تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۰۲/۱۹
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۰/۰۸/۱۸

علی‌اکبر حیدری [۱]، محمد فرخ‌زاد [۲]

سازه‌های هوای فشرده یا سازه‌های بادی

چکیده

آشنایی با انواع سیستم‌های سازه‌ای، امروزه جزو ضروریات دانشجویان و مهندسان معماری و عمران محسوب می‌شود. تنوع موضوعات ساخت‌وساز و دسترسی به تکنولوژی‌های جدید به معماران کمک کرده است تا بتوانند در طرح بناهای جدید، بسیار خلاقانه عمل کنند. یکی از گونه‌های خاص سیستم‌های سازه‌ای که چندی است در احداث بناهای موقت و سریع‌الاجرا مورد استفاده قرار می‌گیرد، سازه‌های موسوم به هوای فشرده یا سازه‌های بادی است. این سازه‌ها پس از طراحی و ساخت، به سادگی حمل می‌گردند و در محل برپایی باد می‌شوند؛ و به همین خاطر می‌توان از آنها به کرّات استفاده کرد. در این مقاله کوشش بر آن است که به انواع این سازه‌ها اشاره شود و پس از بیان نظام سازه‌ای انتقال بار آنها، مزایا و معایب هرکدام تشریح گردد و مصالح و شیوه‌های ساخت آنها مورد بحث قرار گیرد. دیگر اینکه تلاش بر بیان چگونگی رفتار سازه‌ای و عوامل مؤثر در نیروهای وارد بر سازه است و توضیح نقاط قوت آنها در عکس‌العمل پایداری نسبت به زمین لرزه. در پایان نیز برخی از نمونه‌های واقعی ساخته‌شده به‌همراه تصاویر آنها آورده می‌شود. نتیجه تحقیق نشان می‌دهد که این سازه‌ها مزیت‌های بسیاری دارند، که از آن جمله‌اند چندمنظوره بودن، سبکی، زمان و هزینه کم استقرار برای بهره‌برداری و جز اینها؛ لیکن اینها محدودیت‌هایی نیز دارند، همچون ضعیف بودن در برابر بارهای واردشونده، کاربرد محدود و نیز محدودیت استفاده در طرح‌های معماری گوناگون و نظایر اینها. همچنین این سازه‌ها به دلیل ویژگی‌هایی که دارند، برای استفاده در مکان‌های ورزشی، مکان‌های صنعتی، کاربردهای نظامی و دیگر مواردی چون نمایشگاه‌ها، همایش‌ها، ایستگاه‌های خدمات‌رسانی بین‌راهی و کمپ‌های پزشکی، مناسب می‌نمایند.

کلیدواژه‌ها: سیستم‌های سازه‌ای، سازه‌های نیوماتیکی، سازه‌های هوای فشرده، سازه‌های کششی.

[۱] استادیار دانشگاه هنر تهران، استان تهران، شهر تهران
E-mail: amirali11084@yahoo.com

[۲] استادیار دانشگاه گلستان، استان گلستان، شهر گرگان (نویسنده مسئول)
E-mail: m.farrokhzad@gu.ac.ir

www.art.ac.ir Art University Journals

مقدمه

تکنولوژی‌های امروزی، روش‌های گوناگون ساخت را در احداث بناها در اختیار معماران قرار داده‌اند. تحلیل صحیح نیروهای ایجادشده در سازه‌ها از یک سو و آشنایی با ویژگی‌های مصالح امروزی از سوی دیگر، به معماران و مهندسان ساختمان کمک می‌کند تا به این شیوه‌های جدید ساخت دست یابند. یکی از این سازه‌ها که روزآمدتر و تازه‌تر از دیگر انواع آن‌اند سازه‌های بادی یا اصطلاحاً نیوماتیکی[1] هستند. ما در زندگی روزمره با برخی از سازه‌های بادی سروکار می‌یابیم که از جمله آنها می‌توان به بادکنک، بالن، لاستیک وسایل نقلیه، انواع تشک‌های بادی و بسیاری دیگر اشاره کرد. سازه‌های هوای فشرده دارای پوسته‌هایی هستند که از داخل با هوای پرشده تنظیم گردیده‌اند. «سازهٔ هوای فشرده پوسته‌ای نرم است که حجم درونی آن با هوای طبیعی تغذیه می‌شود که خود آن هم از طریق تجهیزاتی چون فن‌ها، دمنده‌ها و کمپرسورها به درون آن پمپ می‌شود. این هوای دمیده‌شده، پایداری و مقاومت سازه را در برابر بارهای بیرونی تأمین می‌کند» (Ermolov, 2010). بنابراین انتقال بار در این سازه‌ها از طریق همین پوسته‌ها انجام می‌گیرد. هوای درون پوسته‌های یاد شده، از داخل به بدنهٔ آنها نیرو وارد می‌کند و در نتیجه پوستهٔ این سازه‌ها همیشه تحت تأثیر نیروهای کششی سطحی قرار دارند.

چگونگی عملکرد نیروهای درونی این سازه‌ها بر اصل مشخصی استوار است: «فشار هوا بار یکنواخت گسترده‌ای را که عمود بر هر نقطه از پوسته است بر آن وارد می‌کند» (مور، ۱۳۸٤). در واقع یکنواختی این بار ناشی از فشار هوا به پایداری و ایستایی سازه‌های بادی کمک می‌کند و فرم بیرونی آنها را طی گذشت زمان ثابت نگه می‌دارد. فرم ایستای سازه‌های متکی بر باد زمانی شکل می‌گیرد که فشار هوای درون آنها اندکی افزون‌تر از فشار اتمسفر طبیعی بیرون باشد. این اختلاف فشار فقط در حدی است که فرم خاص پیش‌بینی شده برای آن ایجاد گردد و به همین خاطر افزایش فشار مورد بحث مذکور نامحسوس است و هیچ‌گونه ناراحتی برای افرادی که درون آن حضور دارند، ایجاد نمی‌کند (Langmead & Garnaut, 2001).

«سازه‌های هوای فشرده را نخستین بار مهندسی امریکایی به نام والتر بِرد[2] در سال ۱۹٤٦ به منظور ساخت فضای مسکونیِ بنا یا سازه‌ای برای آنتن رادار طراحی و اجرا کرد. امروزه در پی سازهٔ مذکور این نوع سازه‌ها در بسیاری از کشورها رواج یافته‌اند» (Ermolov, 2010). از اوایل سال‌های دههٔ ۷۰ میلادی مقوله طراحی و ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های هوای فشرده، مورد توجه جدّی عموم قرار گرفت. برپایی نمایشگاه موسوم به اکسپو ۱۹۷۰ در اوزاکای ژاپن، موجبات گردهمایی شرکت‌های فعال در این زمینه را فراهم ساخت. غرفهٔ شرکت فوجی، تئاتر شناور و غرفهٔ امریکا در این نمایشگاه از نخستین دستاوردهای قرار گرفته در معرض بینندگان این نمایشگاه بود. غرفهٔ ایالات متحد امریکا در این نمایشگاه به‌صورت سازه‌ای چادری و متکی بر باد طراحی شده بود که ۱٤۲ متر طول و ۸۱ متر عرض داشت (Langmead & Garnaut, 2001).

هرچند پیشنهاد نخستین نمونه از سازه‌های متکی بر باد به پیش از جنگ جهانی دوم یعنی سال ۱۹۱۷ م. برمی‌گردد، اما تاریخچهٔ ساخت نخستین نمونه‌های موفق همانا نیمهٔ دوم قرن بیستم است (Dent, 1972). با توجه به دوام بسیاری از نمونه‌های ساخته‌شده در دهه‌های گذشته، به‌جرئت می‌توان گفت که عمر مفید این سازه‌ها ـ برخلاف وضعیت ظاهری‌شان ـ به ۳۰ سال نیز می‌رسد و همین طولانی بودن مدت کارکرد، آنها را در زمرهٔ سازه‌های ماندگار و قابل اعتماد برای پوشش فضاهای بزرگ با عملکرد یکپارچه قرار داده است. وزن اندک مصالح به کار رفته در این سازه‌ها که حتی به یک‌سوم نمونه‌های مشابه در ساختمان‌های متداول نیز می‌رسد (Vandenberg, 1996)، دوام

www.art.ac.ir Art University Journals

و ماندگاری آنها را در برابر بارهای مرده افزایش می‌دهد و به‌دلیل جرم پایین اجزای تشکیل‌دهنده، در صورت وارد شدن انرژی زمین‌لرزه، نیرویی مختصر به آنها تأثیر می‌نهد. به همین دلیل است که هنوز در این سازه‌ها، تخریبی ناشی از زمین‌لرزه گزارش نشده است.

