

بررسی ضوابط طراحی برج‌های مخابراتی خودایستا و تعیین هندسه‌ی بهینه آن‌ها

محمد قاسم سحاب (استادیار)

ایوب فلاح‌نژاد (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه نیشابور

مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۴، ص. ۱۳۳-۱۳۴، (پایان کار)

«برج‌های مشبک فلزی» یکی از انواع سازه‌های خاص و پراهمیت در مهندسی سازه‌اند. برج‌های مخابراتی مشبک با اشکال هندسی متفاوت، به لحاظ شکل مقاطع عرضی و طولی و آرایش اعضای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، طراحی و ساخته می‌شوند. در این مقاله چند آیین‌نامه‌ی معتبر و متداول در ایران برای طراحی برج‌های مخابراتی بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سپس ۸۴ برج مخابراتی خودایستا با مهاربند ضربدری، مقطع عرضی مربعی و مثلثی، و ارتفاع‌های ۸۱،۳۰ و ۱۲۱ متر، با استفاده از نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ V ۱۱ و براساس آیین‌نامه‌ی (۱۹۹۶) TIA/EIA-۲۲۲-F تحلیل و طراحی شده، و وزن و برخی مشخصات رفتاری آن‌ها نیز با هم مقایسه شده است. در بین ۸۴ برج مورد اشاره، کم‌ترین وزن مربوط به برج‌های با مقطع عرضی مثلثی است که مقطع طولی آن‌ها شامل یک قسمت شیب‌دار در پائین و یک قسمت منشوری در بالاست. از نظر تغییر مکان و چرخش نیز برج‌های با مقطع عرضی مربعی، تغییر مکان‌ها و چرخش‌های کم‌تری نسبت به برج‌های با مقطع عرضی مثلثی دارند. این مطالعه نشان می‌دهد، استفاده از مقطع مثلثی در برج‌های مخابراتی نسبت به مقطع مربعی برای بارهای یکسان می‌تواند بیش از ۴۰ درصد کاهش وزن سازه را در پی داشته باشد.

واژگان کلیدی: برج مخابراتی، برج مشبک فلزی، برج خودایستا، هندسه‌ی بهینه، بارگذاری باد.

sahab@aut.ac.ir
af.civil@yahoo.com

۱. مقدمه

ارتفاع ۱۲۰ تا ۱۸۰ متر ساخته می‌شوند. سازه این برج‌ها شامل پایه‌های اصلی و مهارهای متقاطع و افقی است. نمونه‌ی از این نوع برج با مقطع عرضی مثلثی (سه‌پایه) و اعضای لوله‌ی به همراه آنتن‌های مختلف نصب شده بر روی آن در شکل ۱ الف نشان داده شده است. معمولاً در برج‌های با مقطع عرضی مربعی (چهارپایه) زاویه بین اضلاع مقطع، 90° و در برج‌های با مقطع عرضی مثلثی (سه‌پایه)، 60° است.^[۱]

برج‌های مهارشده شامل یک بدنه یا دکل با مقطع عرضی مثلثی، مربعی، یا مقطع مدور توپرند که با اتصال مفصلی بر روی پی نصب می‌شوند. اعضای این برج‌ها از عناصر میله‌ی با مقاطع مختلف نظیر مقطع قوطی، لوله و نبشی ساخته می‌شوند و برای تأمین ایستایی دکل آن را توسط کابل‌های فولادی متصل به پی‌های بتنی، از اطراف مهار می‌کنند. در یک نمونه از برج‌های مهارشده (شکل ۲)، مهارها در طول ارتفاع دکل با زاویه‌ی 45° نسبت به محور طولی آن نصب شده‌اند و هر مهار پی مجزایی دارد. در حالت دیگر، گروهی از مهارها که در یک صفحه قرار می‌گیرند به یک پی مشترک متصل می‌شوند. معمولاً در این حالت بیشینه زاویه انحراف بالاترین مهار نسبت به افق 60° است. در پلان برج مهارها به صورت شعاعی نسبت به محور مرکزی دکل دیده می‌شوند. معمولاً برای برج‌های با مقطع عرضی

