاع متغیر بوده و به نوع سطح منطقه، توپوگرافی و سرعت مبنای باد وابسته است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$V_m(z) = C_r(z) \cdot C_0(z) \cdot V_b(z) \quad (14)$$

$V_b(z)$ سرعت مبنای باد، $C_0(z)$ مشخصه توپوگرافی و $C_r(z)$ ضریب سطح بوده که مطابق رابطه زیر تعریف شده است [۱۱]:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{for } z_{\min} \leq z \leq z_r \quad (15)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{for } z < z_{\min}$$

در این روابط پارامترهای z_0 و z_{\min} به ترتیب مربوط به طول ناهمواری‌ها و حداقل ارتفاع بوده که به ترتیب برابر ۱ و ۱۰ هستند. ضریب شرایط منطقه K_r نیز وابسته به طول ناهمواری‌ها و برای مسئله حاضر مقدار آن برابر ۰/۱۶ خواهد بود. تعیین میزان آشفته‌گی باد در ارتفاع مطابق رابطه زیر خواهد بود [۱۱]:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{V_m(z)} = \frac{k_l}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{for } z_{\min} < z < z_{\max} \quad (16)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{for } z < z_{\min}$$

K_l ضریب آشفته‌گی بوده و مطابق پیشنهاد خود آئین‌نامه برابر با یک است. همچنین $V_m(z)$ سرعت متوسط در ارتفاع است. σ_v انحراف معیار آشفته‌گی سرعت باد است که به صورت زیر تعیین می‌گردد [۱۱]:

$$\sigma_v = k_r \cdot V_b \cdot k_l \quad (17)$$

ضریب c_0 مطابق پیشنهاد پیوست آئین‌نامه به صورت زیر دست می‌آید [۱۱]:

$$c_0 = 1 \quad \text{for } \Phi < 0.05$$

$$c_0 = 1 + 2s \cdot \Phi \quad \text{for } 0.05 < \Phi < 0.3$$

$$c_0 = 1 + 0.6s \quad \text{for } \Phi > 0.3 \quad (18)$$

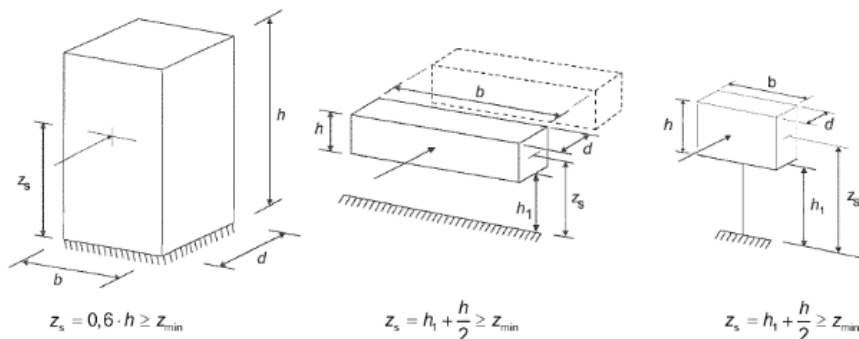
در این روابط با توجه به فرض منطقه‌ای هموار و بدون تپه برای مسئله، نسبت $\phi = H/L_u$ مقداری کمتر از ۰/۰۵ است. ضریب اثر ابعاد $C_s C_d$ در آئین‌نامه اروپا مطابق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$C_s C_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(Z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(Z_s)} \quad (19)$$

تمام پارامترهای این رابطه در بخش پیوست دوم آئین‌نامه آورده شده است. k_p فاکتور شدت باد بوده که متناسب با سرعت متوسط باد و فرکانس سازه است. فاکتور مربوط به پدیده تشدید R بوده و Z_s ارتفاع مرجع است. فاکتور B نیز پارامتر ابعادی است و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \times \left(\frac{b+h}{L(Z_s)}\right)^{0.63}} \quad (19)$$

h و b معرف عرض و ارتفاع سازه و $L(Z_s)$ معرف طول ناحیه آشفته‌گی است. Z_s ارتفاع مرجع مطابق شکل (۱۴) تعریف می‌شوند.