روش تحقیق

مقالهٔ حاضر حاصل جانبی طرحی پژوهشی با عنوان «راهنمای انتخاب سیستم سازه در طرح‌های معماری برای دانشجویان» است که با همکاری معاونت پژوهشی دانشگاه هنر به انجام رسیده است. مبنای این پژوهش مطالعات کتابخانه‌ای و جمع‌آوری روش‌های طراحی سیستم‌های سازه بود که پژوهشگران گوناگونی به آنها پرداخته بودند. در این میان سازه‌های بادی بیش از آنهای دیگر علاقهٔ مؤلفان را جلب کردند و آنان با جست‌وجویی در مقالات و متون لاتین، توانستند به تاریخچهٔ ساخت و توسعه و نیز اقدامات کنونی در احداث این سازه‌ها دست یابند. به علاوه، شرکت ایرانی فندوله نیز به عنوان بانی ساخت این نوع سازه‌ها در کشور توجه را جلب کرد و نمونه کارهای اجراشدهٔ آن مورد بازدید قرار گرفت. تحلیل‌ها، طبقه‌بندی موضوعات و جمع‌بندی نهایی علمی را نیز نگارندگان انجام دادند.

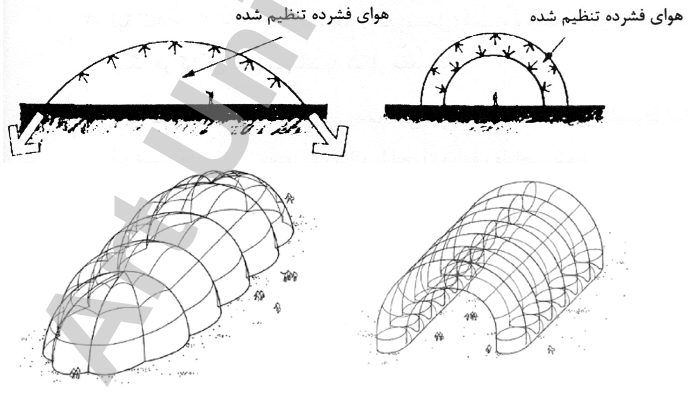
پیشینه تحقیق

تاکنون کتاب‌هایی به منظور ارتقای سطح دانش فنی و سازه‌ای دانشجویان مهندسی معماری و عمران تألیف و تدوین یا ترجمه شده‌اند که در این میان بایسته است از استادان گرامی در این زمینه تقدیر گردد. این کتاب‌ها می‌توانند دانشجویان را با فرم‌های متداول ساختمانی، سیستم‌های سازه‌ای در ساخت‌وسازها، درک عمومی رفتار سازه‌ها و تعامل سازه و معماری آشنا سازند.

انواع سازه‌های هوای فشرده

سازه‌های بادی یا هوای فشرده به دو گروه تقسیم می‌شوند (Ermolov, 2010):

۱. سازه‌های متکی بر هوا[۳]؛ و
۲. سازه‌های محصور بادشده (پر شده از هوا)[٤].



الف) نوع سازه پرشده از هوا　　ب) نوع سازه متکی بر هوا

شکل ۱. سازه‌های هوای فشرده

منبع: مور، ۱۳۸٤ و Wouters, 2009

www.art.ac.ir Art University Journals

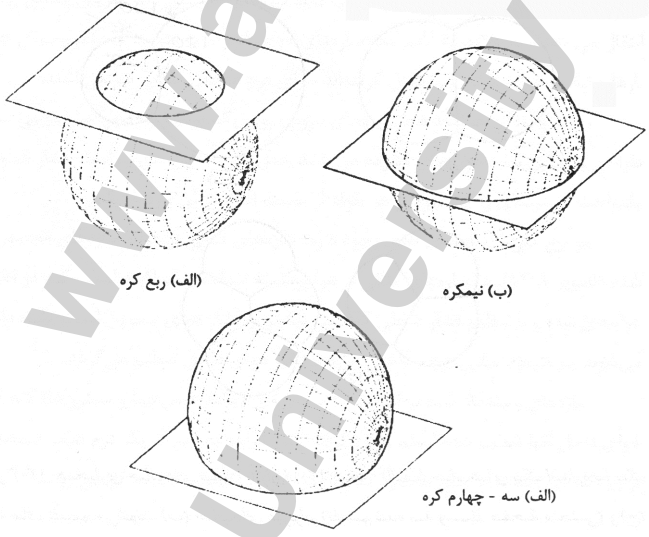
سازه‌های متکی بر هوا

سازه‌های متکی بر هوا دارای بدنه و سقفی یک‌لایه‌اند که در تمام لبه‌های بیرونی‌شان هوابندی و درزبندی شده است. بنابراین لازم است به هنگام نصب این نوع از سازه‌های بادی، لبه‌های پوستهٔ آنها کاملاً محکم به فونداسیون پیرامونی متصل گردند (Ermolov, 2010). درون این سازه فشار هوا کمی بیشتر از فشار هوای بیرون است و به‌طور یکنواخت تنظیم می‌گردد و درنتیجه فرم کلی و نیز حجم داخلی و ایستایی این سا زه را فشار هوای داخل آن تأمین می‌کند. جریان هوای درون این سازه‌ها باید کنترل شود و حجم هوای داخل باید ثابت بماند تا دوام سازه تضمین گردد.

فشار هوای درون این سازه‌ها کمتر از نوع محصور بادشده است، به گونه‌ای که فشار اضافی تأمین‌شده درون آن در حدود ۰/۱ تا ۱ kN/m^2 تنظیم می‌شود (Otto & Trostel, 1967).

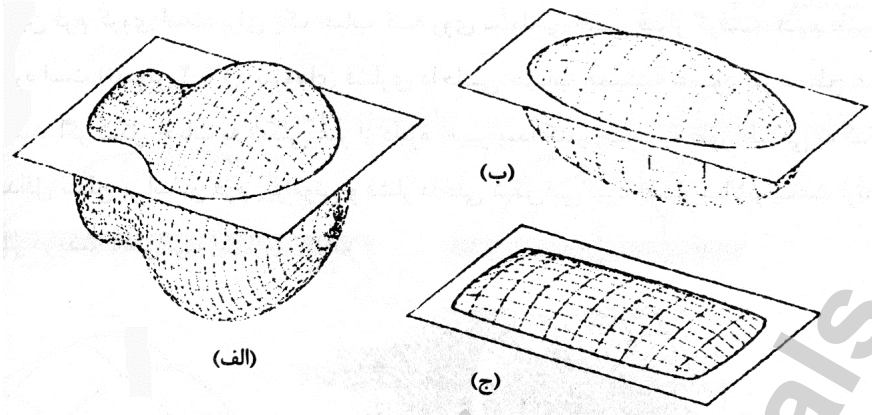
سازه‌های متکی بر هوا را می‌توان به شکل‌های گوناگون طراحی کرد. به هر حال شکل سازه دست‌کم از یک سو باید محدب باشد. انواع شکل‌هایی را که برای این سازه‌ها طراحی می‌شوند، می‌توان چنین برشمرد:

۱. بخشی از یک کره (نیم‌کره، ربع کره، سه‌چهارم کره)؛
۲. فرم زین اسبی (که از یک سمت محدب است و از سمت دیگر مقعر)؛
۳. فرم‌های محدب حاصل از دوران فرمی خطی حول یک خطاند؛ و
٤. شکل‌های محیطی زاویه‌دار (مثل مستطیل) با گوشه‌های مدوّر.



شکل ۲. فرم‌هایی از کره که می‌توانند سازه‌هایی متکی بر هوا باشند
منبع: مور، ۱۳۸٤

www.art.ac.ir Art University Journals



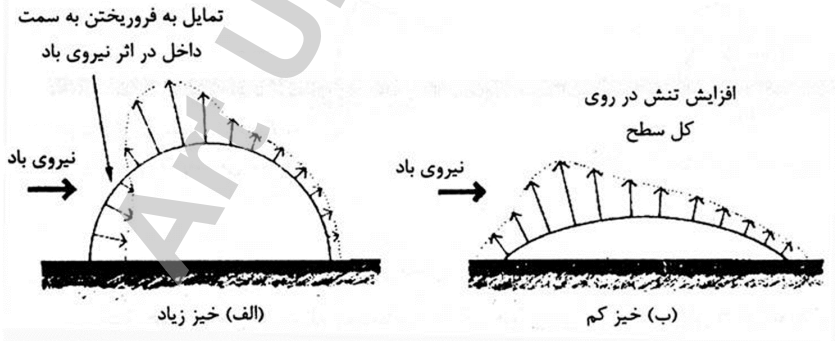
شکل ۳. دیگر فرم‌های تشکیل‌دهندهٔ سازه‌های بادی
الف) فرم زین اسبی؛ ب) فرم منحنی حاصل از دوران شکل دوبعدی؛ و ج) شکل زاویه‌دار با گوشه‌های محدب
منبع: مور، ۱۳۸٤

بارهای وارد بر سازه‌های متکی بر هوا را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد:

۱- **بارهای مرده:** این بارها شامل وزن پوسته و گاه بارهای دائمی معلق از پوسته‌اند؛ اما از آنجا که جنس اصلی ساخت این سازه‌ها، پوستهٔ انعطاف‌پذیری چون پارچه است، به دلیل سبکی آن در مقایسه با دیگر بارها چشم‌پوشیدنی است؛ لکن در صورتی که از مواد مقاوم‌تری ساخته شود به جهت سنگینی، می‌تواند در محاسبات در نظر گرفته شود.

