

تحلیل دینامیکی پاسخ طولی باد و تعیین ضریب بارگذاری تندباد برای بیلبردهای تک‌ستونی بزرگ

نهمت خدائی*

۱- استادیار، مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خورموج، خورموج، ایران، Nahmat.khodaie@iau.ac.ir

چکیده

نقش موثر بیلبردها برای تبلیغات، موجب گسترش استفاده آن‌ها در فضاهای باز و عمومی شده است. سطح بادگیر بزرگ و وزن کم بیلبردها، موجب حساسیت آن‌ها در برابر باد شده و موارد متعدد خرابی آن‌ها در سال‌های اخیر گزارش شده است. طراحی سازه‌ها در برابر باد، عموماً با روش ضریب بارگذاری تندباد انجام می‌شود، ولی این روش، در اکثر آیین‌نامه‌ها مختص ساختمان‌ها و ملحقات آن‌ها و سازه‌های بلند است و روابطی برای بیلبردها ارائه نشده است. در این تحقیق، پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی طولی باد و ضریب بارگذاری تندباد برای بیلبردهای تک‌ستونی بزرگ، با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس مدل‌های چند درجه آزادی، با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب محاسبه شد. نخست، مثالی از بیلبرد بلند ارائه گردید و پاسخ سازه و ضریب تندباد برای آن تعیین شد و تأثیر سرعت مبنای باد و زبری ناحیه در پاسخ سازه بررسی گردید. سپس، بیلبردهایی با مشخصات هندسی مختلف طراحی شدند و در برابر باد تحلیل گردیدند. طبق نتایج، میرایی آیرودینامیکی از عوامل مهم محدودکننده ارتعاش بویژه در نواحی با زبری کم و سرعت باد بالا بود. با افزایش زبری زمین و همچنین با کاهش ارتفاع سازه، آشفته‌گی باد بیشتر و سرعت میانگین باد و میرایی آیرودینامیکی سازه کم می‌شد که با افزایش ضریب بارگذاری تندباد همراه بود، به‌نحوی که برای محدوده شهری و ارتفاع بیلبرد ۱۰ متر، ضریب مذکور به عدد $4/71$ رسید که حاکی از اهمیت بالای ارتعاشات بیلبرد در این شرایط بود. بنابراین، با توجه به پاسخ دینامیکی بالا، طراحی ایمن و مقاوم بیلبردها، مستلزم تعیین دقیق ضریب تندباد است.

کلمات کلیدی: ضریب تندباد، پاسخ طولی باد، بیلبردهای بزرگ، میرایی آیرودینامیکی، تحلیل حوزه فرکانس

۱- مقدمه

از اواخر قرن بیستم، استفاده از بیلبردها به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و تعداد زیادی بیلبرد در فضای باز در شهرها یا نزدیک زیرساخت‌های حمل و نقل، مانند بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها نصب شده است. بیلبردها سازه‌های طره‌ای سبک‌وزن، بدون ظرفیت نامعینی و با مساحت بادگیر نسبتاً بزرگ هستند که تحت نیروی باد زیادی قرار دارند [۲۱]. صدمات احتمالی به این سازه‌ها توسط باد، نه تنها باعث خسارات اقتصادی قابل توجهی می‌شود، بلکه موجب تهدید ایمنی عابران پیاده می‌گردد [۳]. این سازه‌ها عمدتاً از یک ستون فولادی عمودی و صفحه مستطیل شکلی که به سازه‌های خرابایی یا قابی متصل هستند، تشکیل شده‌اند. بیلبردهای تک‌ستونی در مقایسه با سایر بیلبردها، متداول‌تر، بسیار بلندتر و دارای پانل‌های بزرگ‌تر هستند و در نتیجه با خطر بیشتری مواجه هستند [۴].

اهمیت نسبی کمتر تابلوهای تبلیغاتی در مقایسه با ساختمان‌ها و همچنین عجله در طراحی و احداث آن‌ها، ممکن است منجر

به عدم توجه کافی به مقاومت آن‌ها در برابر باد شود [۱]. ارتعاشات ناشی از باد می‌تواند موجب خستگی و شکست زودرس بیلبوردها شود [۵]. آسیب‌ها و خرابی‌های سازه‌های بیلبوردهای بزرگ در اثر نیروهای باد به طور مکرر گزارش شده است (به عنوان مثال در مراجع [۷ و ۶]). مطابق شکل (۱)، این آسیب‌ها را می‌توان در سه نوع تخریب کلی دسته‌بندی کرد: آسیب به صفحه تابلو، شکست سازه نگهدارنده صفحه، و واژگونی کلی سازه ناشی از شکست پی [۷]. با وجود شکل ساده، بارگذاری باد این سازه‌ها پیچیده بوده و به عوامل متعددی از قبیل اندازه صفحه بیلبرد، ابعاد سازه‌ای، ارتفاع تابلو از سطح زمین، سرعت باد و زاویه برخورد آن وابسته است [۵]. مقررات مربوط به توزیع فشار باد روی بیلبوردها، در آیین‌نامه‌های بین‌المللی کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۴].



(ب) خرابی در سازه نگهدارنده بیلبرد



(الف) خرابی صفحه پوشش



(د) گسیختگی پای ستون فولادی



(ج) خرابی در بخش فونداسیون یا واژگونی سازه

شکل ۱. انواع مودهای خرابی متداول در بیلبوردهای بزرگ [۱ و ۴]

Fig. 1. Common failure modes in large billboards [1,4]

محققین مختلفی از آزمایش‌های تونل باد برای بررسی اثر باد روی بیلبوردها استفاده نموده‌اند. این تحقیقات عمدتاً برای تعیین ضریب فشار باد، آثار فشار موضعی باد، تأثیرات پیچشی و زاویه اثر باد و ارزیابی تخلخل تابلو بر ضریب فشار بوده است و مطالعات محدودی به پاسخ دینامیکی باد با منظور نمودن انعطاف‌پذیری سازه پرداخته‌اند. لچفورد^۱ و هولمز^۲ با استفاده از آزمایش‌های تونل باد، ضرایب فشار و نیروی پسای دیوارهای ایستاده نامتناهی و نیمه‌نامتناهی و همچنین دیوارهای محدود با نسبت‌های مختلف را بررسی نمودند و همچنین اثر جهت باد و نقش تخلخل صفحه را مطالعه کردند و نتایج را با داده‌های واقعی موجود مقایسه نمودند [۸].

¹ Letchford

² Holmes

و^۹]. پائولوتو^۱ و همکاران، اثر باد روی تابلوی قابی آزاد و یا تعبیه شده در محدوده شهری را با استفاده از تونل باد مطالعه نمودند. در مطالعه مذکور، فقط مقادیر میانگین فشار باد مورد بررسی قرار گرفت [۳]. وارنیچای^۲ و همکاران، آزمایش تونل باد بیلبردهای بزرگ تک صفحه‌ای، دو صفحه‌ای و V شکل با ابعاد مختلف را برای بررسی تغییرات ضریب نیروی پسا و خروج از مرکزیت نیروی باد انجام دادند. برای جهات باد مطالعه شده، ضریب میانگین نیروی پسا برای بیلبردها با پانل منفرد، بین ۱/۳ تا ۱/۵ متغیر بود [۱۰]. زو^۳ و همکاران، آزمایشات تونل باد را برای اندازه‌گیری فشار و نیروی باد بر بیلبردهای با پانل جعبه‌ای شکل و دو صفحه موازی و همچنین علائم V شکل انجام دادند و برای اعتبارسنجی مطالعه تونل باد، از اندازه‌گیری‌های مقیاس کامل استفاده نمودند [۱۱]. به‌طور مشابه، آزمایشات تونل باد متعددی در سال‌های اخیر برای ارزیابی نیروهای باد بر بیلبردها و علائم انجام گرفته است. برخی از مطالعات در این زمینه‌ها بوده‌اند: اندازه‌گیری صحرایی و آزمایشگاهی نیروی فشاری و پیچشی باد روی تابلوی LCD جعبه‌ای [۱۲]، بررسی توزیع فشار در داخل و خارج بیلبردهای دو و سه صفحه‌ای با استفاده از مدل‌های صلب [۱۳]، ویژگی‌های توزیع فشار باد روی بیلبردهای دو و سه صفحه‌ای [۱ و ۷]، بررسی تاثیر اصلاحات آیرودینامیکی تابلوها در کاهش ارتعاشات آن‌ها [۵].

برخی از مطالعات، موضوعات ایمنی و مرتبط با خرابی‌های بیلبردها را بررسی نموده‌اند. سالگادو^۴ و همکاران، ایمنی سازه‌ای بیلبردهای تک‌ستونی انعطاف‌پذیر در فضای باز را با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مقادیر مختلف سرعت باد مورد بررسی قرار دادند [۲]. بک^۵ شاخص قابلیت اطمینان سازه بیلبرد تحت سرعت باد را با مطالعه روی بیلبردهایی در جنوب غربی ویتنام بررسی نمود و نتیجه گرفت که حتی در مواردی که ایمنی این سازه‌ها بر اساس آیین‌نامه، مورد ملاحظه قرار گرفته باشد، خطر بالایی عملکرد و یکپارچگی آن‌ها را تهدید می‌کند [۱۴]. ون و زی^۶ مکانیزم فروپاشی ناشی از باد بیلبردهای تک‌ستونی را با بررسی میدانی و شبیه‌سازی دینامیکی بیلبردهای تخریب شده در طی طوفانی در چین بررسی و ادعا نمودند استاندارد طراحی جاری در چین، بارهای واقعی باد و پاسخ‌های دینامیکی را تا حد قابل توجهی دست کم می‌گیرد. در مطالعه مذکور، دو مود فروپاشی اصلی شامل مود ناگهانی شکستگی پیچ‌های مهاری و مود تدریجی کماتش موضعی شدید ستون فولادی شناسایی شد [۴]. ژانگ^۷ و همکاران ویژگی‌های بار باد را برای بیلبرد سه‌طرفه تک‌ستونی در زمین‌های شیب دار، بر اساس شبیه‌سازی عددی CFD در شیب‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند [۴].

برخی از محققین، مطالعاتی را روی سازه‌های مشابه با بیلبردها، از قبیل پانل‌های خورشیدی و دیواره‌ها انجام داده‌اند. جیانولیس^۸ و همکاران، مروری بر مطالعات قبلی در مورد بارهای باد بر روی دیواره‌های قائم مورد استفاده در زمین‌های کشاورزی شامل دیواره‌های غیرقابل نفوذ و نفوذپذیر روی زمین یا دیواره‌های مرتفع انجام دادند [۱۶]. استاتپولوس^۹ و همکاران، مطالعه تونل باد جامعی را برای ارزیابی فشار باد بر روی پانل‌های خورشیدی روی سقف و زمین، به منظور اندازه‌گیری ضرایب فشار ناشی از باد انجام دادند [۱۷]. ماسویاما^{۱۰} و همکاران، ویژگی‌های نیروهای موضعی باد در لبه‌های تابلوهای راهنمای نصب شده در پشت بام ساختمان‌ها را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که شکل ساختمان به‌طور قابل توجهی بر حداکثر ضریب نیروی باد تاثیر می‌گذارد [۱۸]. هایلز^{۱۱} و همکاران، آزمایش‌های میدانی و تونل باد را برای ارزیابی آثار بارگذاری باد بر سازه‌های علائم بزرگراه سیستم هشدار تقاطع روستایی انجام دادند. آثار آیرودینامیکی بر سازه علامت، از طریق تجزیه و تحلیل نیروهای میانگین و نوسانی طولی باد و ارتعاشات عرضی شناسایی شد [۱۹].