برج‌های مخابراتی سازه‌هایی هستند که به‌عنوان پایه‌ی برای نصب انواع آنتن‌های دریافت و ارسال امواج الکترومغناطیس احداث می‌شوند. غالباً برای سبک نمودن برج و کاهش سطح بادگیر آن، برج را از مصالح فلزی و به‌صورت مشبک می‌سازند. در عین حال، گاهی برج‌های مخابراتی فلزی با سطوح پر و غیرمشبک اجرا می‌شوند و گاهی نیز با استفاده از بتن مسلح و با سطوح پر ساخته می‌شوند. در این موارد، از برج نه‌تنها به‌عنوان پایه‌ی برای نصب آنتن استفاده می‌گردد بلکه با ایجاد کاربری‌هایی همچون رستوران، منظرگاه شهر، مرکز همایش، شهر بازی و نظایر آن در قسمت‌های مختلف و بر فراز برج، آن را به یک مرکز پرچاذه‌ی توریستی و تفریحی تبدیل می‌کنند. در شکل ۱ سه نمونه از این برج‌ها ملاحظه می‌شود.

در غیاب ساختمان‌های بلند برای نصب آنتن بر فراز آن‌ها، برج‌های مخابراتی فلزی مشبک یکی از اقتصادی‌ترین گزینه‌ها برای این منظورند. این نوع برج‌ها به‌طور نسبی دارای وزن بسیار کمی بوده و آسان‌تر ساخته و بر پا می‌شوند. برج‌های مشبک به دو نوع «برج‌های خودایستا» و «برج‌های مهارشده»^۲ تقسیم می‌شوند. برج‌های خودایستا سازه‌های فضایی با سه یا چهار پایه بوده و معمولاً با بیشینه

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۶/۱۰، اصلاحیه ۱۳۸۸/۹/۲۹، پذیرش ۱۳۸۸/۱۱/۱۲.



ج) برج بتنی.^[۴]



ب) برج فلزی با بدنه توپری.^[۴]



الف) برج مشبک فلزی.^[۴]

شکل ۱. نمونه هایی از انواع برج های مخابراتی.

داشته باشد سؤالی است که پاسخ به آن بسیار حائز اهمیت است. در این نوشتار ضوابط آیین نامه های چهار کشور مختلف دنیا در مورد بارگذاری و طراحی برج های مخابراتی بررسی و مقایسه شده است. همچنین ضمن تحلیل و طراحی ۸۴ برج با هندسه های متفاوت و مقایسه ای نتایج حاصله، هندسه ی بهینه ی آنها تعیین شده است.

با بررسی تغییرات وزن و تغییر مکان های برج های مخابراتی تحت بارگذاری یکسان نشان داده شده است که برج های مخابراتی با مقطع مثلثی، در مقایسه با برج های با مقطع مربعی، وزن کمتری دارند. اما در مواردی که چرخش برج با توجه به نوع آنتن نصب شده بر روی آن لازم است محدود شود، بهتر است از برج های با مقطع عرضی مربعی و مقطع طولی متغیر استفاده شود.