۲- **بارهای زنده:** این بارها مشتمل‌اند بر بار برف، باران، باد و بارهای موقت وارد بر سازهٔ بادی. تجمع برف به عنوان بار گستردهٔ یکنواخت بر سطح پوسته، به‌ویژه هنگامی که خیز منحنی در دهانه‌های بزرگ کم باشد، موجب تغییرشکل‌های نامتقارن و پیش‌بینی‌ناپذیر در این سازه‌ها می‌شود.

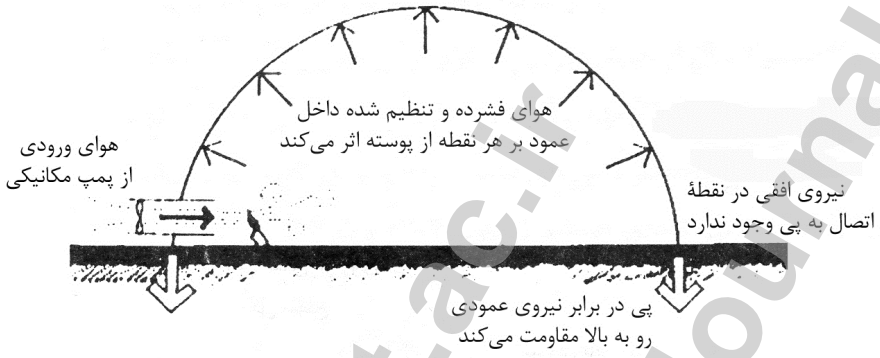
بار ناشی از باد نیز در این سازه‌ها اهمیت دارد. در سازه‌های بادی با شیب زیاد، سطح مقابل باد در معرض فشاری معکوس (فشار هوای داخلی) قرار می‌گیرد و به همین خاطر فشار داخلی باید به اندازهٔ کافی برای مقاومت در برابر نیروی وارد از باد بزرگ باشد. در سازه‌های دارای شیب کم، «هوا به هنگام عبور از روی سازه سرعت می‌گیرد و دامنهٔ آئرودینامیکی زیادی تولید می‌کند. در نتیجه مکش در بالای پوسته به فشار تکیه‌گاهی در پایین اضافه می‌شود و کشش [سطحی] در آن افزایش می‌یابد» (مور، ۱۳۸٤).



شکل ۴. تأثیر باد بر سازه‌های متکی بر هوا
منبع: مور، ۱۳۸٤

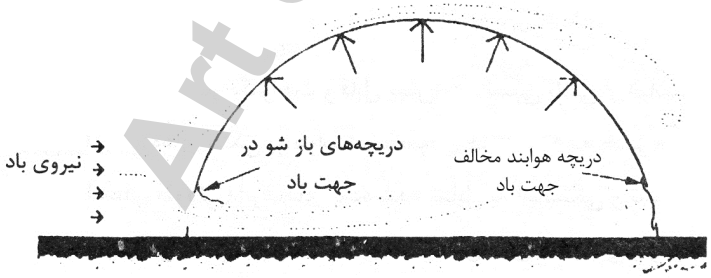
www.art.ac.ir Art University Journals

۳- بارهای ناشی از فشار هوا: این بارها که برای حفظ شکل بیرونی سازه و نگه داشتن آن در کشش ایجاد می‌گردند، به طور یکنواخت و عمود به سطح داخلی پوسته، به آن وارد می‌شوند. این بارها به دلیل سبکی سازهٔ مذکور تقریباً کم‌اند. فشار هوای داخل، یا به وسیلهٔ پمپ‌های مکانیکی هوا تأمین می‌شود (که برای جبران اتلاف هوا محاسبه می‌گردند) و یا با استفاده از نیروی باد طبیعی به وجود می‌آید (که به دلیل تغییر سرعت باد عموماً غیرعملی است) و یا با ایجاد تفاوت دمای بیرون و درون به‌دست می‌آید که در این حالت هوای درون را سبک‌تر می‌کنند (اختلاف دما نیز باید به تناسب زیاد باشد).



شکل ۵. تأمین فشار هوای درون سازهٔ بادی با استفاده از پمپ مکانیکی
منبع: مور، ۱۳۸٤

شکل ۶. نمونهٔ پمپ‌های مکانیکی نصب‌شده قبل از اجرای سازهٔ متکی بر باد،
منبع: بروشور شرکت فندوله



شکل ۷. استفاده از نیروی طبیعی باد برای تأمین فشار هوای درون سازهٔ بادی
منبع: مور، ۱۳۸٤

www.art.ac.ir Art University Journals

مسائل اجرایی

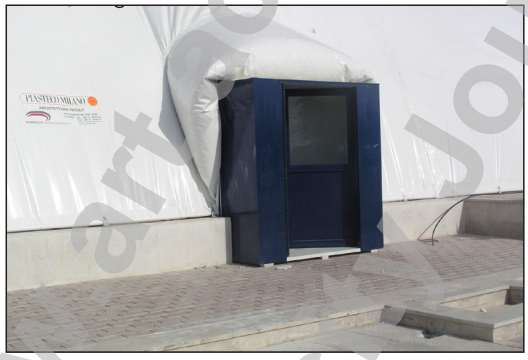
طراحی و اجرای سازه‌های بادی متکی بر هوا با مسائل گوناگونی مواجه است که برخی از آنها از این دست‌اند:

۱- حل مشکل بازشوهای دسترسی

«مشکل اساسی در سازه‌های متکی به هوا، تأمین دسترسی‌ها به فضاهای داخلی در عین ثابت نگه داشتن فشار داخلی است. در هنگام تردد استفاده‌کنندگان و ازدحام آنها، درها معمولاً مدام باز هستند و در نتیجه میزان اتلاف هوا زیاد خواهد بود» (مور، ۱۳۸٤).

به‌منظور حل مشکل بازشوها معمولاً این روش‌ها پیشنهاد می‌شوند:

الف) به کارگیری قفل‌های هوایی[۵] یا راهروهایی با دو مجموعه در، که در هنگام تردد، همیشه فقط یکی از آنها باز است. این شیوه، گاه در جاهایی که دسترسی به وسایل نقلیه مورد نیاز وجود داشته باشد، به‌صورت درهای مضاعف به کار گرفته می‌شود.



شکل ۸. دسترسی به درون سازهٔ متکی بر هوا با استفاده از قفل هوایی

منبع: بروشور شرکت فندوله

ب) استفاده از دمنده‌های هوایی یا پمپ‌های مکانیکی تولید هوا که در دو سوی در ورودی نصب می‌شوند و با ایجاد جریان شدید هوا جلوی تبادل هوا را می‌گیرند.

ج) درهای چرخان که هوای داخل را همواره به‌خوبی کنترل می‌کنند.

د) درهای بالشی که از باد پر می‌شوند و تمام درزهای اطراف چارچوب و بازشو را می‌پوشانند.

مهار و هوابندی کردن لبه‌های درهای به کار رفته در ساختار اصلی سازهٔ بادی اهمیت ویژه‌ای دارد (Wahl, 2007). پیش‌بینی مکان در ورودی همیشه از قبل صورت می‌گیرد، و در پیش از باد کردن سازه نصب می‌شود و لبه‌های آن کاملاً درزبندی می‌گردد.

۲- کنترل افت فشار

کاهش فشار هوای داخل به سه دلیل رخ می‌دهد:

الف) افت فشار بر اثر شکاف یا بریدگی در سقف (البته شکاف‌های عمودی معمولاً چندان بزرگ نیستند و به‌راحتی تعمیر می‌شوند)؛

ب) افت فشار بر اثر عملکرد نادرست وسایل مکانیکی یا قطع برق (که این مشکل با استفاده از پمپ‌های مکانیکی یدکی و ژنراتورهای الکتریکی اضطراری حل می‌شود)؛ و

www.art.ac.ir Art University Journals

ج) فرو ریختن سازه بر اثر وزن برف، به‌دلیل خرابی و نقص در سیستم دستگاه‌های برف‌روب یا ذوب برف.

در مواردی که در ادامه ذکر می‌گردند، سازهٔ بادی بر اثر وزن برف فرو ریخته است:

میناپولیس متروداِم در سال‌های ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲، گنبد داکوتا در ورمیلیون داکوتای جنوبی در سال ۱۹۸۲، گنبد نقره‌ای در پونتیاک ماساچوست در سال ۱۹۸۵.

به طور کلی به منظور تأمین فشار داخلی این سازه‌ها، سه نوع موتور صنعتی به کار گرفته می‌شود:

الف- موتور دمندهٔ هوا؛

ب- موتور تعادل فشار هوای داخل سازه؛ و

ج- موتور ذخیره برای مواقع قطع برق و شرایط اضطراری.

موتور دمندهٔ هوا برای برپایی ابتدایی سازه و پایداری نهایی و دائمی آن به‌کار گرفته می‌شود.