¹ Paulotto

² Warnitchai

³ Zuo

⁴ Salgado

⁵ Bac

⁶ Wen and Xie

⁷ Zhang

⁸ Giannoulis

⁹ Stathopoulos

¹⁰ Masuyama

¹¹ Heisel

همان‌طور که قبلاً تشریح شد، اکثر مطالعات در مورد بیلبردها، در زمینه تعیین ضریب فشار کلی یا موضعی باد، اثر زاویه باد، تخلخل صفحه و موارد مشابه بوده است و پاسخ دینامیکی آن‌ها، کمتر بررسی شده است. اکثر کدها و استانداردهای بین‌المللی، روش "ضریب بارگذاری تندباد"^۱ را برای طراحی سازه‌ها و ارزیابی بارهای دینامیکی طولی باد پیشنهاد می‌نمایند [۲۰]. ضریب بارگذاری تندباد که در ادامه به اختصار ضریب تندباد آورده می‌شود، در آیین نامه بارگذاری ایران نیز ارائه شده است. این ضریب به صورت نسبت حداکثر اثر بارگذاری به میانگین اثر آن تعریف می‌شود. برخی مطالعات به ارزیابی و مقایسه روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های بین‌المللی مهم برای بار طولی باد بر ساختمان‌های بلند پرداخته‌اند [۲۰ و ۲۱]. همان‌گونه که در مطالعات مذکور بیان شده است، روابط ارائه شده برای تعیین ضریب تندباد، عموماً برای ساختمان‌ها قابل استفاده هستند و روابطی برای سازه‌های خاص از قبیل بیلبردها ارائه نشده است. مبحث ششم مقررات ملی ساختمان نیز همانند سایر آیین‌نامه‌ها، روابط دینامیکی را برای تعیین ضریب تندباد ارائه نموده است که بر اساس آن، مقدار ضریب تندباد به عوامل متعددی از قبیل مشخصات هندسی سازه، فرکانس طبیعی، نسبت میرایی، سرعت مبنای باد و شرایط ناحیه قرارگیری سازه وابسته است. استفاده از این روش، برای ساختمان‌های با لاغری بیشتر از ۴ یا بلندتر از ۶۰ متر و سازه‌های دیگری که کوچکترین فرکانس طبیعی آن بین ۰/۲۵ تا یک ثانیه باشد الزامی است. در سایر شرایط، ضریب تندباد باید برای کل ساختمان و اعضای اصلی سازه برابر ۲ و برای فشار خارجی و مکش در اعضای کوچک از جمله نما یا پوسته خارجی ۲/۵ پیشنهاد شده است. لذا، روابط ارائه شده در مبحث ششم و پارامترهای دخیل در آن، برای بیلبردها قابل استفاده نیست و ممکن است در موارد کاربردی، به دلیل نبود رابطه خاص، از همان مقادیر ۲ یا ۲/۵ استفاده شود که همان‌گونه که در نتایج این تحقیق تشریح خواهد شد، مقدار ضریب تندباد برای تابلوها، به ویژه در مناطق با زبری بالا و ارتفاع کم، خیلی بیشتر از مقادیر مذکور است.

در این تحقیق، پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی و ضریب بارگذاری تندباد برای بیلبردهای تک‌ستونی بزرگ، تعیین و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مراحل محاسبات پاسخ سازه، با استفاده از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب انجام پذیرفته است. مدل رفتاری سازه به صورت سیستم چند درجه آزادی در نظر گرفته شده و پاسخ دینامیکی طولی (هم امتداد باد) آن بر مبنای روش‌های ارتعاشات تصادفی و تحلیل حوزه فرکانس تعیین گردیده است. برای انجام تحقیق، در مرحله اول، بیلبرد مرتفعی از مطالعات پیشین استخراج و مدل‌سازی و تحلیل شده و ضریب تندباد برای مقادیر مختلف سرعت باد تعیین گردیده است. همچنین، تاثیر ناحیه قرارگیری سازه و زبری سطح زمین در ضریب تندباد مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در ادامه، بیلبردهایی در محدوده ارتفاعی ۱۰ تا ۲۵ متر با دو حالت ابعاد صفحه در نظر گرفته شده‌اند و پاسخ آن‌ها برای مقادیر مختلف سرعت مبنای طرح، در سه ناحیه‌ی باز، حومه شهر و شهرهای معمولی تعیین شده و مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت طراحی ایمن و مقاوم بیلبردها که از سازه‌های آسیب‌پذیر در مقابل باد هستند، نتایج این تحقیق، ضمن ارائه مقادیر ضریب تندباد برای شرایط مختلف هندسی و فیزیکی سازه و ناحیه قرارگیری آن، می‌تواند برای تعیین بارگذاری دینامیکی بیلبردهای بزرگ مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مدل تحلیلی سازه و مبانی تحلیل حوزه فرکانس

۲-۱- مدل تحلیلی سازه

عملکرد سازه بیلبرد همانند تیر کنسولی می‌باشد. به همین دلیل، رفتار سازه آن به صورت تیر قائم با المان‌های تیر و جرم‌های متمرکز شده در گره‌ها در نظر گرفته شد. برای کاهش حجم محاسبات تحلیل حوزه فرکانس، به‌ویژه ماتریس انتقال سیستم که ارتباط نیرو و پاسخ سازه را برقرار می‌کند، درجات آزادی دورانی در گره‌ها با روش تراکم درجات آزادی حذف و اثر آن در درجات آزادی انتقالی ادغام شد. معادله عمومی ارتعاش سیستم چند درجه آزادی تحت بارهای دینامیکی به‌صورت زیر است:

¹ Gust loading factor (GLF)

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (1)$$

که $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ ، و $\mathbf{K}$ ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی، $\mathbf{X}$ بردار پاسخ جابجایی‌های گرهی و $\mathbf{F}$ بردار نیروهای خارجی در گره‌ها می‌باشد. ماتریس میرایی سازه، پس از آنالیز مودی، با روش تناسب و ترکیبی از ماتریس‌های جرم و سختی تعیین شد. جزئیات محاسباتی مراحل ذکر شده، شامل تعیین ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و تراکم درجات آزادی، در مطالعات پیشین ارائه شده است [۲۲ و ۲۳].

نسبت میرایی محاسباتی در ماتریس میرایی، از مجموع میرایی سازه‌ای و میرایی آیرودینامیکی به دست می‌آید. در مطالعات مختلف، روابط و مقادیر متفاوتی برای کمیت‌های مذکور ارائه شده است. آیین‌نامه کانادا ضریب میرایی سازه‌ای را برای سازه‌های فولادی و بتنی به ترتیب ۱ و ۲ درصد پیشنهاد نموده است و اعلام نموده است که میرایی دکل‌ها و دودکش‌ها می‌تواند کمتر از مقدار مذکور باشد. به طور مثال، برای دودکش‌های فولادی جوش شده روکش دار، ضریب میرایی ۰/۵ درصد توصیه شده است. با توجه به اینکه مقدار معینی برای میرایی سازه‌ای بیلبردها ارائه نشده است، کمیت مذکور در مطالعه حاضر، یک درصد فرض می‌شود. میرایی آیرودینامیکی در سازه‌های با وزن کم و سطح بادگیر زیاد، نقش موثری در محدود کردن ارتعاشات سازه دارد. در این تحقیق، از روابط زیر برای محاسبه میرایی آیرودینامیکی استفاده شده است [۱ و ۲۴]:

$$\zeta_a = \rho A C_D U / (4\pi f_r m_r) \chi_a(n) \quad (2 \text{ الف})$$

$$m_r = \left(\int_0^H m(z) \phi_r^2(z) dz \right) / \left(\int_0^H \phi_r^2(z) dz \right) \quad (2 \text{ ب})$$

$$\chi_a(n) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2f_r \sqrt{A}}{U_h} \right)^{4/3}} \quad (2 \text{ ج})$$

که در آن، ζ_a میرایی آیرودینامیکی، $\chi_a(n)$ تابع ادمیتانس آیرودینامیکی^۱، f_r فرکانس سازه، ρ دانسیته هوا، A سطح بادگیر، $\phi_r(z)$ معادله شکل مودی و $m(z)$ جرم واحد طول در ارتفاع z است.

۲-۲- ماتریس تابع انتقال و پاسخ حوزه فرکانس

بر اساس تئوری ارتعاشات تصادفی، ماتریس چگالی طیفی پاسخ سازه چند درجه آزادی از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$\mathbf{S}_x(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \mathbf{S}_f(\omega) \mathbf{H}^*(\omega) \quad (3)$$

در رابطه مذکور، $\mathbf{H}(\omega)$ ماتریس توابع انتقال سازه و $\mathbf{H}^*(\omega)$ ترانهاده مختلط آن است و $\mathbf{S}_f(\omega)$ ماتریس چگالی طیفی نیروی وارده است. ماتریس توابع انتقال بین جابجایی‌های سازه و نیروهای خارجی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\mathbf{H}(\omega) = (-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \quad (4)$$

ω فرکانس زاویه‌ای و j واحد موهومی می‌باشد. با داشتن ماتریس چگالی طیفی پاسخ، واریانس جابجایی سازه در درجه آزادی i ام با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

¹ Aerodynamic admittance function

$$E[x_i^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_{ii}}(\omega) d\omega \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $S_{x_{ii}}(\omega)$ عضو i ام روی قطر اصلی ماتریس تراکم طیفی پاسخ می‌باشد.

۳-۲- مفهوم ضریب بارگذاری تندباد برای پاسخ طولی

ضریب تندباد به صورت نسبت پاسخ طولی کل سیستم (مجموع پاسخ استاتیکی و پاسخ دینامیکی) به پاسخ استاتیکی تعریف می‌شود. رابطه عمومی برای اثر بارگذاری بیشینه باد که با W_p معرفی می‌شود به صورت زیر است [۲۵]:

$$W_p = \mu + g_p \sigma \quad (6)$$

μ اثر بارگذاری میانگین، g_p ضریب بیشینه آماری یا ضریب اوج و σ انحراف معیار اثر بارگذاری می‌باشد. اگر رابطه بالا به اثر میانگین μ تقسیم شود، ضریب تندباد یا ضریب اثر جهشی باد حاصل خواهد شد:

$$C_g = 1 + g_p \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \quad (7)$$

ضریب بیشینه آماری که بیانگر نسبت پاسخ دینامیکی بیشینه به مقدار انحراف معیار آن است از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$g_p = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (8)$$

که در آن، $T=3600$ Sec و v به طور تقریبی برابر با فرکانس اصلی سازه است.