شکل (۱۴): تعیین ارتفاع مرجع در آئین‌نامه اروپا [۱۱]

۴-۷ نتایج بار باد روی سازه بر اساس استاندارد اروپا

نتایج بارگذاری بار باد بر اساس استاندارد اروپا در جدول (۷) برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متری و مقطع ثابت و با ارتفاع ۳۰۰ متری با مقطع متغیر ارائه شده است. ستون‌هایی که دو عدد در آنها درج شده مربوط به بیشینه و کمینه مقادیر هر یک از پارامترها است.

جدول (۷): پارامترهای استاندارد اروپا آمریکا برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متری و مقطع ثابت و با ارتفاع ۳۰۰ متری و پلان متغیر

سازه	سرعت مبنای باد (m/s)	سرعت متوسط باد (m/s)	پارامتر میزان آشفتگی باد I(z)	مقدار اوج فشار سرعت باد q(z)	ضریب اثر ابعاد سازه C _s .C _d	ضریب شکل سازه C _f	بار باد F (N)
	۲۷/۷	۳۴/۳۹	۰/۱۸	۴۵۱	۰/۵۷	۰/۱۸	۱۴۱۰۴
		۱۴/۹۴	۰/۴۳	۱۳۷۳	۰/۷۸		۳۴۱۵
	۲۷/۷	۳۷/۰۲	۰/۱۷	۴۵۱	۰/۵۴	۰/۱۸	۹۶۶۶
		۱۴/۹۴	۰/۴۳	۱۵۲۶	۰/۷۷		۳۲۴۱

۵-۷ بارگذاری مطابق استاندارد ژاپن (AIJ)

مطابق این استاندارد بار باد بر روی سازه مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$W_D = q_H C_D G_D A \quad (20)$$

W_D (N) بار در ارتفاع Z و A (m²) مساحت بادگیر سازه در ارتفاع Z و q_H نیز فشار ناشی از سرعت باد است که مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2 \quad (21)$$

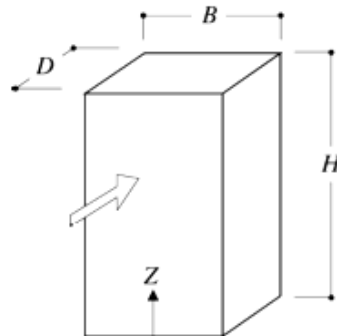
ρ چگالی هوا و U_H سرعت طراحی باد تعریف شده است. این سرعت ضریبی از سرعت مبنای باد و فاکتورهای جهت باد، دوره بازگشت باد و پروفیل سرعت باد است که همگی به توپوگرافی منطقه بستگی دارند.

در این دستورالعمل ضریب نیروی باد (C_D) به صورت زیر تعریف شده است [۱۲]:

$$C_D = C_{pe1} - C_{pe2} \quad (22)$$

در این رابطه مقدار C_{pe2} فشار خارجی اعمال شده به وجه پشت به باد است که مطابق فرض مسئله برابر صفر در نظر گرفته شده است. مقدار C_{pe} بر اساس شکل (۱۵) محاسبه می‌گردد.

	C_{pe}	
	$D/B \leq 1$	$D/B > 1$
C_{pe1}	$0.8 k_z$	
C_{pe2}	-0.5	-0.35
k_z		
$Z \leq Z_b$	$Z_b < Z < 0.8H$	$Z \geq 0.8H$
$(Z_b/H)^{2\alpha}$	$(Z/H)^{2\alpha}$	$0.8^{2\alpha}$



شکل (۱۵): تعیین فشار بار بر اساس آیین‌نامه ژاپن [۱۲]

در شکل فوق B عرض سازه، D عمق سازه، H ارتفاع سازه، z ارتفاع از سطح زمین و α معرف قدرت پروفیل سرعت باد است.