مزایای موتورهای بهینه‌سازی‌شدهٔ امروز را می‌توان چنین برشمرد:

۱- مصرف کم انرژی؛

۲- ایجاد نکردن آلودگی صوتی؛

۳- قابلیت فعالیت با سوخت‌های مختلف بر اساس نیاز منطقه یا بهره‌برداران؛

٤- کاهش حجم فشار بالای هوا تا ۷۵ درصد؛

۵- قابلیت ایجاد گرمایش داخلی به میزان دست‌کم ۲۵ درجه سانتیگراد؛

٦- نیاز نداشتن به فن پرصدا؛ و

۷- فعالیت خودکار به هنگام افت فشار در سازه.

موتور تعادل فشار هوای سازه برای کمک به حفظ تعادل و پایداری آن در شرایط اضطراری مانند جبران پرت هوا و مواقعی که سازه دچار حوادث فیزیکی می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت این موتور همانند موتور دمنده هوا عمل می‌کند ولی به‌صورت کمکی و در شرایط اضطراری از آن استفاده می‌شود. موتور ذخیره برق برای مواقع قطع برق و نوسان‌های شدید برای برپایی سازه و تعادل فشار هوای داخل و تأمین اکسیژن و نور لازم به کار می‌رود.

۳- هزینه‌های دوران بهره‌برداری

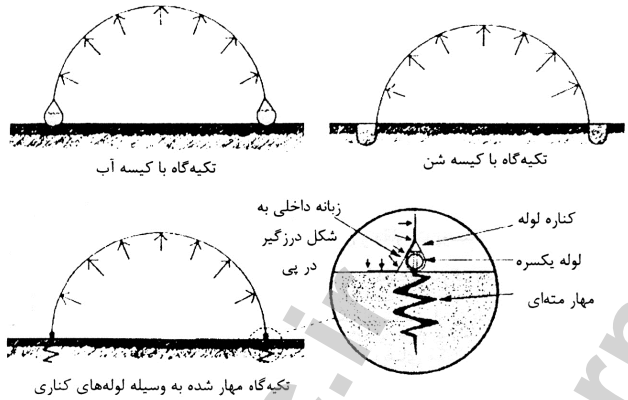
«از اواسط دههٔ ۱۹۷۰، هزینه‌های مصرف انرژی مربوط به تنظیم فشار هوای داخل سقف و به‌خصوص ذوب برف، افزایشی نامتناسب با هزینه‌های ساخت یافته‌اند. به علاوه، دستمزد افراد تعمیرکار و عملیات مرتبط همواره بیشتر از میزان پیش‌بینی شده است. در نتیجه عوامل ذکرشده و لزوم جابه‌جایی و تعمیر پوستهٔ سقف پس از عمر مفید آن (۲۰ سال)، هزینهٔ دوران بهره‌برداری برای دهانه‌های بزرگ در سقف‌های متکی به هوا معمولاً بیشتر از میزانی که انتظار می‌رفته، بوده است» (Hamilton, 1994).

۴- مهار کردن (طراحی و اجرای تکیه‌گاه)

در سازه‌های بادی رانش داخلی ناشی از نیروی کششی پوستهٔ سازه به وجود می‌آید که تابعی از دهانه است و نسبت عکس با خیزِ آن دارد. «علاوه بر نیروی رانشی جانبی، در تمامی سازه‌های متکی بر هوا، نیرویی برابر با حاصل‌ضرب سطح اتکای آنها بر روی زمین در فشار داخلی سازه وجود دارد» (مور، ۱۳۸٤).

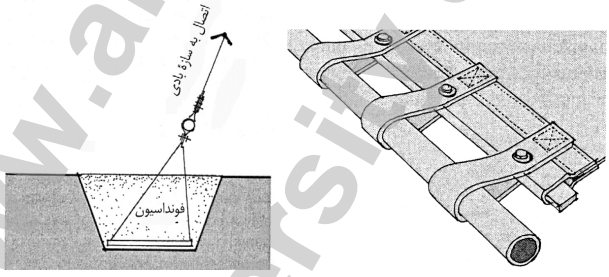
www.art.ac.ir Art University Journals

به‌منظور حل این نیروها در سازه‌های کوچک لبه‌های پیرامونی پوسته در درون زمین مهار می‌شوند و در سازه‌های بزرگ‌تر، حلقه‌ای فشاری که معمولاً از بتن مسلح ساخته می‌شود برای این لبه به کار می‌رود.



شکل ۹. روش‌های اتصال سازه‌های متکی بر هوا به زمین (اجرای تکیه‌گاه)
منبع: مور، ۱۳۸٤

گاه لبهٔ پیرامونی این سازه‌ها به دور یک کابل یا عنصر فلزیِ کششی می‌چرخد و مهار می‌شود. سپس این کابل به فونداسیونِ قرارگرفته در داخل زمین متصل می‌گردد (Wahl, 2007).



شکل ۱۰. چگونگی اتصال لبهٔ بیرونی سازهٔ متکی بر هوا و مهار درون زمین
منبع: Wahl, 2007

باید توجه داشت که همیشه پیش از اجرای نهایی و باد کردن سازهٔ متکی به هوا، لبه‌های بیرونی و کلیهٔ درزها مهار می‌شوند و سازه بر تکیه‌گاه پیش‌بینی شده استقرار می‌یابد.

شکل ۱۱. سازهٔ متکی بر هوا که پیش از اجرا، در نقاط پیرامونی مهار شده است
منبع: بروشور شرکت فندوله ـ با توضیحات اضافی

www.art.ac.ir Art University Journals

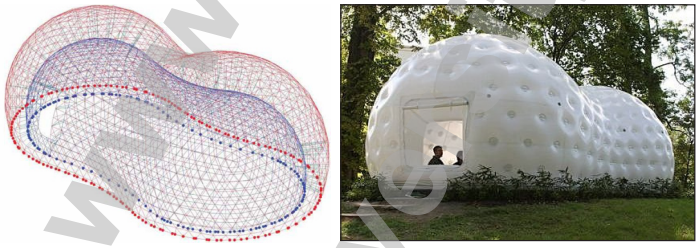
سازه‌های بادی پر شده از هوا

سازه‌های محصور بادشده یا پرشده از هوا بر پایهٔ عناصر سازه‌ای اولیه همچون قوس‌ها و ستون‌ها ـ که درون‌شان فشار هوا تنظیم شده است ـ شکل می‌گیرند. «بنابراین به صورت فرمی صلب‌اند که برای نگاه‌داری فضای داخلی محصور که هوای درون آن ثابت نیست به کار می‌روند.» (مور، ۱۳۸٤). از آنجا که عناصر اصلی تشکیل‌دهندهٔ این سازه‌ها خود از هوا پر شده‌اند، نیازی به کنترل و حفظ فشار هوا در درون فضاهای اصلی ساخته‌شده با این نوع سازه‌ها نیست.

فشار هوای درون سازه‌ها، بیشتر از فشار هوای نسبت به نوع متکی بر هواست؛ به گونه‌ای که فشار اضافی تأمین‌شدهٔ درون آن در حدود ۳۰ تا ۷۰۰ kN/m2 تنظیم می‌شود (Ermolov, 2010).

«بر خلاف سازه‌های متکی بر هوا که فشار در آنها تمامی حجم داخلی را تنظیم می‌کند، سازه‌های پرشده از هوا، اجزای سازه‌ای پرشده از هوا را (همچون قوس، تیر، دیوار و ستون) یکی می‌کنند و این اجزا برای ایجاد شکل محصور ساختمان به کار می‌روند. فقط اجزا هستند که فشار تنظیم‌شده‌ای در خود دارند؛ و حجم داخلی چنین نیست» (مور، ۱۳۸٤). حجم داخلی نیاز به کنترل دائمی افت فشار ندارد و به همین خاطر موجب کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود. بدین ترتیب، مزایای این سازه‌ها را در مقایسه با سازه‌های متکی بر هوا می‌توان چنین برشمرد:

۱. عدم نیاز به موتورهای دائمی تنظیم هوا و کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های دوران بهره‌برداری؛
۲. حذف هوابندی‌های مورد نیاز در لبه‌های پیرامونی و دسترسی‌ها؛
۳. در صورت خالی شدن یکی از اجزای پرشده از هوا، بخش‌های مجاور مقاومت لازم را برای جلوگیری از انهدام ساختمان خواهند داشت.



شکل ۱۲. نمونه‌ای از سازه‌های محصور باد شده
منبع: Wouters, 2009

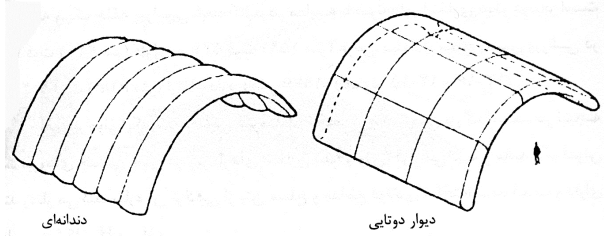
سازه‌های پرشده از هوا به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۱- سازه‌های دندانه‌ای پرشده از هوا[۶]: این سازه‌ها مجموعه‌ای از لوله‌های ـ معمولاً قوسی شکل ـ پر از هوا هستند که فضای درونی را به وسیلهٔ یک طاق یا گنبد محصور می‌سازند.