۳- پارامترهای باد

از کمیت‌های مهم مهندسی باد در محاسبه پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی در مقابل باد، به تابع تغییرات سرعت باد در ارتفاع، نیروهای استاتیکی و دینامیکی طولی باد و ماتریس طیف تراکم نیروی طولی باد می‌توان اشاره نمود که در ادامه تشریح می‌شوند.

۳-۱- تغییرات ارتفاعی سرعت میانگین باد

تغییرات ارتفاعی سرعت میانگین باد در لایه مرزی، با قانون توانی یا لگاریتمی بیان می‌شود. قانون لگاریتمی بر مبنای سرعت اصطکاکی بیان می‌گردد. چون در مراجع مورد استفاده در این تحقیق، سایر پارامترهای مهندسی باد از قبیل واریانس نوسانات طولی سرعت باد و طیف سرعت باد، که برای تحلیل دینامیکی لازم هستند، نیز بر اساس سرعت اصطکاکی بیان شده است، از قانون لگاریتمی برای پروفیل سرعت باد استفاده شد:

$$U(z) = 2.5u_* \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad z \geq z_d + 10 \quad (9 \text{ الف})$$

$$U(z) = 2.5u_* \ln \left(\frac{10}{z_0} \right) \quad z \leq z_d + 10 \quad (9 \text{ ب})$$

z ارتفاع مورد نظر، z_0 طول زبری (برای نواحی مختلف مطابق جدول (۱))، z_d صفحه با جابجایی صفر^۱ است که در صورت استفاده از مقادیر جدول (۱)، مقدار آن را می‌توان صفر فرض کرد [۲۶]. u_* سرعت اصطکاکی باد است که از رابطه زیر قابل تعیین است [۲۶]:

$$u_* = \frac{U(z_R)}{2.5 \ln \left[\frac{z_R - z_d}{z_0} \right]} \quad (10)$$

$U(z_R)$ سرعت میانگین باد در تراز مرجع است. برای تعیین سرعت اصطکاکی از رابطه فوق، می‌توان از سرعت مبنای باد، که در اکثر آیین‌نامه‌ها به عنوان مقدار سرعت میانگین باد در ارتفاع ۱۰ متری در ناحیه باز تعریف می‌شود، استفاده نمود. با این فرض، سرعت اصطکاکی حاصل مربوط به ناحیه باز، u_{*open} ، به دست می‌آید که بر اساس آن و با استفاده از مقادیر نسبت u_* / u_{*open} در جدول (۱)، مقدار سرعت اصطکاکی در نواحی دیگر، قابل تعیین است.

جدول ۱. مقادیر توصیه شده طول زبری z_0 برای نواحی مختلف [۲۶]

Tale. 1. Recommended values for roughness length z_0 for different terrains [26]

پارامتر	دریا و نواحی مسطح پوشیده از یخ	ناحیه باز	حومه شهر	نواحی شهری معمولی	مراکز شهرهای بزرگ
$z_0 (m)$	0.005-0.01	0.03-0.1	0.2-0.4	0.8-1.2	2-3
u_* / u_{*open}	0.85	1.00	1.15	1.33	1.45
β	6.5	6.0	5.25	4.85	4.0

۳-۲- نیروهای استاتیکی و دینامیکی طولی باد

نیروهای استاتیکی و دینامیکی در امتداد طولی باد از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$\bar{f}_D = 1/2 \rho_a \bar{U}^2 C_D B \quad (11)$$

$$f'_D = \rho_a \bar{U} u(t) C_D B \quad (12)$$

ρ_a دانسیته هوا، B عرض عمود بر امتداد یا عرض بادگیر، C_D ضریب پسا، $\bar{U}$ سرعت میانگین، و $u(t)$ مولفه نوسانی باد می‌باشند. تابع چگالی طیفی نیروی باد در واحد طول به صورت زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$S_{f_D}(n) = \rho^2 \bar{U}^2 A^2 C_D^2 S_u(n) \quad (13)$$

¹ Zero plane displacement

$S_u(n)$ چگالی طیفی سرعت نوسانی باد و A سطح بادگیر است. محتوای فرکانسی سرعت نوسانی با تابع چگالی طیفی نشان داده می‌شود. از توابع متداول برای تعیین تراکم طیفی مولفه نوسانی سرعت باد، طیف ون کارمن^۱ است که تابعی از ارتفاع بوده و برای نواحی مختلف قابل استفاده است:

$$S_u(z, n) = \frac{\sigma_u^2}{n} \frac{4x}{[1 + 70.8x^2]^{5/6}} \quad x = \frac{L_u n}{\bar{U}(z)} \quad (14)$$

در رابطه فوق، n فرکانس، $\bar{U}(z)$ سرعت میانگین باد در ارتفاع مورد نظر، σ_u^2 واریانس سرعت نوسانی و L_u مقیاس طول^۲ می‌باشد که تابعی از زبری زمین و ارتفاع نقطه مورد نظر است و از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۸]:

$$L_u = 300(z/300)^{0.46+0.074\ln(z/300)} \quad (15)$$

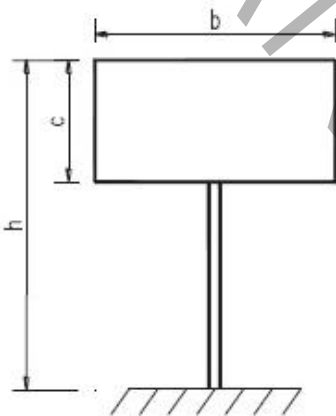
واریانس سرعت نوسانی باد، تابعی از زبری زمین است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_u^2 = \beta u_*^2 \quad (16)$$

مقادیر ضریب β برای نواحی مختلف، در جدول (۱) ارائه شده است. مقدار ضریب پسا برای صفحه مستطیلی بیلبرد از رابطه پیشنهادی توسط لچفورد قابل تعیین است [۸]:

$$C_D = 1.45 + 0.5(0.7 + \log(b/c))(0.5 - c/h) \quad b/c > 5, 0.2 < c/h < 1.0 \quad (17)$$

در رابطه مذکور، b و c مطابق شکل (۲) به ترتیب عرض و ارتفاع صفحه و h ارتفاع کل بیلبرد است. برای مقادیر $c/h \leq 0.2$ ، استفاده از $c/h = 0.2$ توصیه شده است. ضریب پسا برای ستون با مقطع گرد، تابعی از نسبت لاغری (ارتفاع به قطر) است. بر اساس آیین‌نامه کانادا، مقدار ضریب پسا برای مقاطع گرد نسبتاً صاف، به‌ازای نسبت‌های لاغری ۷ و ۲۵ به ترتیب ۰/۶ و ۰/۷ است که در این تحقیق، مقدار آن ۰/۶۵ فرض شده است.



شکل ۲. طرح کلی بیلبرد تک ستونی

Fig. 2. Schematic layout of a single-column billboard

¹ Von karman

² Length Scale

۳-۳- ماتریس طیف تراکم نیروی طولی باد

طبق رابطه (۴)، محاسبه پاسخ دینامیکی سازه، مستلزم داشتن ماتریس تراکم طیف نیروی باد است. برای تعیین ماتریس مذکور، علاوه بر داشتن طیف نیروی باد در هر گره، طیف همبستگی بین گره‌های مختلف نیز لازم است. طیف همبستگی بین گره‌ها با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$S_{f_D jk}(n, z) = \sqrt{S_{f_D j}(n, z) * S_{f_D k}(n, z) * coh_{jk}(n, z)} \quad (18)$$

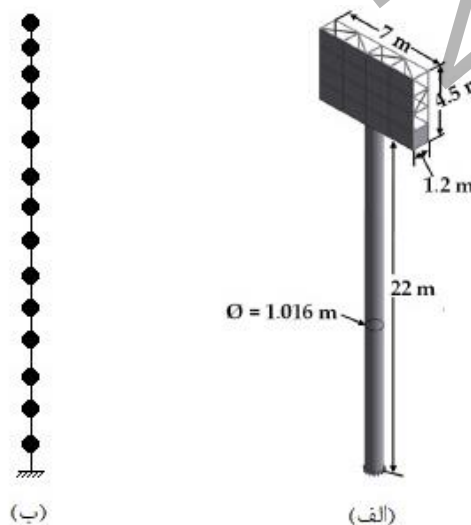
در رابطه (۱۸)، $coh_{jk}(n, z)$ تابع همبستگی است که برای مدل تیر طره‌ای قائم از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۹]:

$$coh_{jk}(n, z) = \exp \left(- \frac{nc_z |(z_j - z_k)|}{1/2 [\bar{U}(z_j) + \bar{U}(z_k)]} \right) \quad (19)$$

که در آن ارتفاع، ω فرکانس زاویه‌ای، $\bar{U}(z)$ سرعت میانگین باد و C_z ضریب ثابتی است که مقدار آن برابر ۱۰ توصیه شده است.

۴- مشخصات فیزیکی و هندسی بیلبرد مطالعه شده

همان‌طور که قبلاً بیان شد، در مرحله نخست تحقیق، ضریب تندباد در مورد یک بیلبرد مستخرج از مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. طرح شماتیک و ابعاد بیلبرد بررسی شده در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. این سازه در مرجع [۲] ارائه شده و ایمنی سازه‌ای آن با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مورد ارزیابی قرار گرفته است. این بیلبرد با ارتفاع کل ۲۶/۵ متر، دارای صفحه مستطیلی به عرض ۷ و ارتفاع ۴/۵ متر است که توسط سازه پشتیبان خرابایی متشکل از نبشی‌های با ساق ۶۳/۵ و ضخامت ۱۲/۷ میلیمتر، به ستون فولادی دایره‌ای به قطر بیرونی ۱۰۱/۶ سانتیمتر و ضخامت جداره ۲۲/۲ میلیمتر متصل است. مدول الاستیسیته فولاد ۲۰۰ هزار مگاپاسکال و تنش تسلیم آن ۳۶۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. دوره تناوب اصلی سازه در امتداد عمود بر صفحه تابلو، ۰/۹۵ ثانیه تعیین شده است.