ضریب اثر اوج باد G_D نیز مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

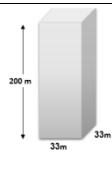
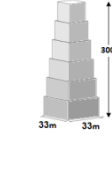
$$G_D = 1 + g_D \frac{C'_g}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D} \quad (23)$$

پارامترهای این رابطه از جمله $R_D, \phi_R, C_g, C'_g, g_D$ به ترتیب معرف فاکتور رزونانس، ضریب تصحیح مد سازه، ضرایب لحظه واژگون شدن سازه و پارامتر مربوط به فرکانس سازه است.

۷-۶ نتایج بار باد روی سازه بر اساس استاندارد ژاپن

نتایج بارگذاری بار باد بر اساس استاندارد ژاپن در جدول (۸) برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متری و مقطع ثابت و ارتفاع ۳۰۰ متری و مقطع متغیر ارائه شده است. ستون‌هایی که دو عدد در آنها درج شده مربوط به بیشینه و کمینه مقادیر هر یک از پارامترها است.

جدول (۸): پارامترهای استاندارد ژاپن امریکا برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متری با مقطع ثابت و با ارتفاع ۳۰۰ متری با پلان متغیر

سازه	سرعت طراحی باد (m/s)	فشار مبنای سرعت q_H (N/m ²)	ضریب نیروی باد C_D	ضریب اثر اوج باد G_D	بار باد W_D (N)
	۲۷/۷	۴۶۳/۹	۰/۷۱	۶/۶۶	۱۵۱۸۵
		۱۳۳/۸	۰/۲۳	۲/۷۹	۳۳۹۷
	۲۷/۷	۵۷۶	۰/۷۱	۷/۰۵	۸۷۷۱
		۱۳۳/۸	۰/۱۸	۲/۵۲	۲۸۸۶

۷-۷ بارگذاری مطابق استاندارد استرالیا / نیوزیلند (AS/NZS)

فشار طراحی برای سازه‌ها و قطعات سازه‌ای مطابق این دستورالعمل به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$P = (0.5 \rho_{air}) [V_{des, \theta}]^2 C_{fig} C_{dyn} \quad (24)$$

در این رابطه ρ چگالی هوا برابر ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب، $V_{des, \theta}$ سرعت مبنای باد، C_{fig} ضریب شکل ایرودینامیک است که وابسته مشخصات پروفیل باد بوده و طبق بندهای آئین‌نامه برابر یک در نظر گرفته می‌شود. همچنین C_{dyn} ضریب اثر اوج باد به صورت رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$C_{dyn} = \frac{1 + 2I_h \left[g_v^2 B_s + \frac{H_s g_R S E_t}{\xi} \right]^{0.5}}{1 + 2g_v I_h} \quad (25)$$

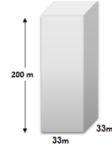
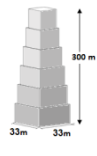
مقدار این ضریب در این آیین‌نامه برای فرکانس‌های کمتر از $0/2$ تعریف نشده است. برای سازه‌های با فرکانس بالاتر از $0/2$ و کمتر از 1 با رابطه و بالاتر از 1 برابر 1 در نظر گرفته شده است. در این رابطه I_h شدت آشفتگی، g_s ضریب نوسانات سرعت باد، B_s ضریب اثر سازه، H_s عامل ارتفاع برای پاسخ رزونانس، g_R ضریب بیشینه پاسخ رزونانس، S ضریب کاهش مد سازه، ξ نسبت میرایی به میرایی بحرانی سازه، E_t بار طیف تلاطم در جریان باد نزدیک است. در نهایت نیروی باد با توجه به سطح بادگیر سازه، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$F = \sum (P_Z A_Z) \quad (26)$$

۷-۸ نتایج بار باد روی سازه بر اساس استاندارد استرالیا/نیوزیلند

نتایج بارگذاری بار باد بر اساس استاندارد استرالیا/نیوزیلند در جدول (۹) برای سازه با ارتفاع 200 متری و مقطع ثابت و با ارتفاع 300 متری و مقطع متغیر ارائه شده است. ستون‌هایی که دو عدد در آنها درج شده مربوط به بیشینه و کمینه مقادیر هر یک از پارامترها است.