۲- سازه‌های دارای دیوارهٔ دوجداره[۷] : این گونه از سازه‌ها دیوارهٔ دوجداره‌ای شامل پوسته‌های موازی دارند و دیافراگم داخلی این دو لایه از هوا پرشده است و این‌گونه فشار آن تنظیم می‌شود.

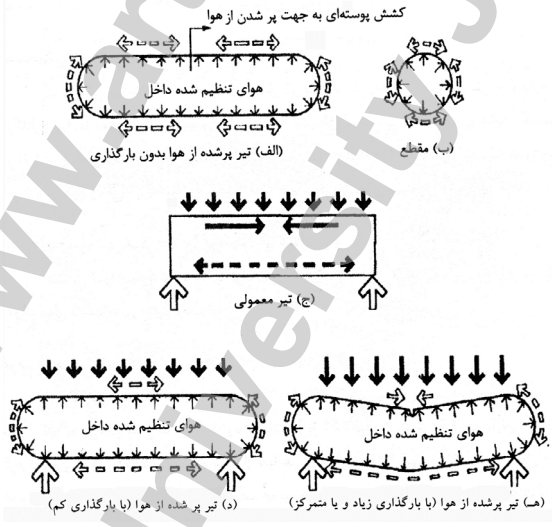
همچنین می‌توان این نوع از سازه‌ها را با عناصر دیگر سازه‌ای چون کابل‌های پیش‌تنیده، شبکه‌های فولادی، کابل‌های کششی و پوسته‌های بتنی ترکیب کرد و عملکرد چندگانه استاتیکی آنها را به‌دست آورد (Ermolov, 2010).

www.art.ac.ir Art University Journals



شکل ۱۳. انواع سازه‌های پرشده از هوا
منبع: مور، ۱۳۸٤

در سازه‌های پرشده از هوا ـ بر خلاف سازه‌های متکی بر هواـ باید فشار هوای درون اجزا بسیار زیاد باشد. این اجزا (مثلاً یک تیر) با ایجاد فشار هوای داخلی در تمامی پوستهٔ بیرونی تحت کشش قرار می‌گیرند در حالی که پس از بارگذاری و ایجاد خمش بخش فوقانی تحت فشار سطحی قرار می‌گیرد و بخش تحتانی از کشش مضاعف سطحی تأثیر می‌پذیرد. فشار هوای داخل باید آن قدر بالا باشد که بتواند فشار سطحی ناشی از خمش را مهار کند؛ وگر نه سازه به سرعت فرو می‌ریزد؛ در واقع «بر خلاف تیرهای معمولی که قبل از ریزش کامل دچار شکست می‌گردند، اعضای پرشده از هوا به یک‌باره فرو می‌ریزند» (مور، ۱۳۸٤).



شکل ۱۴. تیرهای پرشده از هوا و نظام نیروهای سازه‌ای
منبع: مور، ۱۳۸٤

در سازه‌های پرشده از هوا هر چه ارتفاع تیرهای هوایی بیشتر باشد، کشش طولی فشار القایی فزونی می‌گیرد و فشار القایی خمشی کاهش می‌یابد. همچنین باید توجه کرد که حتی‌الامکان بارگذاری به صورت متمرکز بر این سازه‌ها اعمال نشود، زیرا ممکن است دچار شکست ناحیه‌ای و کاهش موضعی ارتفاع مؤثر عضو سازه‌ای گردد.

گسیختگی پوستهٔ این سازه‌ها ممکن است به این دلایل رخ دهد:

۱- کشش بیش از حد؛

۲- فشار بیش از اندازه؛

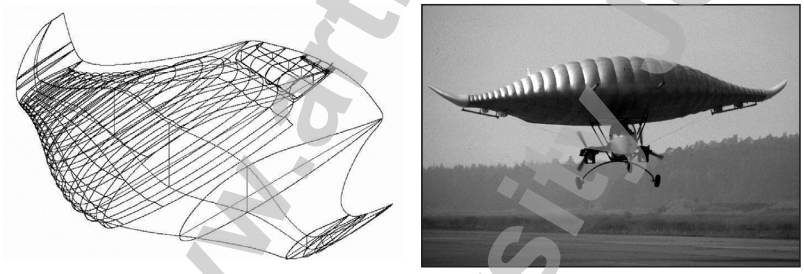
www.art.ac.ir Art University Journals

۳- بارگذاری مفرط روی اجزا؛
٤- نور خورشید؛ و
٥- فرسودگی مصالح.

مصالح ساخت

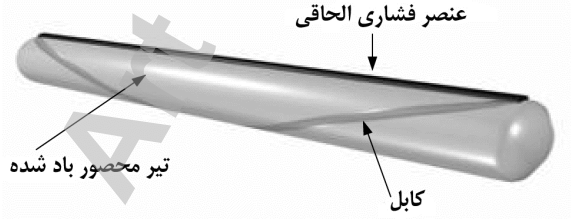
مصالح به‌کار رفته در سازه‌های بادی باید برای ساخت پوسته‌های قابل ارتجاع مفید باشند. پوسته‌های قابل ارتجاع را معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌کنند که این مصالح تحت کمترین کشش قرار گیرند. «کشش در پوسته با افزایش دهانه فزونی می‌گیرد و با افزایش خیز کاهش می‌یابد. در سازه‌های دارای دهانه‌های بزرگ، کابل‌هایی با خیز کم برای کاهش تنش‌ها در پوسته به کار می‌روند. دهانهٔ مؤثر پوسته نیز به وسیلهٔ فضای بین کابل‌ها تعیین می‌شود» (مور، ١٣٨٤).

در سال ۱۹۹۸ میلادی به منظور ساخت هواپیماهای سبک از ترکیب سیستم محصور بادشده با شبکه‌ای فلزی استفاده شد؛ و در نتیجهٔ این طراحی، مقاومت سطحی و کلی محصول بسیار بالا رفت. شبکهٔ فلزی مذکور نقشی کمک‌کننده در رسیدن سازهٔ بادی به شکل مورد نظر دارد. یکی از نمونه‌های هواپیمای ساخته‌شده و شبکهٔ فلزی به‌کار رفته در آنها در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود. این سازه برای ایجاد سبکی کافی، از گاز هلیوم پر شده است (Luchsinger et al., 2004).



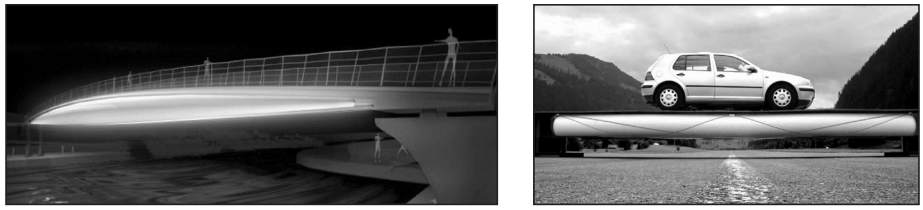
شکل ۱۵. سیستم ترکیب سازهٔ بادی با شبکهٔ فلزی
منبع: Luchsinger et al., 2004

اخیراً شرکت ایرلایت سوئیس از ترکیب سازه‌های محصور بادشده با کابل‌های کششی و قطعات فلزی فشاری به سیستم جدیدی با نام تنسیریتی[8] دست یافت، که با آن می‌توان دهانه‌های بزرگی را پوشاند و بارهای زیادی بر آن وارد ساخت (Luchsinger et al., 2004). شکل ١٦ نمونه‌ای از قطعهٔ ساخته‌شده به این روش، و شکل ۱۷ نمونه‌ای از پل‌های ساخته‌شده با سیستم تنسیریتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. تیر بادی تقویت‌شده به روش تنسیریتی
منبع: Luchsinger et al., 2004

www.art.ac.ir
Art University Journals



شکل ۱۷. نمونه پل‌های ساخته‌شده به روش تنسیریتی
منبع: Luchsinger et al., 2004

مصالح گوناگونی که برای ساخت پوستهٔ اصلی سازه‌های بادی به کار می‌روند عبارت‌اند از: «فایبرگلاس[۹]»، «نایلن[۱۰]»، «پلی‌استر[۱۱]»، «پوشش‌های پلی‌وینیل کلراید[۱۲]»، «لاستیک سیلیکنی[۱۳]» (Wouters, 2009).

به هر حال، در مجموع به مانند سازه‌های چادری، «از سال ۱۹۷٤ [مصالح اصلی] تمامی سازه‌های هوای فشردهٔ بزرگ از پوستهٔ فایبرگلاس با پوشش تفلون[۱٤] ساخته شده‌اند. این پوسته در برابر آتش‌سوزی و استهلاک در برابر نور خورشید به‌خوبی مقاوم است و عمر مفیدی بیش از ۲۵ سال دارد» (مور، ۱۳۸٤). این تفلون عموماً از نوع FEP یا پروپیلن ـ اتیلن ترکیب شده با فلور[۱۵] است (Wouters, 2009).