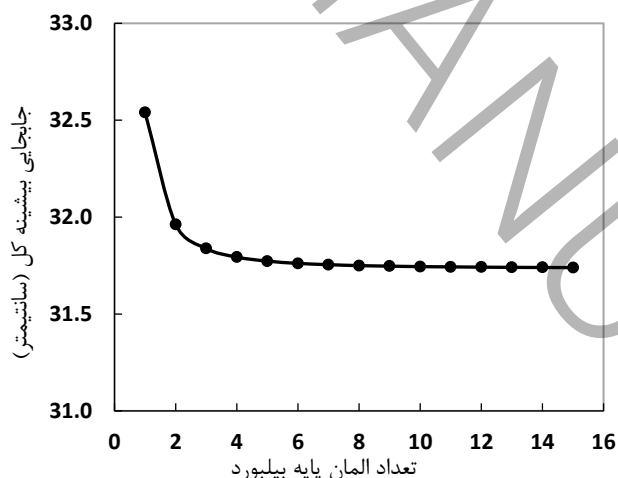


شکل ۳. الف) طرح کلی و ابعاد بیلبرد مطالعه شده [۲] (ب) مدلی تحلیلی چند درجه آزادی سازه

Fig. 3. a) The overall design and dimensions of the studied billboard [2] (b) Analytical model of the structure

در این تحقیق، مدل سازه‌ای بیلبورد، مطابق شکل (۳-ب)، به صورت سیستم ۱۴ درجه آزادی با المان‌های تیر در نظر گرفته شده که شامل ۱۰ المان برای بخش پایه بیلبورد تا زیر صفحه و ۴ المان در قسمت صفحه هست. اثر نیروی باد در امتداد عمود بر صفحه بیلبورد مد نظر قرار گرفته است و از سختی صفحه در مدل سازه صرف نظر شده است. اثر جرم و سطح بادگیر صفحه بیلبورد، در گره‌های متناظر در محل صفحه اعمال شده است. مقادیر پاسخ، شامل جابجایی استاتیکی و دینامیکی در شرایط مختلف، در نقطه فوقانی بیلبورد تعیین شده است. تعداد المان مذکور، بر اساس آنالیز همگرایی پاسخ سازه انتخاب شده است. برای مثال، شکل (۴) جابجایی بیشینه کل را در نقطه فوقانی بیلبورد به‌ازای سرعت مبنای باد ۳۰ متر بر ثانیه در ناحیه باز در مقابل تعداد المان پایه تا زیر صفحه بیلبورد نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش تعداد المان، دقت محاسبات بیشتر می‌شود. مقدار جابجایی بیشینه برای ۵، ۱۰ و ۱۵ المان، به ترتیب ۳۱/۷۷۳، ۳۱/۷۴۵ و ۳۱/۷۳۹ سانتیمتر است و اختلاف نتیجه بین حالات ۱۰ و ۱۵ المان، حدود ۰/۰۲ درصد است که نشان می‌دهد تعداد ۱۰ المان انتخاب شده برای قسمت مذکور، با همگرایی پاسخ مناسبی همراه است، البته پاسخ استاتیکی در تعداد المانی کمتر از مقدار فرض شده همگرا می‌شود. مشخصات تکمیلی مدل تحلیلی شامل ارتفاع گره‌ها، عرض بادگیر، مقادیر جرم گرهی و سختی خمشی سازه، در جدول (۲) ارائه شده است. وزن واحد سطح صفحه و سازه پشتیبان آن به نحوی در نظر گرفته شده است که دوره تناوب اصلی سازه مطابق با مرجع [۲] برابر با ۰/۹۵ ثانیه باشد که بر اساس آن، وزن واحد سطح پانل ۱۱۵ کیلوگرم بر متر مربع تعیین شد.

سایر مفروضات فیزیکی و آیرودینامیکی به این صورت در نظر گرفته شد: دانسیته هوا $\rho_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ، سرعت مبنای میانگین ساعتی بین صفر تا ۴۰ متر بر ثانیه (حداکثر سرعت مبنای باد در ایران ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت معادل با ۳۸/۸۹ متر بر ثانیه است)، ناحیه قرارگیری باز طبق مشخصات ارائه شده در جدول (۱) و ضریب پسا برای صفحه و ستون بیلبورد مطابق توضیحات ارائه شده در بخش ۳-۲.



شکل ۴. تاثیر تعداد المان پایه بیلبورد تا زیر صفحه، در جابجایی کل بیشینه نقطه فوقانی بیلبورد در ناحیه باز و سرعت باد ۳۰ متر بر ثانیه

Fig. 4. a) The effect of the number of billboard column elements up to the bottom of the screen on the total peak displacement of the top point of the billboard in an open terrain for wind speed of 30 m/s

جدول ۲. اطلاعات مدل سازه‌ای بیلبورد مورد مطالعه

Tale. 2. Properties of the structural model of the studied billboard

شماره گره	ارتفاع (m)	عرض مقابل باد (m)	سختی خمشی (10^9N.m^2)	سطح روبروی باد (m^2)	جرم (تن)
1	2.20	1.016	1.712	2.24	1.20
2	4.40	1.016	1.712	2.24	1.20
3	6.60	1.016	1.712	2.24	1.20
4	8.80	1.016	1.712	2.24	1.20
5	11.00	1.016	1.712	2.24	1.20
6	13.20	1.016	1.712	2.24	1.20
7	15.40	1.016	1.712	2.24	1.20
8	17.60	1.016	1.712	2.24	1.20
9	19.80	1.016	1.712	2.24	1.20
10	22.00	7.00	1.712	5.06	1.36
11	23.13	7.00	1.712	7.88	1.52
12	24.25	7.00	1.712	7.88	1.52
13	25.38	7.00	1.712	7.88	1.52
14	26.50	7.00	1.712	3.94	0.76

۵- تحلیل و نتایج

در این بخش، مراحل تحلیل و نتایج ذکر شده است. نتایج تحلیل در مرحله نخست روی بیلبورد معرفی شده در بخش قبل ارائه می‌شود. سپس، ۶ بیلبورد با مشخصات هندسی و نواحی قرارگیری مختلف ارائه می‌شود و پاسخ آن‌ها به ازای متغیرهای مختلفی تبیین می‌شود.

۵-۱- مراحل تحقیق

برای انجام تحقیق و محاسبه پاسخ سازه در حوزه فرکانس، از نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب استفاده شد. این نرم‌افزار از قابلیت‌های محاسباتی بالایی به‌ویژه برای عملیات ماتریسی برخوردار است، با استفاده از ابزار محاسباتی موجود در این نرم‌افزار، مراحل تحقیق به‌صورت گام به گام قابل پیاده‌سازی و کنترل است. همچنین، پس از تکمیل برنامه، می‌توان آن را به یک تابع تبدیل نمود و تاثیر متغیرهای مختلف از قبیل سرعت مبنای باد، زبری سطح زمین، مشخصات هندسی سازه و سایر موارد را به صورت پارامتری بررسی نمود. مراحل برنامه‌نویسی برای انجام تحلیل، به صورت زیر انجام پذیرفت:

- ۱- تعریف مشخصات ابعادی سازه و خواص مصالح
- ۲- تعریف تعداد المان و موقعیت گره‌های مدل سازه
- ۳- محاسبه ماتریس جرم بر اساس جرم‌های متمرکز شده در گره‌ها
- ۴- تعیین ماتریس سختی المان‌ها و ادغام آن‌ها برای تعیین ماتریس سختی کلی سازه
- ۵- تراکم درجات آزادی دورانی و محاسبه ماتریس سختی کاهش یافته بر اساس درجات آزادی انتقالی
- ۶- تعریف پروفیل تغییرات سرعت میانگین باد در ارتفاع و محاسبه سرعت باد در گره‌ها
- ۷- تعیین ماتریس میرایی به روش تناسب بر مبنای ماتریس جرم و سختی
- ۸- تحلیل مودال و تعیین اشکال مودی و فرکانس‌های سازه

- ۹- محاسبه نیروهای استاتیکی باد در گره‌های مختلف
- ۱۰- محاسبه پاسخ‌های استاتیکی در گره‌ها
- ۱۱- تعیین ماتریس انتقال سازه بین نیروهای دینامیکی و جابجایی‌های گرهی
- ۱۲- محاسبه ماتریس طیفی نیروهای نوسانی باد در گره‌ها
- ۱۳- تعیین ماتریس طیفی پاسخ دینامیکی
- ۱۴- تعیین انحراف معیار جابجایی دینامیکی با انتگرال‌گیری عددی به روش سیمسون
- ۱۵- محاسبه پاسخ دینامیکی بیشینه و جابجایی کل سازه
- ۱۶- تعیین ضریب بارگذاری تندباد بر مبنای مقادیر جابجایی کل بیشینه و جابجایی استاتیکی سازه

۵-۲- نتایج تحلیل برای بیلبورد معرفی شده

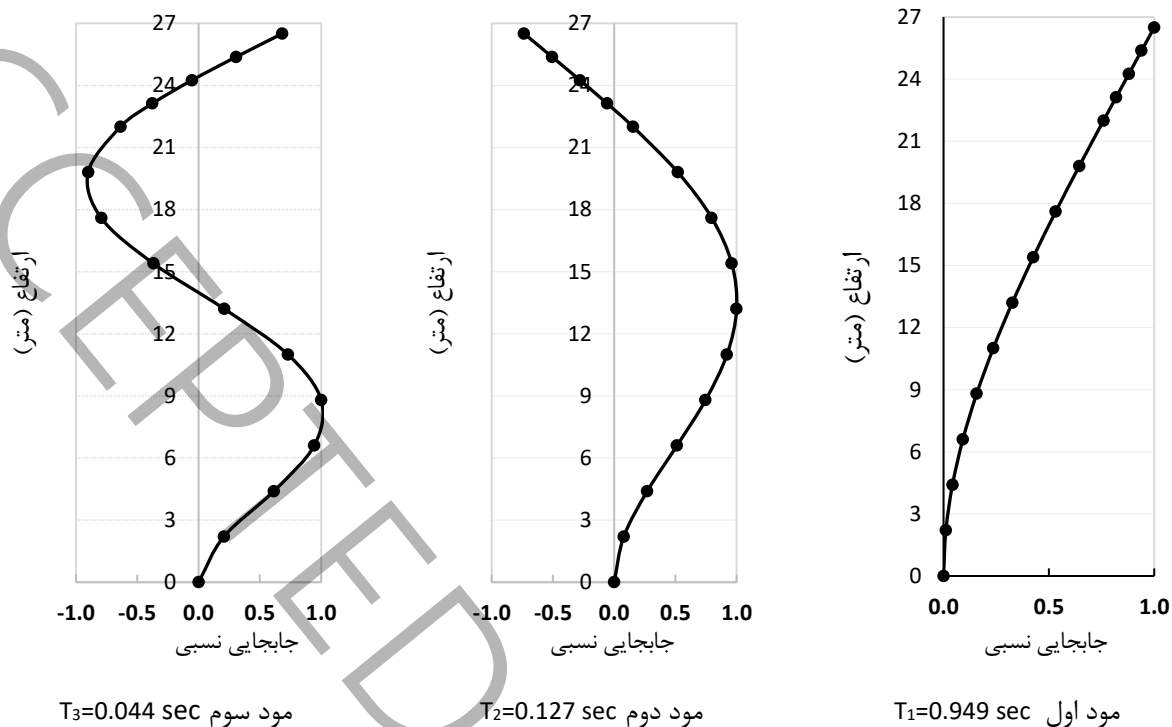
در این بخش، نتایج تحلیل بیلبورد معرفی شده در بخش ۴ ارائه شده است. بیلبورد مذکور، دارای ارتفاع کل ۲۶/۵ متر و پانلی به مساحت ۳۰/۵ متر است که بر روی ستونی به قطر خارجی ۱۶/۰ متر قرار دارد و جرم کل سازه حدود ۱۶ تن است. ناحیه قرارگیری سازه در مرحله نخست، به صورت ناحیه باز فرض شد. با توجه به اینکه سرعت مبنای بیشینه باد در کشور ایران ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت (۳۸/۸۹ متر بر ثانیه) است، تغییرات سرعت مبنای باد حداکثر تا ۴۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

مراحل تحلیل طبق گام‌های تشریح شده در بخش ۵-۱ در محیط برنامه‌نویسی متلب پیاده‌سازی شد و برای اطمینان از صحت محاسبات، مراحل محاسبات به صورت گام به گام کنترل گردید. علاوه بر این، با توجه به اینکه ماتریس سختی سازه و نیروهای گرهی باد از مبنای مهم در دقت برنامه هستند، برای کنترل صحت آن، جابجایی سازه طبق برنامه، با مقادیر به دست آمده از روش تحلیل سازه‌ای تیر مزدوج مقایسه شد. نتایج بیانگر دقت بالای برنامه بود. برای اجتناب از افزایش حجم مطالب، از ارائه جزئیات صرفنظر می‌شود.