۲. هندسه ها و توپولوژی های متفاوت سازه برج های مخابراتی مشبک فلزی

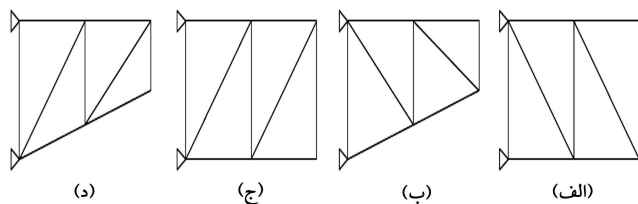
هندسه ی یک سازه ی خرابایی با تعداد معینی گره را می توان با تغییر مختصات گره ها و بدون حذف یا اضافه کردن هیچ گره یی تغییر داد. چنانچه در این سازه ها اعضایی که بین گره ها قرار می گیرند از نظر وجود یا عدم وجود یکسان باشند، سازه هایی با توپولوژی یکسان اما با طرح های هندسی متفاوت خواهیم داشت. به عنوان مثال خرپاهای نشان داده شده در شکل های ۳ الف و ۳ ب دارای توپولوژی های یکسان اما طرح های هندسی متفاوت اند. طرح هندسی خرابای نشان داده شده در شکل ۳ ج نیز با طرح هندسی خرابای نشان داده شده در شکل ۳ الف یکسان است، اما با توجه به تفاوتی که در وجود اعضای رابط بین گره ها در این دو خرپا وجود دارد توپولوژی آنها



شکل ۲. برج مهارشده با مقطع مثلثی.^[۲]

مثلثی و دایره ای در هر تراز مهارشده ی دکل از ۳ مهار و برای مقطع عرضی مربعی از ۴ مهار استفاده می شود.^[۵]

نظر به عدم وجود مقررات ملی برای طراحی برج های مخابراتی، دفاتر مهندسی در ایران با نظر شخصی و خواست کارفرما از آیین نامه های سایر کشورها از جمله آمریکا و آلمان بهره می برند. مثال های عددی ارائه شده در این مطالعه نشان می دهد که نیروهای باد پیش بینی شده توسط آیین نامه های مختلف برای طراحی برج های مخابراتی ممکن است بسیار با یکدیگر متفاوت باشند. این واقعیت لزوم تدوین مقررات ملی مناسب برای یکسان سازی طراحی برج های مخابراتی در سطح ایران را روشن می سازد. بررسی انطباق شرایط تعریف شده در این آیین نامه ها با شرایط ایران، موضوعی است که نیاز به بررسی دقیق و تحقیقات جامع دارد. براساس آنچه که شرح داده شد، هندسه (شکل مقطع عرضی و طولی و عرض پایه) و توپولوژی (آرایش اعضاء خرپا) برج های مخابراتی مشبک بسیار متنوع است، و تعیین هندسه و توپولوژی بی که کمترین وزن و بهترین عملکرد را از نظر ضوابط طراحی



شکل ۳. سازه های خرابایی با طرح های هندسی و توپولوژی های متفاوت.

عملیات برای دست‌یابی به طرح بهینه به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد و معمولاً رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب دشوار می‌شود.^[۷]

در بهینه‌سازی توپولوژی، اعضای از سازه حذف یا به آن اضافه می‌شوند. چنانچه تمام اعضای متصل به گره‌ی حذف شوند، آن گره نیز از سازه حذف می‌شود.^[۶] برای مثال، هندسه‌ی کلی برج‌های نشان داده‌شده در شکل ۵ یکسان است، ولی از آنجا که تعداد اعضا و گره‌های آن‌ها با یکدیگر متفاوت‌اند، توپولوژی این برج‌ها نیز متفاوت خواهد بود. چنان‌که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، با حذف یک مهاربند در هر تراز از برج با مهاربند ضربدری (شکل ۵الف)، برج با مهاربند قطری (شکل ۵ب) به دست می‌آید. تفاوت برج با مهاربند هشتی نشان داده‌شده در شکل ۵ج نیز با دو برج قبلی در تعداد اعضا و گره‌هاست. روشن است که برای تعیین کمیته وزن برج با هر یک از هندسه‌های مفروض برشمرده شده، باید عملیات بهینه‌سازی مقاطع اعضای برج تا آنجا ادامه یابد که کمیته وزن ممکن برای آن‌ها به دست آید. در این صورت می‌توان از مقایسه‌ی کمیته وزن‌های حاصله برای هر یک از برج‌ها با هندسه‌های مذکور، توپولوژی بهینه‌ی آن برج را تعیین کرد.