نوع دیگری از پوستهٔ این سازه‌ها، پارچه پلی‌استری است که با لایه‌ای از وینیل پوشیده شده است. وزن این ترکیب از ۱۰۸۵ gr/m2 شروع می‌شود و بسته به ضخامت لایهٔ وینیلی می‌تواند بیشتر هم باشد. این ترکیب مقاومت خوبی را در برابر کشش، پارگی و حریق ایجاد می‌کند و غشای خارجی آن چسبندگی و پیوستگی و اتصالات مناسبی را شکل می‌دهد. این غشای خارجی تنوع رنگی زیادی دارد و در برابر پرتوهای ماورای بنفش و همچنین تنش‌های حرارتی و آلودگی‌های قارچی و شیمیایی مقاوم است. در برخی از پروژه‌های مهم ساخته‌شده، مواد تشکیل‌دهندهٔ آکریلیک‌های پایه غشای ترکیبی[۱٦] PVDF هستند (Farley Group, 2009).

امروزه نسل دوم این غشاهای ترکیبی با ویژگی‌هایی چون پایداری، طول عمر بالاتر، حفظ زیبایی ظاهری و دوام شکل و رنگ اولیه در طول عمر سازه، به جامعهٔ مهندسی عرضه شده است. از دیگر ویژگی‌های این نوع غشاها امکان عبور تا ۷۰ درصد نور طبیعی روز و روشنایی فضای داخل است. در چنین شرایطی امکان استفاده از ۸۰ درصد نور مات و ۲۰ درصد نور نیمه‌مات برای کاربران فراهم می‌شود. این تکنولوژی برای بهره‌وری از انرژی گرمایی خورشید در فصول سرما و گرما، بسیار مفید و کاربردی است. بنابراین به لحاظ نوع و جنس پوسته‌ها، سیستم نورپردازی مصنوعی عمدتاً برای بهره‌برداری در شب و مواقعی که دسترسی به نور طبیعی به لحاظ شرایط میسر نیست، طراحی می‌شود. عبور نور از کل سطح سازه (حتی دیواره‌ها)، استفاده از نور را در طول روز امکان‌پذیر می‌سازد و بهره‌برداران نیازی به مصرف انرژی برای روشنایی داخلی نخواهند داشت. صرفه‌جویی در مصرف برق از مهم‌ترین عوامل مثبت این سازه به شمار می‌آید. غشای ترکیبی PVDF دارای یک لایهٔ خارجی و یک لایهٔ داخلی است. ویژگی‌های لایهٔ خارجی عبارت‌اند از: مقاومت در برابر پرتوهای ماورای بنفش، ضدحریق و ضدکپک بودن، و قابلیت کامل بازیافت. خصوصیات لایهٔ داخلی نیز عبارت‌اند از: بازتاب زیاد نور داخل، وزن اندک (۵۰۰ گرم) در هر مترمربع، عایق مناسب صدا، بدون چگالش و جمع‌شدگی. نتیجه آزمایش‌ها و تست‌های انجام‌شده بر روی غشای PVDF مقاومت آن را در مقابل هرگونه خسارت ناشی از عوامل جوی و طبیعی تأیید می‌کند. پس از تست‌های انجام‌شده بر روی پارچه‌های نو و نیز بر روی پارچه‌هایی

www.art.ac.ir Art University Journals

که چندین سال مورد استفاده قرار گرفته بودند، هیچ اثری از لایه‌لایه شدن مشاهده نشد. وزن مصالح به کار رفته در سازه‌های بادی ۷۰۰ تا ۱۰۵۰ گرم در هر مترمربع، و در مقایسه با بسیاری از انواع سازه‌های دیگر ناچیز است و در نتیجه، آنها در زمرهٔ سازه‌های سبک قرار می‌گیرند. از دیگر ویژگی‌های این پوشش‌ها، مقاومت‌شان در برابر تغییرات دماست، به گونه‌ای که قابلیت تحمل دمای ۸۰+ تا ۳۰- درجه سانتیگراد را دارند (بروشور الکترونیکی شرکت گام آبی).

رفتار سازه‌ای ـ لرزه‌ای

«سازه‌های بادی تابع قوانین محض فیزیکی هستند که بر انتخاب فرم و فرایند طراحی فنی آنها تأثیر می‌گذارند. فرم سازه‌های هوای فشرده همیشه می‌توانند از این فرمول اختصاصی مشتق شوند:

رابطه (۱) $$p = \frac{nk}{rk} + \frac{ns}{rs}$$

در این فرمول p فشار هوای داخلی سازه است، nk و ns تنش‌های وارد بر پوسته را تعریف می‌کنند، و rk و rs شعاع منحنی‌ها را مشخص می‌سازند» (Wouters, 2009). این فرمول نشان می‌دهد که فشار هوای درون هر سازهٔ بادی با تنش‌های وارد بر اجزای آن رابطهٔ مستقیم دارد. در حقیقت وقتی این سازه‌ها در موقعیت‌هایی به کار روند که تنش‌های فشاری و کششی یا خمشی بالاتری به آنها وارد شوند، لاجرم می‌بایست فشار بیشتری در هوای داخلی ایجاد کرد. همچنین فرمول یادشده نشان می‌دهد که رابطهٔ معکوسی میان فشار هوا و شعاع منحنی سازه وجود دارد؛ یعنی برای فرم‌های بازتر با منحنی‌های نرم‌تر فشار کمتری در هوای داخلی سازهٔ بادی تأمین می‌شود.

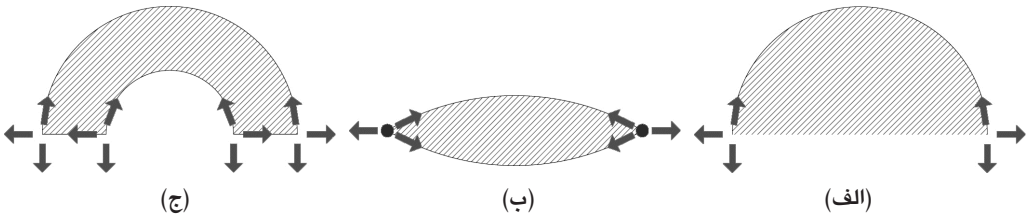
بر اساس نتایج حاصل از این فرمول، انواع ساختارهای بادی را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی کرد (Wouters, 2009):

۱. گروه نخست سازه‌های در قالب سالن‌های بادی‌اند که دورتادور آنها درون فونداسیون مهار می‌گردد و فرم بیرونی آنها دارای منحنی سینکلاستیک است. بارهای خارجی وارد بر پوسته را فشار هوای مستقر درون این سالن مهار می‌کند. بارهای داخلی وارد بر پوسته، که ناشی از فشار یکنواخت هوا به بیرون‌اند به‌صورت کششی مضاعف در غشای سازهٔ بادی تأثیر می‌کند.

۲. گروه دوم سازه‌های تشک‌مانندی هستند که در دو لایه ساخته می‌شوند. این لایه‌ها به سازه‌ای داخلی متصل می‌گردند که جفت نیروهای بزرگ جانبی را در لبه‌های این تشک به هم می‌رساند. گزینهٔ دیگر آن است که این لایه‌ها به عنوان پوششی بر روی سازهٔ اولیه اجرا گردند و این امکان برای‌شان فراهم آید که نیروهای افقی را به سازهٔ اصلی انتقال دهند. نیروهای فشاری با افزایش در سمت دیگر تشک مهار می‌شوند.

۳. گروه سوم تیرهای بادی هستند که امروزه بیش از دیگر انواع، در سازه‌های مدرن به کار می‌روند. این تیرها، تشک‌های بادی به شکل تیوب یا کُره هستند. از این نوع سازه‌های بادی می‌توان به عنوان جایگزینی برای پایه‌ها یا تیرهای ساختمانی ـ که نقش المان‌های خمشی را بازی می‌کنند ـ استفاده کرد تا در قیاس با دیگر سازه‌های از این گونه، از حجم سازهٔ اجراشده به نسبت سطح مفید کاسته شود. بنابراین، همان‌گونه که مقاومت فشاری و خمشی افزایش می‌یابد، فشار هوای داخلی نیز زیاد می‌شود.