اشکال مودی و دوره تناوب متناظر برای آن‌ها برای سه مود اول سازه در شکل (۵) ارائه شده است. طبق این شکل، دوره تناوب اصلی سازه حدود ۰/۹۵ ثانیه است. با توجه به محتوای فرکانسی نیروی دینامیکی باد در امتداد طولی، معمولاً مود اول سازه مهم‌ترین نقش را در پاسخ طولی دارد، با این وجود، در تعیین ماتریس انتقال سازه، تاثیر همه مودها مد نظر قرار گرفته است.

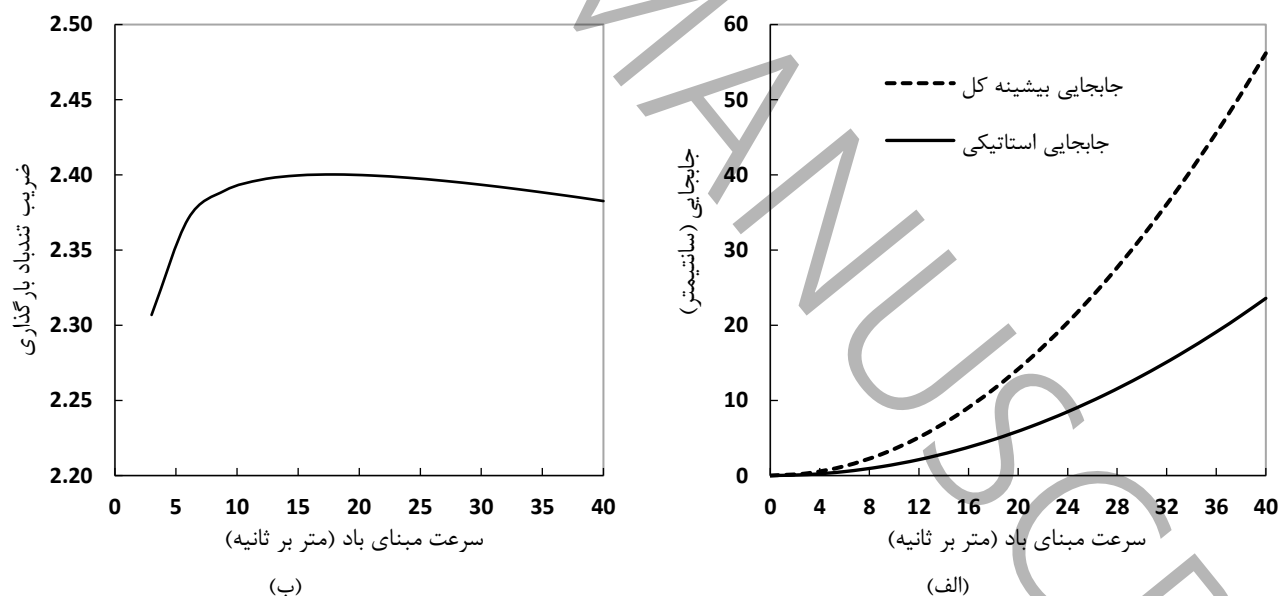
شکل ۶ (الف) تغییرات جابجایی استاتیکی و جابجایی کل بیشینه سازه (مجموع جابجایی استاتیکی و دینامیکی بیشینه) را در بالای سازه در مقابل تغییرات سرعت مبنای باد بین صفر تا ۴۰ متر بر ثانیه در ناحیه باز با زبری ۰/۰۶۵ متر (میانگین بازه در جدول (۱) برای ناحیه باز) نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نیروی میانگین باد، تابعی از مجذور سرعت آن است، مطابق انتظار، تغییرات جابجایی استاتیکی در مقابل سرعت مبنای باد مشابه منحنی سهموی است. مقدار جابجایی استاتیکی متناظر با سرعت ۴۰ متر بر ثانیه، برابر ۲۳/۵۸ سانتیمتر است. تغییرات جابجایی کلی سازه در مقابل سرعت باد نیز به طور غیرخطی با شیب افزایشی است و به‌ازای سرعت حداکثر فرض شده، به مقدار ۵۶/۱۸ سانتیمتر می‌رسد. با توجه به اینکه ضریب تندباد به صورت نسبت جابجایی کل بیشینه به جابجایی استاتیکی تعریف می‌شود، برای سرعت میانگین ۴۰ متر بر ثانیه، مقدار ضریب تندباد برابر با ۲/۳۸ است.

شکل ۶ (ب) تغییرات ضریب تندباد را در مقابل سرعت مبنای باد نشان می‌دهد. چون با افزایش سرعت باد، جابجایی کل بیشینه و جابجایی استاتیکی با الگوی مشابهی افزایش می‌یابند (شکل ۶ (الف))، ضریب تندباد با افزایش سرعت باد تغییرات محسوسی ندارد و در محدوده ۲/۳ تا ۲/۴ تغییر می‌کند.



شکل ۵. سه شکل مودی نخست سازه و دوره تناوب مربوطه

Fig. 5. The first three modal shapes of the structure and the corresponding vibration periods

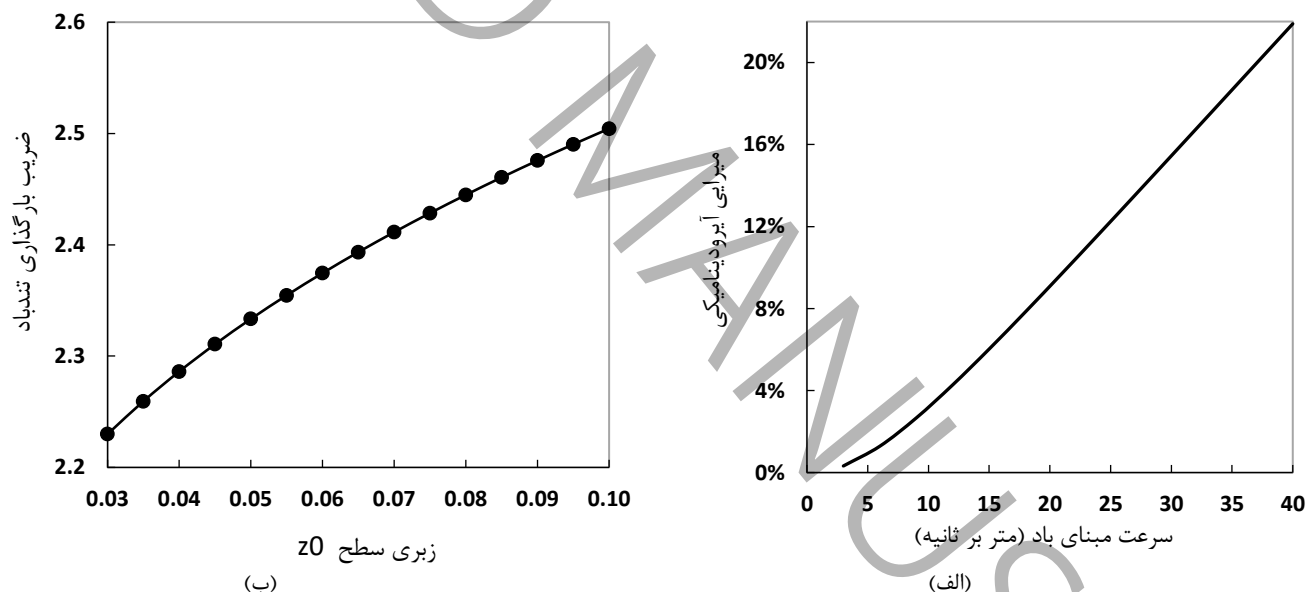


شکل ۶. الف) تغییرات جابجایی استاتیکی و جابجایی کل پیشینه نقطه فوقانی بیلپورد در مقابل سرعت مبنای باد، ب) تغییرات ضریب بارگذاری تندباد در مقابل سرعت مبنای باد (ناحیه باز)

Fig. 6. a) Changes in static displacement and total peak displacement of the top point of the billboard versus basic wind speed, b) Changes in gust loading factor versus basic wind speed (open area)

مطابق نتایج به دست آمده، میرایی آیرودینامیکی برای بیلبردها از عوامل مهم در پاسخ سازه است. همان‌طور که در بخش ۳ تشریح شد، میرایی کلی برابر میرایی سازه و میرایی آیرودینامیکی است و میرایی سازه در این تحقیق، یک درصد فرض شده است، ولی میرایی آیرودینامیکی مطابق رابطه (۲) تابعی از پارامترهای مختلف است و با سرعت مبنای باد و سطح بادگیر سازه ارتباط مستقیم و با جرم و سختی آن ارتباط عکس دارد. با توجه به اینکه بیلبردها سازه‌هایی با سطح بادگیر زیاد و جرم و سختی نسبتاً کم هستند، میرایی آیرودینامیکی آن‌ها زیاد است و با افزایش سرعت باد بیشتر می‌شود. شکل ۷ (الف) تغییرات میرایی آیرودینامیکی را برای بیلبرد مطالعه شده در مقابل سرعت مبنای باد نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقدار میرایی آیرودینامیکی نسبت به میرایی ذاتی سازه زیاد بوده و با افزایش سرعت باد، اختلاف بین آن‌ها بیشتر می‌شود. به طور مثال، مقادیر میرایی آیرودینامیکی برای سرعت‌های ۳۰ و ۴۰ متر بر ثانیه، به ترتیب ۱۳/۵۲ و ۲۱/۸۹ درصد است. در نتیجه، عامل مذکور نقش اساسی در کاهش ارتعاشات رزونانسی سازه دارد.