جدول (۹): پارامترهای استاندارد استرالیا/نیوزیلند آمریکا برای سازه با ارتفاع 200 متری با مقطع ثابت و با ارتفاع 300 متری با پلان متغیر

سازه	سرعت مبنای باد $V_{des,\theta} (m/s)$	ضریب شکل ایرویدینامیک C_{fig}	ضریب اثر اوج باد C_{dyn}	فشار طراحی P	نیروی باد F
	۲۷/۷	۱	۱/۰۷	۳۹۰/۲۶	۶۴۳۹ ۵۵۸۶
			۱	۳۸۳/۶۵	۲۱۰۲ ۱۲۲۷

۷-۹ بارگذاری مطابق مبحث ششم مقررات ملی ایران

بر اساس ضوابط این آیین‌نامه فشار خارجی یا مکش ناشی از باد مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

$$P = I_w q C_e C_g C_p \quad (27)$$

I_w ضریب اهمیت برای بار باد، با توجه به گروه خطرپذیری سازه موردنظر برابر یک در نظر گرفته می‌شود. همچنین q فشار مبنای باد بر اساس سرعت مبنای طرح V مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

$$q = 0.0000613V^2 \quad (28)$$

C_p ضریب شکل که فشار خارجی وارد بر مساحت وجه موردنظر میانگین‌گیری شده است. در طراحی، ضریب شکل برای تعیین فشار یا مکش وارده بر سطوح ساختمان تعیین می‌گردد. در این تحقیق مقدار C_p با توجه به بند آئین‌نامه $\frac{H}{D} \geq 1$ برابر $0/8$ است.

C_e ضریبی بادگیری برای نوحی شهری و با ساخت و ساز متراکم مطابق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$0.5 \leq C_e \leq 2.5 \quad \text{for} \quad C_e = 0.5 \left(\frac{h}{12.7} \right)^{0.5} \quad (29)$$

در روابط بالا و بر اساس فرض، مقدار C_e بر اساس ارتفاع سازه است.

C_g ضریب اثر جهشی باد، بنا به تعریف نسبت اثر بیشینه بارگذاری باد به اثر متوسط آن است و مطابق زیر تعیین می‌شود [۱۴]:

$$C_g = 1 + g_p \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \quad (30)$$

در این رابطه μ متوسط اثر بارگذاری باد، σ انحراف معیار آن و g_p ضریب بیشینه آماری برای اثر بارگذاری باد است. نسبت $\frac{\sigma}{\mu}$ به صورت زیر تعیین می‌گردد [۱۴]:

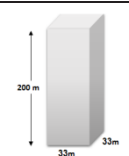
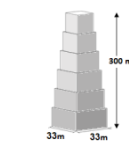
$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{LH}} \left(B + \frac{SF}{\beta} \right)} \quad (31)$$

K ضریبی ثابت منطبق بر نوع منطقه است که برای نواحی پرتراکم شهری برابر $0/1$ هست. C_{LH} ضریب بادگیری در بالای ساختمان است. β نسبت میرایی بحرانی است که برای سازه‌های فولادی برابر با $0/01$ و برای سازه‌های بتن‌آرمه برابر $0/02$ اختیار می‌گردد. B ضریب تلاطم که بر حسب W عرض وجه رو به باد و H ارتفاع ساختمان تعریف می‌شود. S ضریب کاهش ابعاد بر حسب نسبت‌های $\frac{W}{H}$ و $\frac{f_{nD} \cdot H}{V_H}$ به دست می‌آید. در این رابطه n_0 فرکانس اصلی نوسان سازه بر حسب هرتز، V_H سرعت متوسط باد در ارتفاع ساختمان H است. F ضریبی است به نام نسبت انرژی جهشی در فرکانس طبیعی نوسان سازه که بر حسب پارامتر عکس طول موج، $\frac{f_{nD} \cdot H}{V_H}$ از طریق نمودارهای آئین‌نامه به دست می‌آید.