www.art.ac.ir
Art University Journals



شکل ۱۸. انواع سیستم‌های سازه‌ای بادی؛ الف) سالن بادی؛ ب) تشک بادی؛ و ج) تیر بادی

منبع: Wouters, 2009

از مسائلی که در هر سیستم سازه‌ای همیشه توجه مهندسان را جلب می‌کند، میزان مقاومت در برابر نیروهای جانبی یعنی باد و زمین‌لرزه است. در سازه‌های بادی نیز این نکتهٔ مهم مورد توجه بوده و ویژگی‌ها و رفتار معیّن آنها کیفیت عکس‌العمل در برابر چنین نیروهایی را ارتقا داده است. «در طراحی سازه‌های هوای فشرده توزیع بار از طریق پوسته‌های سازه انجام می‌پذیرد و کلیه تجهیزات مورد نیاز در خصوص برپایی و تنظیم هوای داخل سازه، در خارج از سازه و بر روی زمین قرار می‌گیرد و نیازی به نصب در ارتفاع و یا بر روی سازه نیست و این خود در زمرهٔ عوامل کاهش وزن ساختمان است. به علاوه، از آن رو که پوشش کل سازه از غشای پارچه‌ای تشکیل شده، این موضوع نیز خود باعث پایین آمدن وزن سازه به میزان زیادی (در حد ۱/٦ کیلوگرم بر مترمربع) می‌شود. که در سازه‌های متشکل از اسکلت فلزی این میزان در حدود ۲۵۰ تا ٤۰۰، و در سازه‌های اسکلت بتنی در حدود ٤۸۰ تا ۷۷۰ کیلوگرم بر مترمربع است، که این میزان وزن در زمان بروز زمین‌لرزه عمدتاً تأثیرات مخرب زیادی را به همراه دارد» (کاشانی نیکو، ۱۳۸۸). بنابراین تنها کاهش عمدهٔ جرم سازه در این ساختارهای بادی می‌تواند از عوامل مهم در کاهش خطر نیروهای افقی چون زمین‌لرزه باشد. از دیگر نقاط قوت این سازه‌ها، نوع شکل‌شان و اتصال به زمین است. چون سازه‌های هوای فشرده در نقطهٔ مهار به زمین نیاز به فونداسیون قوی ندارند، به همین خاطر در برابر حرکات زمین، پایداری نسبی از خود نشان می‌دهند. فرم گنبدهای هوای فشرده، ناخودآگاه مفهوم خمش را به بیننده القا می‌کند. اصولاً این فرم به شکلی طراحی شده است که در برابر نیروهای افقی و عمودی مقاومت کند. عموماً این سازه‌ها به دلیل داشتن تنها یک دهانهٔ آزاد و فارغ از هرگونه تجهیزات اضافی ساخت در ارتفاع، ساختار همگنی دارند و به همین خاطر جهت یا سمتِ وارد آمدن نیروی زمین‌لرزه، اهمیتی در رفتار لرزه‌ای آنها ندارد. برخلاف دیگر سازه‌های متداول که در برابر زمین‌لرزه تمایل به ایستایی و بی‌حرکتی از خود بروز می‌دهند، بخش تحتانی سازه‌های بادی به‌سادگی در برابر نیروی جانبی زمین‌لرزه حرکت می‌کند. بنابراین تنها لازم است که این گنبدهای بادی به‌خوبی در جهت عمود بر زمین مهار شوند تا بر اثر وارد شدن نیروهای دینامیکی زمین‌لرزه به سمت بالا حرکت نکنند. از جمله روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بادی در برابر زمین‌لرزه، ترکیب اتصالات آنها به پی با سیستم‌های کابل است. در چنین شرایطی با ورود حرکات لرزشی از زمین، اتصالات سازه نیروهای واردشده را به‌صورت تنش‌های کششی درون کابل‌ها مهار می‌کنند تا کمترین تنش به غشای پارچه‌ای سازهٔ بادی وارد شود و در عین حال کاملاً در تعادل و ایستایی باقی بماند (DUOL Ltd.، 1388).

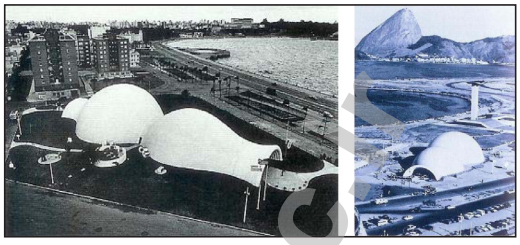
به اعتقاد اندرو چارلسون، «معمولاً غشاهای کششی به قدری سبک‌اند که در آنها، نیروهای اینرسی ناشی از زمین‌لرزه در مقایسه با نیروی باد، بسیار کم هستند و از این رو نیروی باد، نیروی غالب در طراحی خواهد بود. چنانچه یک سیستم غشای کششی از پس تأمین الزامات تحمل

www.art.ac.ir Art University Journals

نیروهای ثقلی و نیروی باد برآید، می‌توان فرض کرد که رفتار مناسب و مطلوبی بر اثر زمین‌لرزه از خود به نمایش خواهد گذاشت» (چارلسون، ۱۳۸۹).

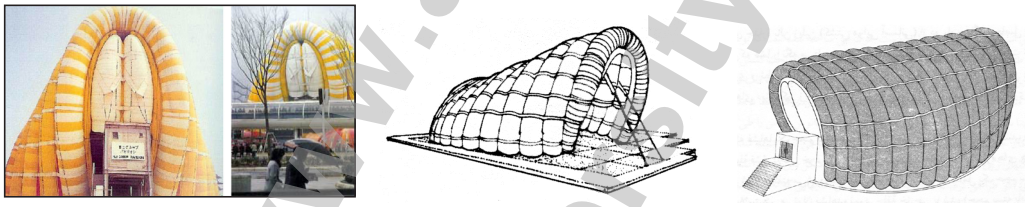
برخی نمونه‌های ساخته‌شده

۱. پاویلیون «اتم‌هایی برای صلح» متعلق به کمیسیون انرژی اتمی امریکا در سال ۱۹۶۰ میلادی[۱۷]
معمار: ویکتور لاندی[۱۸]



شکل ۱۹. غرفهٔ کمیسیون انرژی اتمی امریکا ـ نمونه‌ای از سازهٔ محصور بادشده
منبع: Chi & Pauletti, 2005

۲. غرفه شرکت فوجی در نمایشگاه موسوم به اکسپو در اوزاکای ژاپن، سال ۱۹۷۰ میلادی[۱۹]
معمار: یوتاکا موراتا[۲۰]



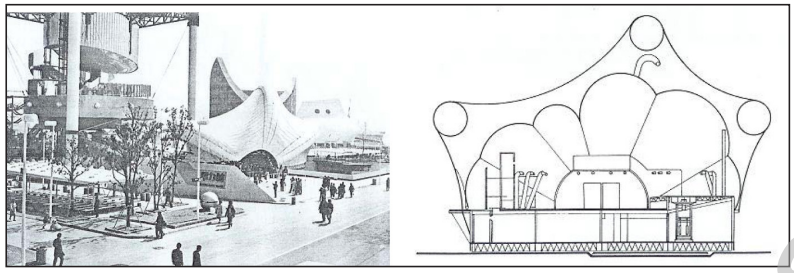
شکل ۲۰. غرفه شرکت فوجی در نمایشگاه اوزاکا ـ نمونهٔ سازهٔ پرشده از هوا با ۱۶ قوس
منبع: سالوادوری، ۱۳۷٤؛ Wahl, 2007؛ Chi & Pauletti, 2005؛ و Dessauce, 1999

۳. غرفهٔ امریکا در نمایشگاه موسوم به اکسپو، اوزاکای ژاپن[۲۱]
معماران: دیویس برادی، دیوید گایگر و والتر برد[۲۲]

شکل ۲۱. غرفهٔ امریکا در نمایشگاه اوزاکای ژاپن
منبع: Herzog, 1977؛ و Forster, 1994

www.art.ac.ir University Journals

٤. تئاتر شناور در اوزاکای ژاپن، سال ۱۹۷۰ میلادی، اثر همان تیم سازنده غرفهٔ فوجی[۲۳]



شکل ۲۲. تئاتر شناور اوزاکا، سازهٔ پر شده از هوا با سه قوس بادی

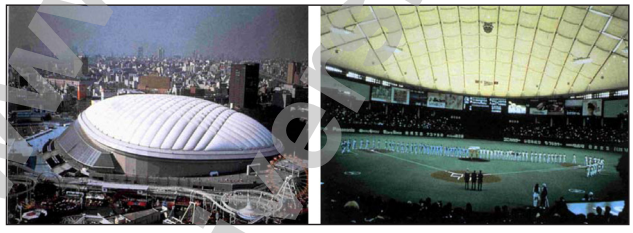
منبع: Herzog, 1977

٥. غرفه بی‌سی در اکسپوی ونکوور[۲۴]

شکل ۲۳. غرفه بی‌سی در اکسپوی ونکوور، نمونه‌ای از سازهٔ پرشده از هوا

منبع: فرخزاد، ۱۳۸۹

٦. گنبد تخم‌مرغی بزرگ توکیو، سال ۱۹۸۸ میلادی[۲۵]



شکل ۲۴. گنبد تخم‌مرغی بزرگ توکیو، سازهٔ محصور بادشده

منبع: Forster, 1994

۷. استخر سرپوشیده هتل هرمز در بندرعباس، اجراشده به‌وسیله شرکت فندوله، سال ۱۳۸۳ خورشیدی

شکل ۲۵. استخر سرپوشیده هتل هرمز در بندرعباس، نمونهٔ سازهٔ متکی بر هوا

منبع: بروشور شرکت فندوله

www.arcjournals.ir

۸. سالن بادی بولینگ مجموعه ورزشی انقلاب تهران، اجراشده به‌وسیله شرکت فندوله، سال ۱۳۸۳ خورشیدی