۳. مقایسه‌ی استانداردها و آیین‌نامه‌های تحلیل و طراحی

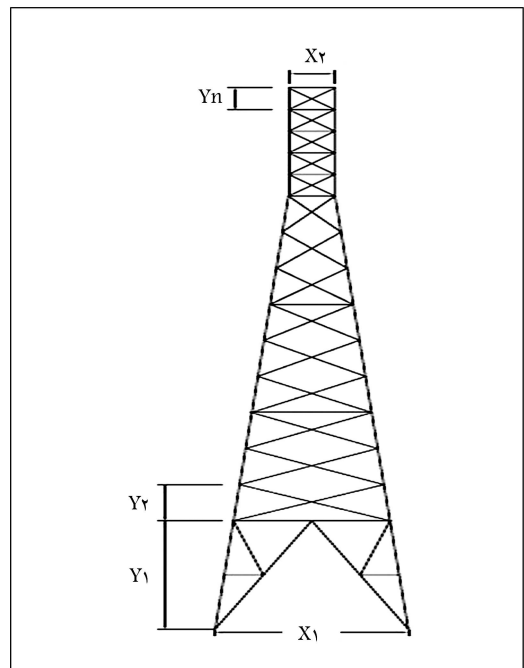
برج‌های مخبراتی

در آیین‌نامه‌های بارگذاری کشورهای مختلف جهان، بارها و موضوعات مربوط به طراحی برج‌های مخبراتی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. آیین‌نامه‌ی (ASCE/SEI-V-05(2006)^[۸] مربوط به طراحی سازه‌های فلزی در آمریکا است که در ایران نیز شناخته شده و برای بارگذاری و طراحی برج‌های مخبراتی مشبک فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، آیین‌نامه‌ی (TIA/EIA-222-F(1996)^[۹] برای بارگذاری و طراحی برج‌های مخبراتی توسط انجمن صنعت ارتباطات مخبراتی آمریکا به چاپ رسیده است. آیین‌نامه‌ی هندوستان^۴ با عنوان «بارگذاری باد بر روی ساختمان‌ها و سازه‌ها»^[۱۰] نیز از جمله آیین‌نامه‌های معتبر موجود برای تعیین بارهای حاصل از وزش باد بر روی برج‌های مخبراتی است. در بین کشورهای اروپایی آیین‌نامه‌ی DIN ۴۱۳۱ آلمان^[۱۱] با عنوان «دکل‌ها و برج‌های رادیویی فلزی» نیز در دفاتر طراحی مهندسی در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد. مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران^[۱۱] که به تعیین کمیته بارهای وارده بر ساختمان‌ها و بناهای فنی اختصاص دارد، به‌اختصار به موضوع چگونگی بارگذاری باد بر روی برج‌ها و دکل‌های مشبک پرداخته، اما به بار برف و یخ و سایر مباحث خاص در بارگذاری و طراحی برج‌های مخبراتی اشاره‌ی نمی‌کند.