نتایج بار باد روی سازه بر اساس مبحث ششم ایران

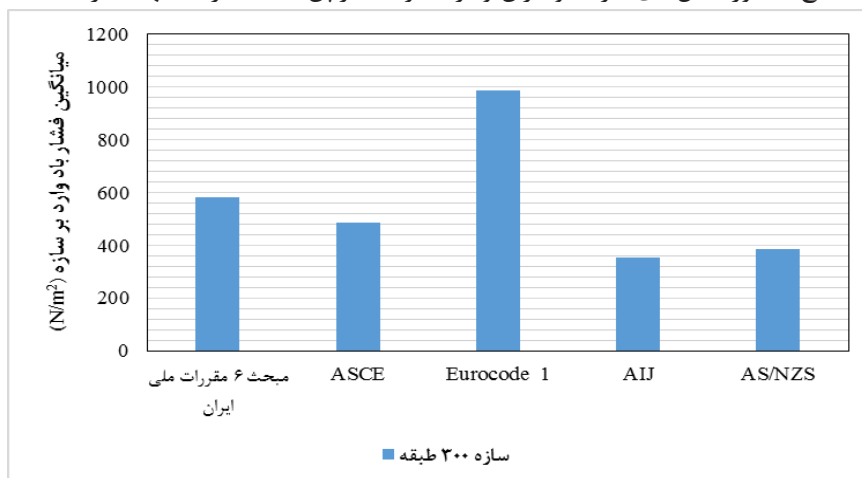
بارگذاری بار باد روی سازه بر اساس مبحث ششم ایران در جدول (۱۰) به ترتیب برای سازه با ارتفاع 200 متری و مقطع ثابت و سازه با ارتفاع 300 متری با مقطع متغیر ارائه شده است. ستون‌هایی که دو عدد در آنها درج شده مربوط به بیشینه و کمینه مقادیر هر یک از پارامترها است.

جدول (۱۰): پارامترهای مبحث ششم مقررات ملی ایران آمریکا برای سازه با ارتفاع 200 متری با مقطع ثابت و با ارتفاع 300 متری با پلان متغیر

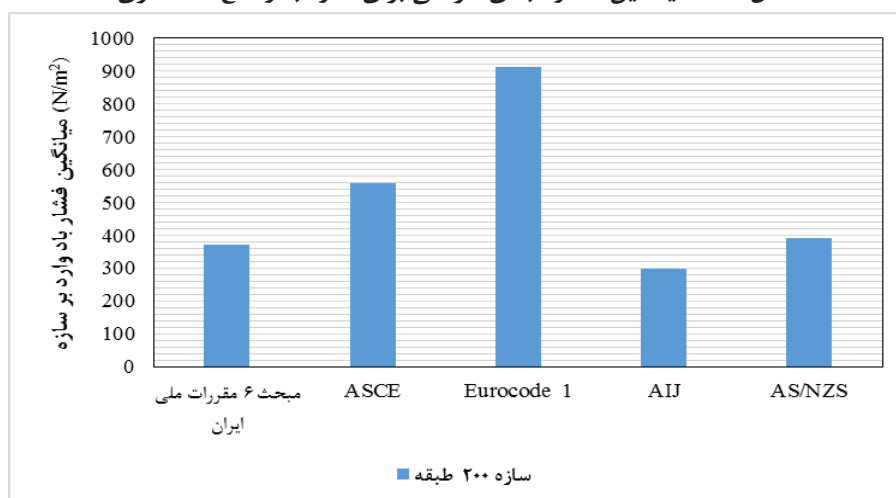
F (N)	P (N/m ²)	C _p	C _e	C _g	g _p	σ/μ	C _{LH}	B	S	F	K	V (m/s)	سازه
۱۵۹۰۸	۶۹۴	۰/۸	۱/۹۸	۱/۷۱	۳/۷۵	۰/۱۹	۱/۹۸	۰/۴۷	۰/۱۱	۰/۳۱	۰/۱	۲۷/۷	
۷۹۴/۴	۴۸		۰/۰۹۹										۰/۴۶
۱۰۶۲۷	۱۱۲۰	۰/۸	۱/۹۸	۱/۶۳	۳/۷	۰/۱۷	۲/۴۳	۰/۴۶	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۱	۲۷/۷	
۷۹۴	۴۵/۴		۰/۰۹۹										۱/۶۲