شکل ۲۶. سالن بولینگ مجموعه ورزشی انقلاب، سازهٔ متکی بر هوا

منبع: بروشور شرکت فندوله

۹. استخر مجموعه ورزشی شماره یک شرکت ملی گاز، اجراشده به‌وسیله شرکت فندوله، سال ۱۳۸۰ خورشیدی

شکل ۲۷. استخر شرکت ملی گاز، سازهٔ بادی متکی بر هوا

منبع: بروشور شرکت فندوله

نتیجه‌گیری

در طراحی و ساخت و اجرای سازه‌های بادی در این مقاله، نتایجی به‌دست آمد که به طور کلی دربرگیرندهٔ مزایا و معایب آنهاست و می‌تواند در انتخاب و کاربرد این‌گونه سازه‌ها به مهندسان معماری و عمران و نیز کاربران کمک کند. با نگرش مهندسی ارزش و اقتصاد مهندسی هر طرح و اجرا می‌توان مزایای زیادی را برای این گونه سازه‌ها برشمرد که از آن جمله‌اند:

۱. چندمنظوره بودن آنها؛
۲. سبکی‌شان؛
۳. زمان و هزینهٔ کم استقرار برای بهره‌برداری؛
٤. هزینهٔ اندکِ حمل‌ونقل؛
٥. در دسترس بودن مصالح ساخت در بازارهای داخلی و خارجی؛
٦. ارزان بودن مصالح و طراحی و ساخت در قیاس با سازه‌های مشابه؛
۷. امکان پوشاندن دهانه‌های بزرگ به‌صورت یکپارچه؛
۸. زمان کم ساخت (پیش‌ساخته و یا ساخت در محل)؛
۹. طراحی و ساخت سریع؛
۱۰. وجود سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی مناسب آنها؛

www.art.ac.ir Art University Journals

۱۱. امکان استفادهٔ چندباره از سازه در زمان‌ها و مکان‌های مختلف؛
۱۲. امکان حمل‌ونقل سازه و برپایی آن در مناطق مختلف با شرایط آب‌وهوایی گوناگون؛
۱۳. نیاز نداشتن به مقاومت بالای خاک؛
۱٤. قابلیت انتقال نور طبیعی روز و امواج رادیویی؛ و
۱۵. هزینهٔ پایین در قیاس با سطح زیر پوشش آن.

کاستی‌ها و نقاط ضعف این سازه‌ها را نیز می‌توان چنین برشمرد:
۱. ضعیف بودن در برابر بارهای واردشده (گسترده، متمرکز، باد و برف و جز اینها)؛
۲. محدودیت استفاده برای برخی از گونه‌های طرح معماری؛
۳. کاربرد محدود (این سازه‌ها تنها برای پوشش فضاهای بزرگ جمعی کارایی دارند و امکان‌پذیر هستند)؛
٤. وجود دستگاه‌های مکانیکی و الکتریکی جانبی در طول عمر سازه؛
۵. نیاز به بازرسی، تعمیر و نگهداری مستمر سازه در طول مدت استفاده؛ و
٦. ضعف مصالح ساخت و عکس‌العمل آن در برابر تغییرات آب‌وهوایی بر رفتار سازه.

از سازه‌های هوای فشرده می‌توان در احداث مکان‌های مختلفی بهره جست. کاربری‌های این سازه را می‌توان در این چهار گروه طبقه‌بندی کرد:

۱) مکان‌های ورزشی
۱. کلیه رشته‌های ورزشی؛
۲. استخرهای سرپوشیده؛
۳. سالن‌های چندمنظوره؛ و
٤. کمپ‌های زمستانی در پیست‌های اسکی.

۲) مکان‌های صنعتی
۱. کارخانه‌ها، کارگاه‌های تولیدی؛ و
۲. انبار و کارگاه‌های موقت.

۳) کاربردهای نظامی
۱. انبار تجهیزات و افزارآلات جنگی؛
۲. آشیانه‌های موقت هواپیما، بالگرد؛
۳. کمپ‌های نظامی برای اردوها و مانورهای جنگی؛
٤. مقرهای فرماندهی؛ و
۵. استتار کارگاه‌های سرّی.

۴) دیگر موارد
۱. نمایشگاه‌ها و غرفه‌های نمایشگاهی؛
۲. همایش‌ها و سالن‌های جمعی مرتبط؛
۳. ایستگاه‌های خدمات‌رسانی بین‌راهی؛ و
٤. کمپ‌های پزشکی در مناطق خاص و دور از مرکز.

www.art.ac.ir Art University Journals

پی‌نوشت‌ها

1. Pneumatic Structure
2. Walter Bird
3. Air-Supported Structure
4. Air-Inflated Structure
5. Airlock
6. Inflated-Frame Structure
7. Inflated-Panel Structure
8. Tensairity
9. Fiberglass
10. Nylon
11. Polyester
12. PVC
13. Silicon Rubber
14. Teflon
15. Fluorinated Ethylene-Propylene
16. Floutopt
17. Atoms for Peace Pavilion
18. Victor Lundy
19. Fuji Pavilion in Osaka, Expo 70
20. Yutaka Murata
21. USA Pavilion in Osaka, Expo 70
22. Davis Brody, David Geiger and Walter Bird
23. Floating Theatre in Osaka, Japan
24. BC Place at Vancouver, Expo 1986
25. Tokyo Big-Egg Dome

فهرست منابع

- بروشور الکترونیکی شرکت فندوله
- بروشور الکترونیکی شرکت گام آبی
- چارلسون، اندرو (۱۳۸۹) *طراحی لرزه‌ای برای معماران، مقابله‌ای هوشمندانه با زلزله*، ترجمه: محمود گلابچی و احسان سروش‌نیا، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- سالوادوری، ماریو (۱۳۷٤) *سازه در معماری*، ترجمه: محمود گلابچی، دانشگاه تهران، تهران.
- فرخ‌زاد، محمد (۱۳۸۹) *سیستم‌های سازه‌ای ساختمان*، انتشارات عصر کنکاش، تهران.
- کاشانی نیکو، محمدحسین (۱۳۸۸) *بررسی سازه‌های هوافشرده در زمان بحران در مقایسه با سایر سازه‌ها*، اولین همایش زلزله و سازه‌های هوافشرده، استانداری هرمزگان، بندرعباس، ۲ اسفند ۱۳۸۸.
- مور، فولر (۱۳۸٤) *درک رفتار سازه‌ها*، ترجمه: محمود گلابچی، دانشگاه تهران، تهران.
- DUOL Ltd. (۱۳۸۸)، *A Simple Solution for Big Challenges*، اولین همایش زلزله و سازه‌های هوافشرده، استانداری هرمزگان، بندرعباس، ۲ اسفند ۱۳۸۸.

- Chi Yung Yun, Pauletti Ruy Marcelo de Oliveria (2005) *An Outline of the Evolution of Pneumatic Structures*, FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Faculty of Architecture and Urban Planning and the Polytechnic School of the University of São Paulo.
- Dent Roger N. (1972) *Principles of Pneumatic Architecture*, Halsted Press, New York.

www.art.ac.ir
Art University Journals

- Dessauce M. (1999) *The Inflatable Moment: Pneumatic and Protest in ´68*, Princeton Architectural Press, New York.

- Ermolov V.V. (2010) *Pneumatic Structure*, The Great Soviet Encyclopedia, 3rd Edition (1970-1979), The Gale Group Inc.

- Farley Group (2009) *Electronic Brochure*, http://www.thefarleygroup.com, Farley Manufacturing Inc., Copyright © 2009.

- Forster B. (1994) "Cable and Membrane Roofs–a Historical Survey", Structural Engineering Review, No.6 (3/4) PP. 145–174.

- Hamilton K. Cambell D., Gossen P. (1994) "Current State of Development and Future Trends in Employment of Air-supported Roofs in Long-span Applications", Spatial, Lattice and Tension Structures, Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium, Atlanta, American Society of Civil Engineers, New York, PP. 612-621.

- Herzog Thomas (1977) *Pneumatic Structures: A Handbook of Inflatable Architecture*, Oxford University Press.

- Langmead. Donald, Garnaut. Christine (2001) *Encyclopedia of Architectural and Engineering Feats*, ABC-CLIO Inc. Santa Barbara, California

- Luchsinger Rolf H, Pedretti. Mauro, Reinhard Andreas (2004) "Pressure Induced Stability: form Pneumatic Structures to Tensairity", Journal of Bionics Engineering, Vol. 1 No. 3, PP. 141-148.

- Otto F., Trostel R. (1967) *Pnevmaticheskie stroitel'nye konstruktsii*, Moscow.

- Vandenberg, Maritz (1996) *Soft Canopies*, Academy Editions, London.

- Wahl Iver (2007) *Building Anatomy*, McGraw Hill, New York.

- Wouters Niels (2009) *Pneumatic Structures*, A revival of formal experiments, [brochure].

www.art.ac.ir
Art University Journals