با توجه به اینکه زبری سطح زمین در ناحیه باز مطابق جدول (۱) بین ۰/۰۳ تا ۰/۱ متغیر است، برای بررسی تاثیر زبری سطح در ناحیه باز، مقدار ضریب تندباد برای مقادیر مختلف زبری سطح در محدوده فوق به ازای سرعت مبنای باد ۳۰ متر بر ثانیه تعیین شد. شکل ۷ (ب) تغییرات ضریب تندباد را در مقابل زبری سطح زمین نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش زبری سطح، ضریب تندباد افزایش می‌یابد. برای مثال مقادیر ضریب تندباد برای زبری ۰/۰۳ و ۰/۱ به ترتیب ۲/۲۳ و ۲/۵ است. این نتیجه را می‌توان با کاهش سرعت میانگین باد با افزایش زبری سطح زمین و در نتیجه کاهش میرایی آیرودینامیکی توجیه نمود.



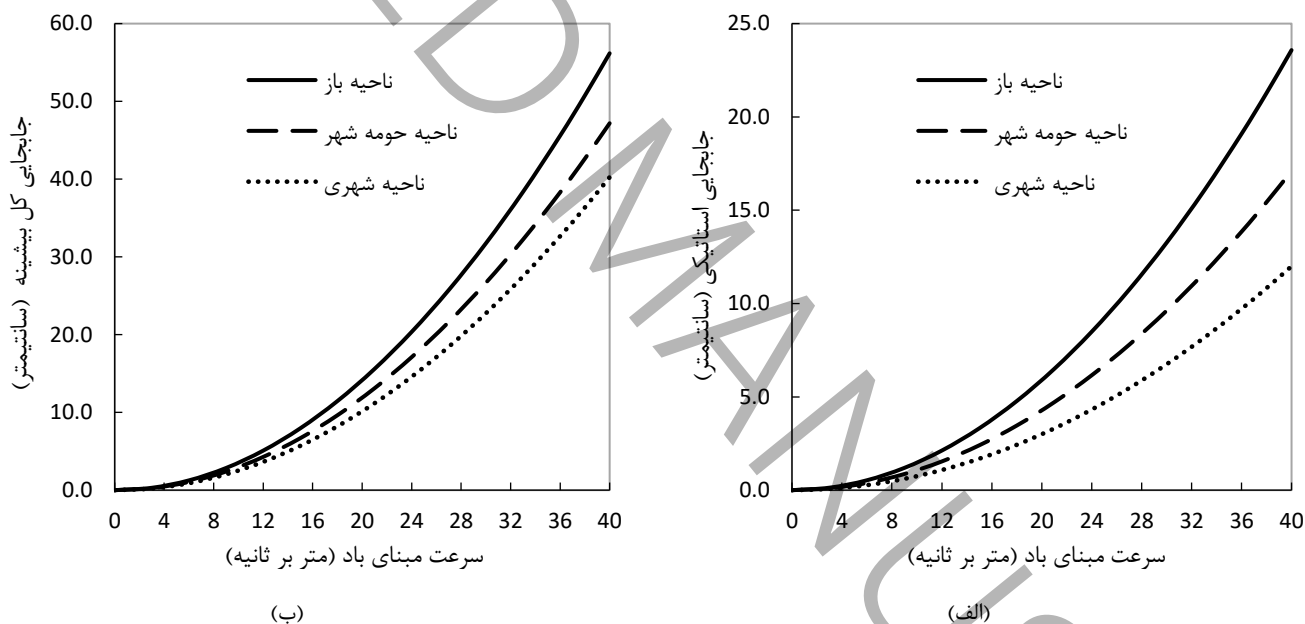
شکل ۷. الف) تغییرات میرایی آیرودینامیکی در مقابل سرعت مبنای باد، ب) تغییرات ضریب تندباد در مقابل زبری سطح برای ناحیه باز و سرعت مبنای ۳۰ متر بر ثانیه

Fig. 7. Variations of aerodynamic damping versus basic wind speed, b) Variations of gust coefficient versus surface roughness for open terrain and basic speed of 30 m/s

دسته‌بندی نواحی باد ارائه شده در آیین‌نامه‌های مختلف، متفاوت است. برای مثال، در آیین‌نامه بارگذاری ایران دو ناحیه باز و شهری ارائه شده است، ولی در آیین‌نامه‌های آمریکا و اروپا، چهار و در آیین‌نامه ژاپن، پنج ناحیه باد ارائه شده است. کتب مرجع مهندسی باد، اطلاعات مبنای باد را برای پنج ناحیه (مشابه لیست ارائه شده در جدول (۱)) ارائه نموده‌اند. با توجه به اینکه در این تحقیق، از تحلیل دینامیکی برای تعیین پاسخ سازه استفاده شده است، نواحی در نظر گرفته شده شامل ناحیه‌های باز، حومه شهر و

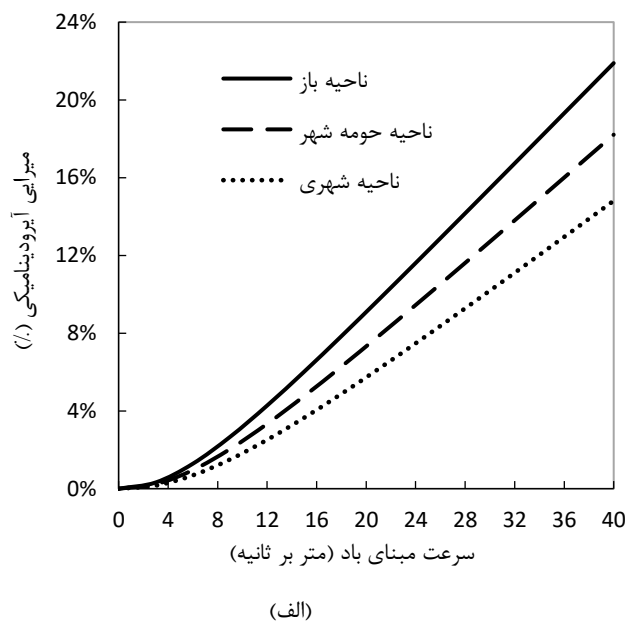
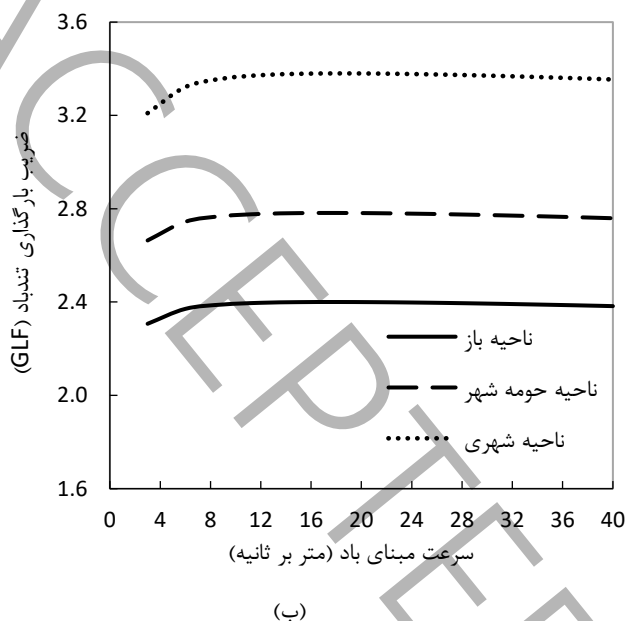
شهرهای معمولی که برای بیلبردها متداول است، می‌باشد و خواص مبنای باد مطابق بخش (۳)، از کتب مرجع استخراج شده است. شکل‌های ۸ (الف) و ۸ (ب) به ترتیب جابجایی استاتیکی و جابجایی کل بیشینه را برای نواحی باز، حومه شهر و شهر به ازای مقادیر مختلف سرعت مبنای باد نشان می‌دهد. مطابق این اشکال، هر دو کمیت مذکور در ناحیه باز در مقایسه با دو ناحیه دیگر دارای مقدار بیشتری هستند. برای سرعت مبنای باد ۴۰ متر بر ثانیه، جابجایی استاتیکی بالای بیلبرد در نواحی باز، حومه شهر و شهری به ترتیب ۲۳/۵۸، ۱۷/۱۰ و ۱۲/۰ سانتیمتر و جابجایی کل بیشینه به ترتیب ۵۶/۱۸، ۴۷/۱۹ و ۴۰/۲۴ سانتیمتر است. دلیل نتیجه فوق را می‌توان با بالا بودن سرعت میانگین باد در نواحی با زبری کمتر توجیح نمود. به طور مثال، برای سرعت مبنای باد ۴۰ متر بر ثانیه، سرعت میانگین آن در بالای بیلبرد برای نواحی باز، حومه شهر و شهری به ترتیب ۴۷/۷۴، ۴۰/۹۴ و ۳۶/۴۱ متر بر ثانیه است.

شکل (۹-الف) تغییرات میرایی آیرودینامیکی را برای سه ناحیه مطالعه شده، در مقابل سرعت مبنای باد نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقدار میرایی آیرودینامیکی در ناحیه باز بیشتر از سایر نواحی است. به نحوی که مقدار آن برای سرعت ۴۰ متر بر ثانیه در ناحیه باز به ۲۱/۸۹ درصد می‌رسد. شکل (۹-ب) تغییرات ضریب تندباد را برای سه ناحیه نشان می‌دهد. ضریب تندباد در نواحی شهری، بالاتر از سایر نواحی است. بالا بودن زبری زمین، پایین بودن میرایی آیرودینامیکی و کم بودن سرعت میانگین باد در نواحی شهری در مقایسه با نواحی دیگر، از دلایل اصلی بالا بودن ضریب تندباد در این ناحیه است. مقدار ضریب تندباد در این ناحیه، برای سرعت‌های بالا حدود ۳/۳۵ است که نشان می‌دهد پاسخ کل بیشینه سازه، برابر پاسخ استاتیکی است.



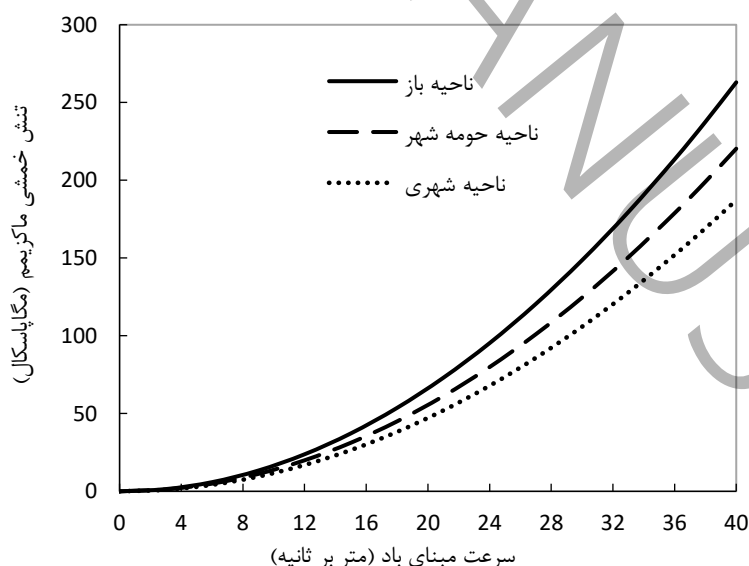
شکل ۸. تغییرات الف) جابجایی استاتیکی و ب) جابجایی کل بیشینه نقطه فوقانی بیلبرد در مقابل سرعت مبنای باد برای نواحی باز، حومه شهر و شهری

Fig. 8. Variations of a) static displacement and b) total peak displacement of the top point of the billboard versus basic wind speed for open, suburban and urban terrains



شکل ۹. تغییرات الف) میرایی آیرودینامیکی و ب) ضریب تندباد در مقابل سرعت مبنای باد برای نواحی باز، حومه شهر و شهری
Fig. 9. Variations of a) aerodynamic damping and b) gust loading factor versus basic wind speed for open, suburban, and urban terrains

شکل (۱۰) مقدار تنش خمشی ماکزیمم را در ستون بیلبرد نشان می‌دهد که در پای ستون رخ می‌دهد. تنش خمشی ماکزیمم نیز همانند پاسخ‌های جابجایی برای ناحیه باز بیش از دو ناحیه دیگر است. برای سرعت مبنای ۴۰ متر بر ثانیه، مقدار تنش خمشی ماکزیمم در نواحی باز، حومه شهری و شهری به ترتیب حدود ۲۶۲/۹۳، ۲۲۰/۳۱ و ۱۸۷/۲۳ مگاپاسکال است.