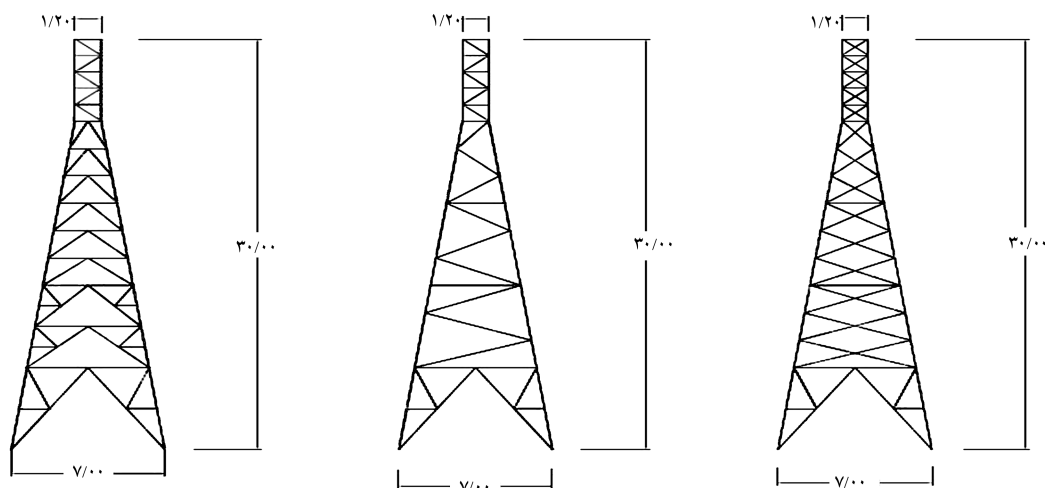
بی‌تردید استفاده از آیین‌نامه‌ی سایر کشورها برای بارگذاری و طراحی برج‌های مخبراتی در ایران بدون توجه به شرایط خاص آب و هوایی، اقلیمی و مسائل اجرایی کشور از نظر اصول مهندسی قابل قبول نیست. براین اساس به نظر می‌رسد لازم است مراجع ذی‌ربط، همچون دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، با تشکیل کمیته‌های تخصصی و گروه‌های تحقیقاتی و نیز با انجام مطالعات علمی در زمینه‌های سازه‌ی و هواشناسی و سایر موضوعات مربوط به تحلیل و طراحی برج‌های مخبراتی و کمک‌گرفتن از آیین‌نامه‌های کشورهای دارای شرایط مشابه ایران نسبت به تهیه‌ی مقررات ملی بارگذاری و طراحی برج‌های مخبراتی اقدام کنند. با توجه به این ضرورت، در ادامه ضوابط بارگذاری آیین‌نامه‌های برشمرده‌شده در بالا، به‌اختصار بررسی و با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

با یکدیگر متفاوت است. خرابی نشان داده‌شده در شکل ۳ نیز هم از نظر توپولوژی و هم از نظر طرح هندسی با خرابی نشان داده‌شده در شکل ۳الف متفاوت است. بهینه‌سازی طراحی سازه‌ی^۳ یکی از شاخه‌های مهندسی سازه است که به بحث بر روی طراحی سازه‌ها برای کمیته یا بیشینه‌کردن مقدار یک یا چند تابع هدف می‌پردازد. به‌عنوان مثال می‌توان وزن یا هزینه‌ی ساخت سازه یا هردوی این موارد را به‌عنوان تابع هدف در بهینه‌سازی طرح یک سازه در نظر گرفت. وقتی در سازه‌ی با هندسه و توپولوژی ثابت، ابعاد مقطع اعضا یا به‌عبارتی سطح مقطع آن‌ها به‌عنوان «متغیرهای طراحی» برای کمیته یا بیشینه شدن تابع هدف تغییر می‌یابند. در واقع اندازه‌ها یا ابعاد اعضا سازه بهینه‌سازی شده است. می‌توان در تعریف متغیرهای طراحی علاوه بر سطح مقطع اعضا، هندسه‌ی سازه را نیز متغیر در نظر گرفت. در این صورت بهینه‌سازی طرح هندسی آن نیز انجام می‌شود. اگر مثلاً در یک سازه‌ی خرپا، تعریف اعضای رابط بین گره‌ها (وجود یا عدم وجود آن‌ها) متغیر در نظر گرفته شود و در واقع توپولوژی سازه نیز متغیر باشد، آنگاه توپولوژی آن نیز در خلال کمیته یا بیشینه‌کردن تابع هدف بهینه می‌شود.^[۱]