۸- نتایج و بحث

در شکل (۱۶) و (۱۷) مقادیر فشار میانگین باد وارد بر هر دو نوع سازه، مطابق پنج دستورالعمل مورد بررسی، نشان داده شده است. مطابق این اشکال، دستورالعمل اروپا با توجه به ضرایبی که برای سرعت مبنای طراحی اعمال می‌کند، فشار بیشتری در نظر می‌گیرد. نتایج دستورالعمل‌های آمریکا و ایران و نیز استرالیا با ژاپن با یکدیگر مشابهت دارند.

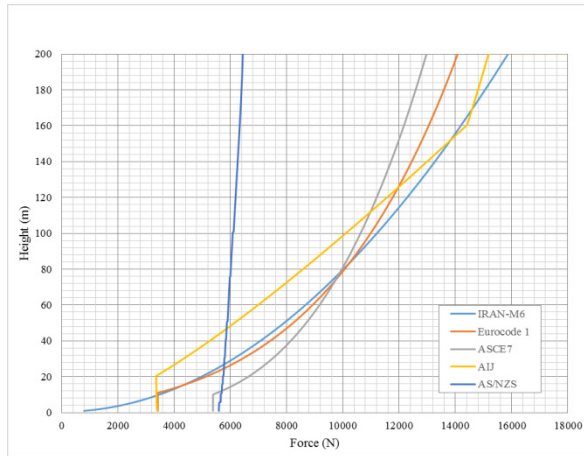


شکل (۱۶): میانگین فشار مبنای طراحی برای سازه با ارتفاع ۳۰۰ متری

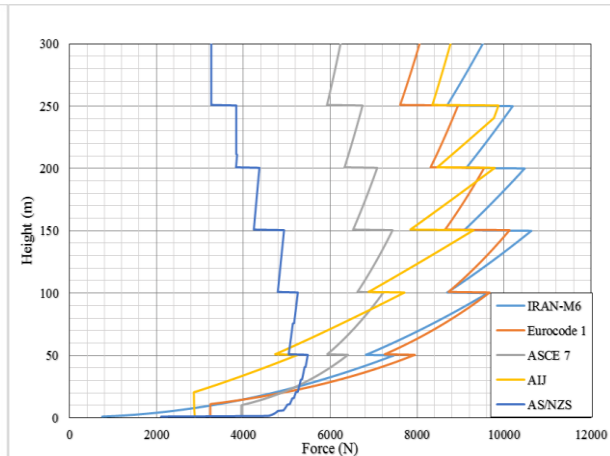


شکل (۱۷): میانگین فشار مبنای طراحی برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متری

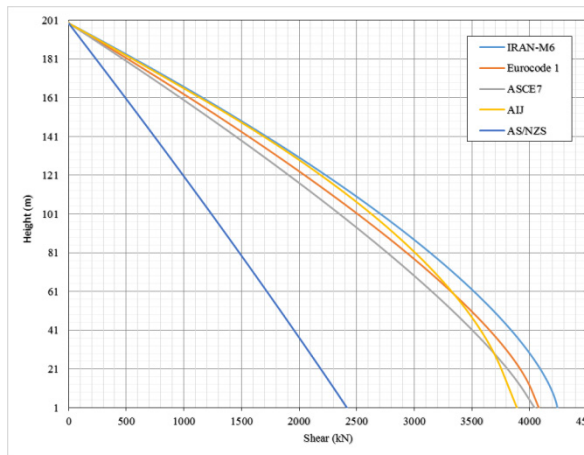
با استفاده از روش کدنویسی، مقادیر پروفیل بار باد طبقات ساختمان بلند با مقطع ثابت و متغیر در اشکال ۱۸ و ۱۹ بر اساس استانداردهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. مطابق شکل می‌توان مشاهده نمود که پروفیل بار باد طبقات به جز استاندارد استرالیا/نیوزیلند به صورت یک سهمی است. مقررات ملی ایران در ارتفاع ۲۰۰ متری بیشترین مقدار بار باد را به دست می‌دهد. استانداردهای آمریکا و اروپا تا ارتفاع ۱۰ متری و استاندارد ژاپن تا ارتفاع ۲۰ متری دارای یک پروفیل ثابت هستند. نتایج استانداردهای آمریکا، اروپا و ایران در ارتفاع تقریبی ۸۰ متری با یکدیگر تطابق داشتند. در اشکال ۲۰ و ۲۱ نیز مقادیر برش پایه طبقات بر اساس استانداردهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت مقطع ثابت آئین‌نامه استرالیا بر خلاف سایر آئین‌نامه‌ها به صورت خطی عمل کرده که این موضوع مربوط به شرایط توپوگرافی منطقه است.