شکل ۱۰- تنش خمشی ماکزیمم در ستون بیلبرد در مقابل سرعت مبنای باد
Fig. 10. Maximum bending stress in billboard column versus basic wind speed

۵-۳- نتایج تحلیل برای بیلبردهایی با مشخصات هندسی مختلف

نتایج بخش‌های قبل مربوط به یک بیلبرد خاص بود. در ادامه، بیلبردهایی با مشخصات هندسی مختلف در نظر گرفته شدند که نتایج تحلیل آن‌ها در نواحی باز، حومه شهر و شهری در این قسمت ارائه می‌شود. بیلبردها با ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۵ متری و با ارتفاع صفحه ۴ متر و عرض‌های ۸ و ۱۲ متر (نسبت‌های عرض به ارتفاع ۲ و ۳) در نظر گرفته شدند. سرعت مبنای طرح ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت (۳۸/۸۹ متر بر ثانیه) فرض شد. قطر ستون بیلبرد به صورت ضربی از عدد ۵ انتخاب و ضخامت جداره ستون به نحوی تعیین شد که نسبت قطر به ضخامت ستون در محدوده ۴۰ تا ۵۰ قرار گیرد و تنش خمشی ماکزیمم بدون ضریب در هر سه ناحیه، نزدیک به عدد ۲۰۰ مگاپاسکال (با اختلاف حداکثر ۱۰ مگاپاسکال) باشد.

جدول (۳) مشخصات هندسی بیلبردها و نتایج تحلیل، شامل سرعت میانگین باد در بالای بیلبرد، جابجایی کل بیشینه، تنش خمشی ماکزیمم در ستون و ضریب تندباد را برای ناحیه باز نشان می‌دهد. برای بیلبرد با ارتفاع ۱۰ متر، ضریب تندباد برای عرض پانل ۸ و ۱۲ متر به ترتیب ۲/۸۳ و ۲/۸۷ به دست آمد که اختلاف ناچیزی دارند. برای سایر بیلبردها با ارتفاع یکسان و عرض متغیر، نتیجه مشابهی به دست آمد که نشان می‌دهد ضریب تندباد برای ارتفاع ثابت، حساسیت زیادی به عرض بیلبرد ندارد. با افزایش ارتفاع بیلبرد، ضریب تندباد کاهش می‌یابد. ضریب تندباد میانگین برای ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۵ متری به ترتیب ۲/۸۵، ۲/۵۴ و ۲/۴۵ است. با کاهش ارتفاع، آشفتگی باد افزایش و سرعت میانگین باد و به تبع آن میرایی آیرودینامیکی کاهش می‌یابد و عوامل مذکور موجب افزایش نسبت پاسخ کل به استاتیکی یا همان ضریب تندباد می‌شود.

جدول (۴) نتایج تحلیل را برای بیلبردهای واقع در حومه شهر نشان می‌دهد. مشخصات هندسی سازه‌ها و سرعت مبنای طرح همانند حالت قبل است و فقط ناحیه قرارگیری سازه تغییر دارد. الگوی تغییر ضریب تندباد مثل حالت قبل است و مقدار آن با کاهش ارتفاع بیلبرد، افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب تندباد در این ناحیه در مقایسه با ناحیه باز (جدول ۳) بیشتر می‌باشد. این نتیجه به دلیل افزایش زبری زمین و آشفتگی باد و کاهش سرعت میانگین باد و به تبع آن کاهش میرایی آیرودینامیکی است. به نحوی که ضریب تندباد برای بیلبردهای واقع در ناحیه حومه شهر به طور متوسط ۳/۱۱ است که در مقایسه با ضریب تندباد متوسط در ناحیه باز یعنی عدد ۲/۶۲، حدود ۱۹ درصد افزایش داشته است.

جدول ۳. مشخصات هندسی بیلبردها و نتایج تحلیل برای ناحیه باز

Tale. 3. Geometrical characteristics of billboards and analysis results for open terrain

ارتفاع	ارتفاع پانل	عرض پانل	جرم واحد سطح پانل	سرعت باد	قطر ستون	ضخامت ستون	جابجایی بیشینه	تنش ماکزیمم	ضریب تندباد
$h(m)$	$c(m)$	$b(m)$	$m_u(kg/m^2)$	$V_H(m/s)$	$D(cm)$	$t(mm)$	$x_p(cm)$	$\sigma_s(Mpa)$	C_g
10	4	8	100	38.89	70	14	8.65	206.9	2.832
10	4	12	120	38.89	80	17	7.30	199.2	2.869
20	4	8	140	44.24	100	20	24.80	201.0	2.537
20	4	12	160	44.24	110	25	22.73	201.4	2.553
25	4	8	180	45.96	110	23	35.28	200.3	2.442
25	4	12	200	45.96	130	25	29.53	197.0	2.459

جدول ۴. مشخصات هندسی بیلبردها و نتایج تحلیل برای ناحیه حومه شهر

Tale. 4. Geometrical characteristics of billboards and analysis results for suburban terrain

ارتفاع	ارتفاع پانل	عرض پانل	جرم واحد سطح پانل	سرعت باد	قطر ستون	ضخامت ستون	جابجایی پیشینه	تنش ماکزیمم	ضریب تندباد
h(m)	c (m)	b(m)	$m_u(kg/m^2)$	$V_H(m/s)$	D(cm)	t(mm)	$x_p(cm)$	$\sigma_s(Mpa)$	C_g
10	4	8	100	31.14	65	13	9.17	203.6	3.484
10	4	12	120	31.14	75	15	7.92	202.5	3.544
20	4	8	140	37.30	90	20	27.93	203.0	2.973
20	4	12	160	37.30	100	24	25.90	208.0	2.995
25	4	8	180	39.28	100	22	40.67	208.9	2.816
25	4	12	200	39.28	120	24	32.57	199.8	2.845

جدول ۵. مشخصات هندسی بیلبردها و نتایج تحلیل برای ناحیه شهری

Tale. 5. Geometrical characteristics of billboards and analysis results for city terrain

ارتفاع	ارتفاع پانل	عرض پانل	جرم واحد سطح پانل	سرعت باد	قطر ستون	ضخامت ستون	جابجایی پیشینه	تنش ماکزیمم	ضریب تندباد
h(m)	c (m)	b(m)	$m_u(kg/m^2)$	$V_H(m/s)$	D(cm)	t(mm)	$x_p(cm)$	$\sigma_s(Mpa)$	C_g
10	4	8	100	23.65	60	12	9.74	199.4	4.662
10	4	12	120	23.65	65	16	8.96	198.3	4.765
20	4	8	140	30.77	80	18	30.19	206.4	3.683
20	4	12	160	30.77	95	22	30.77	206.7	3.723
25	4	8	180	33.06	95	21	41.87	203.5	3.422
25	4	12	200	33.06	110	24	35.81	200.6	3.456

جدول (۵) نتایج را برای ناحیه شهری نشان می‌دهد. ضرایب تندباد در این ناحیه به مراتب بیشتر از مقدار مربوطه در دو ناحیه قبلی هستند و برای بیلبرد با ارتفاع ۱۰ متر به طور متوسط به عدد ۴/۷۱ می‌رسد که مقدار زیادی بوده و نشان می‌دهد پاسخ کل پیشینه در این حالت ۴/۷۱ برابر پاسخ استاتیکی است. مقدار متوسط ضریب تندباد در این ناحیه برای ۶ بیلبرد مورد نظر، ۵۱ درصد بیش از کمیت مربوطه برای ناحیه باز است. اگرچه مقادیر سرعت میانگین باد در ناحیه شهری کمتر از مقادیر مربوطه در ناحیه باز است، با این حال چون طراحی سازه بر اساس ضریب تندباد صورت می‌گیرد و در این روش، پاسخ استاتیکی سازه بر اساس سرعت میانگین باد در ناحیه مورد نظر محاسبه می‌شود، بایستی دقت و توجه کافی در تعیین ضریب بارگذاری تندباد بویژه در نواحی با زبری بالا صورت پذیرد تا سازه طراحی شده از مقاومت و ایمنی مطلوب برخوردار باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پاسخ استاتیکی و دینامیکی طولی باد برای بیلبردهای تک‌ستونی در نواحی مختلف با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس سیستم‌های چند درجه آزادی تعیین و ضریب بارگذاری تندباد برای حالات مختلف محاسبه شد. در ابتدا، پاسخ بیلبردی

به ارتفاع ۲۶/۵ متر و ابعاد صفحه ۴/۵ در ۷ متر که اطلاعات آن از یکی از مطالعات پیشین استخراج شده بود مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و در ادامه، بیلبردهایی با مشخصات هندسی و ناحیه قرارگیری مختلف فرض شدند و پاسخ آن‌ها محاسبه و تحلیل شد. نتایج کلی تحقیق برای سازه‌های مطالعه شده در ادامه بیان می‌شود.

برای بیلبرد ۲۶/۵ متری، در مرحله اول پاسخ سازه با فرض قرارگیری آن در ناحیه باز به‌ازای مقادیر مختلف سرعت مبنای باد بین صفر تا ۴۰ متر بر ثانیه محاسبه شد. تغییرات جابجایی‌های استاتیکی و دینامیکی سازه در مقابل سرعت مبنای باد، مشابه منحنی سهمی (با شیب افزایشی) بود و مقدار جابجایی استاتیکی و دینامیکی کل سازه برای سرعت مبنای ۴۰ متر بر ثانیه، به ترتیب ۲۳/۵۸ و ۵۶/۱۸ سانتیمتر و در نتیجه مقدار ضریب تندباد ۲/۳۸ به دست آمد. برای مقادیر بررسی شده سرعت باد، ضریب تندباد در محدوده ۲/۳ تا ۲/۴ تغییر داشت.