در بهینه‌سازی هندسی، چنانچه مختصات گره‌ها و اندازه‌ی سطح مقطع اعضا تغییر کند، توپولوژی ثابت خواهد بود، اما اگر تعدادی از گره‌ها در طی روند حل در هم ادغام شوند برخی از اعضا حذف می‌شوند و توپولوژی سازه در این حالت خاص، تغییر می‌کند.^[۱] در واقع، در بهینه‌سازی هندسی طول اعضا تغییر می‌کند و سپس اعضای با طول‌ها و در نتیجه نیروهای جدید طراحی می‌شوند. برای مثال، در مورد برج مشبک نشان داده‌شده در شکل ۴ می‌توان فقط با تغییر ابعاد X_1 و X_2 هندسه‌ی برج را تغییر داد و به‌ازای هر X_1 و X_2 معین، نیروهای اعضا و طراحی آن‌ها را تعیین کرد، و بالاخره از مقایسه‌ی وزن برج‌هایی که با X_1 و X_2 ‌های مختلف طرح شده‌اند کم‌ترین وزن را بین اشکال مختلف برج مشخص و به هندسه‌ی بهینه رسید. برای به دست آوردن بهترین هندسه می‌توان علاوه بر تغییر X_1 و X_2 ابعاد Y_1 تا Y_n را نیز تغییر داد. در این حالت باید توجه داشت که با افزایش تعداد متغیرها، حجم



شکل ۴. متغیرهای هندسی برج برای رسیدن به هندسه‌ی بهینه.



شکل ۵. توپولوژی های مختلف یک برج مخابراتی با هندسه ی ثابت.

جدول ۱. بارهای طراحی برج های مخابراتی براساس آیین نامه های مختلف.

آیین نامه	بارهای طراحی	ملاحظات
TIA/EIA-۲۲۲-F (۱۹۹۶)	بار مرده، باد (با روابط مجزا برای برج و آنتن) و یخ	روابط این آیین نامه با آیین نامه ی ASCE/SEIV-۰۵ مشابه است.
مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران	بار مرده و باد	در بند ۶-۱-۶-۴ آیین نامه ذکر شده است که محاسبه ی بار باد برای برج های با زمان تناوب بزرگ تر از یک با استفاده از ضوابط بیان شده در فصل مربوط به باد کافی نیست.
ASCE/SEIV-۰۵ (۲۰۰۶)	بار مرده، باد و یخ	-
DIN۴۱۳۱-(۱۹۹۱)	بار مرده، باد و یخ	-
آیین نامه ی هندوستان IS:۸۷۵	بار مرده، باد و یخ	-

جدول ۲. مقایسه ی روابط آیین نامه های مختلف طراحی در برابر باد.

آیین نامه	فشار باد (N/m^2)	نیروی باد وارد بر قطعه (N)
TIA/EIA-۲۲۲-F	$q_z = 0.613 K_z V^2$	$F = q_z G_H [C_{FAE} + \sum(C_{AA})]$
مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران	$q_0 = 0.105 V^2$ $q_z = K_z \cdot C_f \cdot q_0$	$F = q_z A$
ASCE/SEIV-۰۵	$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I$	$F = q_z G C_f A$
DIN۴۱۳۱-(۱۹۹۱)	$q_z = q_0 + 0.103 z$	$F = c_{fi} q_z A$
آیین نامه ی هندوستان IS : ۸۷۵	$q_z = k_d k_a k_c q_0$ $V_z = V K_1 K_z K_{zt} I$ $q_0 = 0.16 V_z^2$	$F = C_f q_z A$

۱.۳. بارهای طراحی

در جدول ۱ بارهایی در نظر گرفته شده طبق آیین نامه های مختلف مورد اشاره، در طراحی برج های مخابراتی ملاحظه می گردد. در ادامه جزئیات محاسبه ی بارهای طراحی برج های مخابراتی براساس آیین نامه های مختلف مورد بحث قرار می گیرند.

۲.۳. بار باد

در جدول ۲ روابط محاسبه ی بار باد که از جمله بارهای مهم در طراحی برج های مشبک فلزی است، براساس آیین نامه های مورد بررسی در این پژوهش ارائه شده است.

تعریف پارامترهای به کار رفته در جدول ۲ عبارتند از: F نیروی اعمال شده

جدول ۳. مقایسه‌ی روابط بار یخ براساس آیین‌نامه‌های مختلف مورد بررسی.