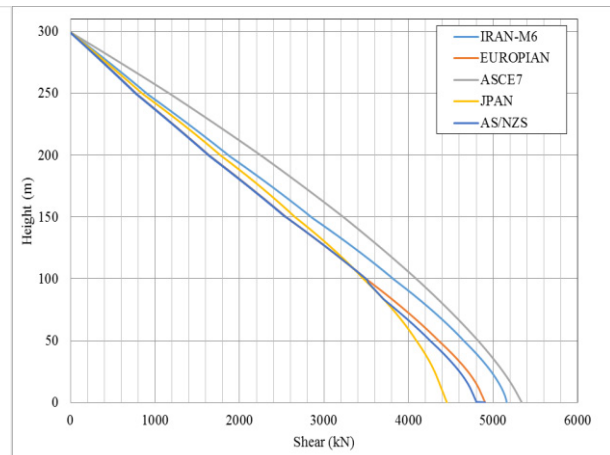
شکل (۱۹): پروفیل بار باد طبقات برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متری



شکل (۱۸): پروفیل بار باد طبقات برای سازه با ارتفاع ۳۰۰ متری



شکل (۲۱): برش پایه برای سازه با ارتفاع ۲۰۰ متری



شکل (۲۰): برش پایه برای سازه با ارتفاع ۳۰۰ متری

۹- نتیجه گیری

- در پژوهش حاضر به بررسی روش‌های طراحی ارائه شده جهت محاسبه بار باد در استانداردهای امریکا، اروپا، ژاپن و استرالیا برای دو نوع سازه بلند پرداخته شد. سپس نتایج به دست آمده با خروجی حاصل از استفاده مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران برای سازه‌های مقایسه گردید. از پژوهش انجام گرفته می‌توان به نتایج ذیل دست یافت:
- ۱- روند کلیه روابط حاکم بر طراحی سازه‌های بلند در کلیه استانداردهای بین‌المللی به صورت مشابه است.
 - ۲- تمامی آئین‌نامه‌ها به اثراتی همچون ضریب آشفستگی باد، ضریب اوج باد، ضریب شکل سازه توجه دارند.
 - ۳- درصد بالایی از اختلاف نتایج با توجه به روابط پیشنهادی برای ضریب اوج باد حاصل شده است.
 - ۴- در اندازه‌گیری فشار سرعت باد مقادیر استاندارد اروپا با توجه به ضرایب در نظر گرفته شده برای سرعت مبنای طراحی مقادیر بیشتری نسبت به سایر آئین‌نامه به دست می‌دهد.
 - ۵- در محاسبه پروفیل بار باد برای سازه‌های بلند با مقطع ثابت و متغیر، با توجه به فرضیات مسئله، مقررات ملی ایران نسبت به دیگر آئین‌نامه‌ها محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌کند.
 - ۶- برش پایه و پروفیل سرعت باد به دست آمده از استاندارد استرالیا با توجه به عوامل دخیل بر حسب شرایط توپوگرافی، مقادیر متفاوتی نسبت به سایر آئین‌نامه‌ها به دست می‌دهد.