با توجه به سطح بادگیر زیاد و جرم نسبتاً کم بیلبردها، میرایی آیرودینامیکی خیلی بیشتر از میرایی سازه بود و نقش موثری در کاهش ارتعاشات سازه داشت و مقدار آن با افزایش سرعت باد بیشتر می‌شد. برای مثال، مقادیر میرایی آیرودینامیکی در ناحیه باز برای سرعت‌های مبنای ۳۰ و ۴۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۱۳/۵۲ و ۲۱/۸۹ درصد به دست آمد.

در حالات قرارگیری سازه در نواحی حومه شهر و شهری، جابجایی‌های بیلبرد و تنش خمشی ستون آن، به دلیل کاهش سرعت باد در مقایسه با ناحیه باز، کمتر بود. برای مثال به ازای سرعت مبنای باد ۴۰ متر بر ثانیه، جابجایی کل سازه در نواحی باز، حومه شهر و شهری به ترتیب ۵۶/۱۸، ۴۷/۱۹ و ۴۰/۲۴ سانتیمتر بود. با این وجود، ضریب تندباد در نواحی شهری و حومه شهر به دلیل بالا بودن زبری زمین، پایین بودن میرایی آیرودینامیکی و کم بودن سرعت میانگین باد، بیشتر می‌شد. برای سرعت مبنای ۴۰ متر بر ثانیه، مقادیر ضریب تندباد در نواحی باز، حومه شهر و شهری به ترتیب ۲/۳۸، ۲/۷۶ و ۳/۳۵ به دست آمد.

بیلبردهایی با ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۵ متری به صورت مفهومی برای نواحی مختلف با ابعاد صفحه ۴ در ۸ و ۴ در ۱۲ متر (نسبت‌های عرض به ارتفاع ۲ و ۳) و سرعت باد ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت طراحی شدند و نتایج تحلیل آن‌ها شامل ضریب تندباد در سرعت مبنای طراحی تعیین شد. برای بیلبردها با ارتفاع ثابت، اختلاف اندکی در ضریب تندباد مشاهده شد. برای نمونه در بیلبرد با ارتفاع ۱۰ متر، ضریب تندباد برای عرض پانل ۸ و ۱۲ متر در ناحیه باز به ترتیب ۲/۸۳ و ۲/۸۷ بود. در همه نواحی با کاهش ارتفاع بیلبرد، به دلیل افزایش زبری سطح و کاهش سرعت میانگین باد و میرایی آیرودینامیکی، ضریب تندباد افزایش داشت. ضریب تندباد میانگین برای ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۵ متری در ناحیه باز، به ترتیب ۲/۸۵، ۲/۵۴ و ۲/۴۵ تعیین شد.

برای نواحی حومه شهر و شهری، مقادیر ضریب تندباد در مقایسه با ناحیه باز بیشتر بود. این نتیجه به دلیل افزایش زبری زمین و آشفته‌گی باد و کاهش سرعت میانگین باد و به تبع آن کاهش میرایی آیرودینامیکی بود. مقدار میانگین ضریب تندباد برای نواحی باز، حومه شهر و شهری به ترتیب برابر ۲/۶۱، ۳/۱۱ و ۳/۹۵ بود. برای بیلبرد با ارتفاع ۱۰ متر در ناحیه شهری، مقدار ضریب تندباد به‌طور متوسط به عدد ۴/۷۱ رسید که عدد بالایی است و نشان می‌دهد پاسخ کل بیشینه سازه در این حالت، ۴/۷۱ برابر پاسخ استاتیکی است.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت، با توجه به اینکه طراحی سازه‌ها در برابر باد، با استفاده از روش‌های ساده شده‌ای از قبیل ضریب بارگذاری تندباد انجام می‌گیرد و از طرفی روابطی برای ضریب تندباد بیلبردها در اکثر آیین‌نامه‌ها از قبیل آیین‌نامه ایران ارائه نشده است، ممکن است طراحی این سازه‌ها با مقادیر فرضی و غیرواقع‌بینانه صورت پذیرد. بر اساس نتایج این تحقیق و با توجه به دامنه تغییرات زیاد برای ضریب مذکور و پیچیدگی آن، توصیه می‌شود در محاسبه و تعیین ضریب مذکور، به‌ویژه در نواحی با زبری بالا و ارتفاع کم بیلبرد، توجه و دقت کافی صورت پذیرد تا طراحی دست‌پایین نبوده و از مقاومت و ایمنی مطلوبی برخوردار باشد.

- [1] Z. Li, D. Wang, X. Chen, S. Liang, J. Li, Wind load effect of single-column-supported two-plate billboard structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179(2018), 70–79.
- [2] R. Salgado-Estrada, A. Galván, J.Y. Moreno-Martínez, E.A. Elvira-Hernández, F. Carpio, A.L. Herrera-May, Zamora S.A. Castro, I.E. Herrera-Díaz, Wind Vulnerability of Flexible Outdoor Single-Post Billboards, *Applied Sciences*, 13(10) (2023), 6197.
- [3] C. Paulotto, M. Ciampoli, G. Augusti, Wind tunnel evaluation of mean wind pressure on a frame-type signboard, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(5) (2006), 397–413.
- [4] J. Wen, Q. Xie, Field investigation and structural analysis of wind-induced collapse of outdoor single-post billboards, *Engineering Failure Analysis*, 117(2020), 104810.
- [5] Q. Zhu, S.K.F. Stoter, M. Heisel, C.E. French, M. Guala, L.E. Linderman, D. Schillinger, Reducing wind-induced vibrations of road sign structures through aerodynamic modifications: A computational pilot study for a practical example, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 199 (2020), 104132.
- [6] Y. Tamura, S. Cao, Climate change and wind-related disaster risk reduction, *Proceedings of the APCWE-VII*, (2009), Taipei, Taiwan.
- [7] D.Wang, X. Chen, J. Li, Wind load characteristics of large billboard structures with two-plate and three-plate configurations, *Wind and Structures*, 22(2016), 703–721.
- [8] C.W. Letchford, Wind loads on rectangular signboards and hoardings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(2) (2001), 135–151.
- [9] C.W. Letchford, J. D. Holmes, Wind loads on free-standing walls in turbulent boundary layers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51(1) (1994), 1–27.
- [10] P. Warnitchai, S. Sinthuwong, K. Poemsantitham, Wind Tunnel Model Tests of Large Billboards, *Advances in Structural Engineering*, 12(2009), 103–114.
- [11] D. Zuo, D.A. Smith, K.C. Mehta, Experimental study of wind loading of rectangular sign structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 130(2014), 62–74.
- [12] D.A. Smith, D. Zuo, K. C. Mehta, Characteristics of wind induced net force and torque on a rectangular sign measured in the field. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 133(2014), 80–91.
- [13] Z. Han, M. Gu, Wind-induced response and wind vibration coefficient of large single column-supported billboards. *Journal of vibration and shock*, 34(2015), 131–137 (in Chinese).
- [14] A.H. Bac, Safety Evaluation of Billboards According to Some Random Factors in the Southwest of Vietnam, *EasyChair* (2020).
- [15] Y. Zhang, Q. Yuan, W. He., Wind load characteristics of single column three-sided billboards on sloping terrain., *Proceedings of the 5th International Conference on Structural Seismic and Civil Engineering Research (ICSSCER 2023)*, (2023), 136–148.
- [16] A. Giannoulis, T. Stathopoulos, D. Briassoulis, A. Mistriotis, Wind loading on vertical panels with different permeabilities, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 107–108(2012), 1–16.
- [17] T. Stathopoulos, I. Zisis, E. Xypnitou, Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 125(2014),, 195–206.
- [18] Y. Masuyama, Y. Uematsu, O. Nakamura, Y. Okuda, Characteristics of local wind forces on the edges of signboards installed on the rooftops of buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206(2020), 104299.
- [19] M. Heisel, C. Daugherty, N. Finley, L. Linderman, D. Schillinger, C. E. French, M. Guala, Aerodynamics of highway sign structures: from laboratory tests and field monitoring to structural design guidelines, *Journal of Structural Engineering*, 146(11) (2020), 04020233.

- [20] Y. Zhou, T. Kijewski, A. Kareem, Along-Wind Load Effects on Tall Buildings: Comparative Study of Major International Codes and Standards, *Journal of Structural Engineering*, 128(6) (2002), 788-796.
- [21] D. K. Kwon, A. Kareem, Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings, *Engineering Structures*, 51(2013), 23–35.
- [22] H. Eimani kalehsar, N. Khodaie, Parametric study of the along-wind and across-wind responses of tall RC chimneys using the frequency domain analysis. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(2)(2017), 148–160.
- [23] N. Khodaie, H. Eimani kalehsar, Wind-induced vibration control of tall TV towers using a part of the main structure as a vibration absorber substructure. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Special2) (2019), 109–126.
- [24] A. Tamura, A. Kareem, *Advanced Structural Wind Engineering*, Springer, Japan, 2013.
- [25] Housing and Urban Development, Tehran, Iran. MHUD, Iranian national building code (Part 6): Applied loads on buildings, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran, 2019 (In Persian).
- [26] E. Simiu, R. H. Scanlan. *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*. 3rd Ed. New York: John Wiley, 1996.
- [27] T. Balendra, *Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads*, Springer Verlag, Department of Civil Engineering National University of Singapore, 1993.
- [28] G. Solari, Gust buffeting. II: Dynamic alongwind response, *Journal of Structural Engineering*. 119(1993), 383-398.
- [29] B.J. Vickery, On the reliability of gust loading factors. *Proc., Technical Meeting Concerning Wind Loads on Buildings and Structures*, 30(1970), 296–312.

Along-wind dynamic analysis and determination of gust loading factor (GLF) for large single-column billboards

Nahmat khodaie¹

¹Assistant Professor, Islamic Azad University, Khormuj Branch, Khormuj, Iran

ABSTRACT

The effective role of billboards for advertising has led to the expansion of their use in open spaces and public places. The large panel area and light weight have made billboards sensitive to wind, and many cases of their damage have been reported recently. The design of structures against wind force is generally done with the gust loading factor (GLF) method. However, this method is specific to tall structures in most codes and standards, and there are no relations for billboards. In this research, the along-wind responses and the GLF have been calculated for large single-column billboards using frequency domain analysis of MDOF models using MATLAB software. First, an example of a tall billboard was presented and the responses of the structure and the GLF were determined for it, and the effect of basic wind speed and area roughness on the GLF was investigated. Then, billboards with different geometric specifications were designed and analyzed against wind load. According to the results, aerodynamic damping was one of the important factors limiting vibration, especially in rough areas. The GLF increased with the decrease of structure's height and increase of ground roughness, in such a way that it reached 4.71 for the urban area and 10 meters high billboard, which indicates the high importance of vibrations of billboard is in this situation. Due to the high dynamic response, the safe and resistant design of these structures requires the accurate determination of the GLF.

KEYWORDS

Gust loading factor, Along-wind response, Large billboards, Aerodynamic damping, Frequency domain analysis

¹ Corresponding Author: Email: Nahmat.khodaie@iau.ac.ir