آیین‌نامه	بار برف و یخ
TIA/EIA-۲۲۲-F	ضخامت یخ به صورت شعاعی و یکنواخت دورتادور مقطع اعضا در نظر گرفته می‌شود. یخ به دو صورت: متراکم با چگالی ۸۷۸، و معمولی با چگالی ۴۷۷ کیلو نیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود.
مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران	-
ASCE/SEI۷-۰۵	بار یخ با توجه به وزن و سطح آن از روابط زیر تعیین می‌شود: $A_s = \pi r^2$, $V_i = \pi t_d A_s$ و $A_i = \pi t_d (D_c + t_d)$ $t_d = 2 t I_i f_z (K_{zt})^{0.25}$
DIN۴۱۳۱-(۱۹۹۱)	یخ‌زدگی به صورت شعاعی و یکنواخت فرض می‌شود. شدت یخ‌زدگی به محل برج بستگی دارد و با نظر کارفرما تعیین می‌شود.
آیین‌نامه‌ی هندوستان IS : ۸۷۵	بارهای ناشی از یخ باید با فرض پوشش یخ براساس شرایط آب و هوایی و تجربیات محلی محاسبه شوند.

جدول ۴. مقایسه‌ی ترکیبات بارگذاری آیین‌نامه‌های مختلف مورد بررسی.

آیین‌نامه	ترکیبات بار
TIA/EIA-۲۲۲-F	$1 - D + W_0, 2 - D + 0.75W_I + I$
مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران	$1 - D + W_0$
ASCE/SEI۷-۰۵	$1 - D + W_0, 2 - D + 0.75W_I,$ $3 - D + 0.75W_I + 0.75W_I, 4 - 0.6D + 0.75W_I + 0.75W_I$
DIN۴۱۳۱-(۱۹۹۱)	$1 - D + W_0$ در حضور بار یخ، بار باد باید بادر نظر گرفتن ۷۵٪ فشار مبنا محاسبه شود.
آیین‌نامه‌ی هندوستان IS : ۸۷۵	$1 - D + W_0, 2 - D + W_I + I$

D بار مرده، W_0 بار باد بدون در نظر گرفتن یخ، W_I بار باد محاسبه شده با توجه به محیط یخ زده اعضا، I بار یخ (وزن یخ).

۵.۳. ترکیبات بارگذاری

در تمام آیین‌نامه‌های مورد بررسی اثر بار باد و بار مرده به طور همزمان بدون بار یخ در نظر گرفته شده است. در این آیین‌نامه‌ها احتمال وجود هم‌زمان بار یخ و باد به صورت کامل، بعید دانسته شده و ضریب ۰٫۷۵ برای بار باد در نظر گرفته شده است. لازم به توضیح است که آیین‌نامه‌ی بارگذاری ایران ضوابط خاصی را در مورد

باد (برحسب نیوتن)، q_z فشار و مکش باد در ارتفاع z از سطح متوسط زمین (برحسب نیوتن بر مترمربع)، q_0 فشار مبنای باد (برحسب نیوتن بر مترمربع)، G_H ضریب پاسخ تند باد^۵، C_f ضریب نیرو^۶ که در آیین‌نامه‌ی ایران «ضریب شکل» نامیده شده است، C_F ضریب نیروی سازه‌یی^۷، C_A ضریب نیروی اعمالی به اجزا و متعلقات غیرسازه‌یی^۸، A تصویر سطح تحت اثر باد بر روی صفحه عمود بر جهت وزش باد (برحسب مترمربع)، A_A تصویر سطوح رو به باد متعلقات خطی^۹ غیرسازه‌یی (برحسب مترمربع)، A_E تصویر مؤثر سطوح اعضای سازه‌یی در یک طرف برج (برحسب مترمربع)، K_z ضریب در معرض باد بودن که تابعی از ارتفاع محل محاسبه فشار باد و وضعیت عوارض سطح زمین و موانع اطراف است. در آیین‌نامه‌ی ایران به عنوان ضریب اثر تغییر سرعت^{۱۰} در نظر گرفته شده است. K_{zt} ضریب توپوگرافی^{۱۱}، K_d ضریب هدایتی باد^{۱۲}، K_a ضریب متوسط سطح^{۱۳}، K_c ضریب ترکیب^{۱۴}، K_1 ضریب ریسک^{۱۵}، c_f ضریب نیروی آیرودینامیک، I ضریب اهمیت^{۱۶}، V سرعت مبنای باد^{۱۷} در ارتفاع مورد نظر (z) (برحسب متر بر ثانیه)، V_z سرعت باد برای طراحی^{۱۸} در ارتفاع مورد نظر (z) (برحسب متر بر ثانیه).