- [1] Peter A. Irwin, "Wind Issues in the Design of Tall Buildings, Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, RWDI Consulting Engineers & Scientist, 2010.
- [2] Bui Thanh Dat, Alexander Traykov, and Marina Traykova; "Shear-lag effect and its effect on the design of high-rise buildings" HRC 2017, Web of Conferences 33, 2018.
- [3] Ralph R. Clark; "STRUCTURAL DESIGN ASPECTS OF A COASTAL BUILDING CODE" Florida Department of Natural Resources, COASTAL ENGINEERING, 1982.
- [4] Soheil Saadae, Fuh-Gwo, Yuan Mohammad N. Noori, Gregory D. Buckner; "ESTIMATION OF WIND LOAD ON STRUCTURES" Department of Mechanical & Aerospace Engineering, North Carolina State University, 2002.
- [5] P. Mendis, T. Ngo, N. Haritos, A. Hira, B. Samali, J. Cheung; "Wind Loading on Tall Buildings" EJSE Special Issue: Loading on Structures, 2007.
- [6] John D. Holmes, Yukio Tamura, Prem Krishna; "Wind loads on low, medium and high-rise buildings by Asia-Pacific codes" The 4th International Conference on Advances in Wind and Structures, Korea, 2008.
- [7] Ming Gu; "STUDY ON WIND LOADS AND RESPONSES OF TALL BUILDINGS AND STRUCTURES" The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taiwan, 2009.
- [8] A.K. Mittal, S. Behera, D. Ghosh, S.K. Bhattacharyya; "Issues of Tall Building Due to Wind Forces-A Case Study" 7th National Conference on Wind Engineering, Thapar University Patiala, 2014.
- [9] Ahmed Elshaer; "Aerodynamic Optimization and Wind Load Evaluation Framework for Tall Buildings" PHD Thesis, Western University, 2017.
- [10] ASCE 7-05; "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 2005
- [11] Eurocode 1; "Actions on Structures, Part 4-1: Wind Actions", London, British Standards Institute, 2004.
- [12] AIJ; Recommendations for Loads on Buildings (RLB), Tokyo, Structural Standards Committee, 2004.
- [13] AS/NZS 1170.2; "Structural Design Action, Part 2: Wind Forces" Australian/New Zealand Standards, Sydney, Standards Association of Australia, 2002.
- [14] National Bureau of Building Regulations of Iran, Sixth Chapter, Loading on Structures, ed. 1392. (In Persian)
- [15] M. Mahmoudi, H. Shafi'ie, H. Mazaheri; "Evaluation of structural analysis methods under the influence of wind load in high structures" 3th Conference for research in architecture, 1393. (In Persian)
- [16] Hossein Donyaie; "Investigation of the effect of lateral wind force on the behavior of long structures", International Conference on Civil Engineering, 1395. (In Persian)
- [17] Ali Nejadkhabaaz, "Structural Evaluation of High-rise Buildings under the Wind Power", 4th International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Economics Development, Shiraz, 1396. (In Persian)
- [18] Azimzadegan, Mohammad Reza; Mohammad Ali Hadian Fard and Ali Lashkari; "Evaluation of Structural Analysis Methods under the Influence of Load Damage in Long Structures with Geometric Irregularities", 7th National Congress of Civil Engineering, Sistan and Baluchestan University, 1392. (In Persian)
- [19] Nassiri, "Wind tunnel wind tunnel report on multi-purpose Tehran Tower", Iran University of Science and Technology, 1375. (In Persian)
- [20] Karimian, Jahanghirian and Nejat, "The final strain of wind blowing around the Tehran Tower" Amir Kabir University, 1379. (In Persian)
- [21] Amiri, Gh; Khazaiee, B; Eghbali, M; "Evaluation of the effect of the behavior of tall structures under the lateral wind load" The second National Conference on civil engineering, 1389. (In Persian)
- [22] Rachel Bashor, Ahsan Kareem; "Comparative Study of Major International Standards" 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taiwan, 2009.