۳.۳. بار برف و یخ

نظر به این‌که برج‌های مخابراتی غالباً در نقاط کوهستانی مرتفع و برف‌گیر نصب می‌شوند، و نیز به دلیل ارتفاع معمولاً زیاد این برج‌ها، به هنگام بارش برف و حتی باران، در اطراف اعضا برج برف و یخ انباشته می‌شود. در جدول ۳ بار یخ و برف منظور شده برای برج‌های مخابراتی طبق آیین‌نامه‌های مورد بررسی در این مطالعه ملاحظه می‌شود.

تعریف پارامترهای اشاره شده در جدول ۳ عبارت است از: A_s سطح مقطع قطعه‌ی پوشیده شده با یخ (برحسب مترمربع)، r شعاع دایره‌ی محاط بر قطعه‌ی پوشیده شده با یخ (برحسب متر)، A_i سطح قطعه‌ی پوشیده شده با یخ برای محاسبه‌ی نیروی باد (برحسب مترمربع)، t ضخامت اسمی یخ در ارتفاع ۱۰ متری (برحسب متر)، t_d ضخامت یخ محاسبه شده برای طراحی اعضا (برحسب متر)، V_i حجم یخ محاسبه شده برای طراحی اعضا (برحسب مترمکعب)، f_z ضریب ارتفاع^{۱۹}، I_i ضریب اهمیت، K_{zt} ضریب توپوگرافی، D_c قطر دایره‌ی محاطی مقطع عضو می‌باشد.^[۸]

۴.۳. بارهای ناشی از زلزله

با توجه به کم بودن جرم برج‌های مشبک فلزی در مقایسه با سطح بادگیر آن‌ها، نیروهای ناشی از زلزله که متناسب با جرم سازه می‌باشند، نسبت به بارهای ناشی از وزش باد مقادیر کوچک‌تری دارند. از این رو آیین‌نامه‌های بارگذاری غالباً به بارهای ناشی از زلزله در طراحی برج‌های مشبک فلزی نمی‌پردازند. هرچند در تحقیق انجام شده در مورد اثر زلزله بر روی برج‌های مشبک فلزی خودایستا،^[۱] نشان داده شده در مواردی که جرم سنگینی در بالای برج قرار می‌گیرد نیروهای ناشی از زلزله می‌توانند در طراحی سازه‌ی برج مؤثر و تعیین‌کننده باشند. آتن‌هایی که روی برج‌های مخابراتی نصب می‌شوند، معمولاً دارای جرم زیادی نمی‌باشند. از این رو بار ناشی از زلزله بر روی برج‌های مشبک فلزی جز در موارد خاص ناچیز است.

بار یخ بر روی برج‌های مخابراتی ارائه نمی‌کند. آیین‌نامه‌ی هند نیز در مورد ترکیب بار باد و یخ محدودیتی اعمال نکرده است. جدول ۴ تیرکیبات بارگذاری مورد استفاده در طراحی برج‌های مخابراتی، طبق چهار آیین‌نامه مورد بررسی در این نوشتار را نشان می‌دهد.

۶.۳. مقایسه‌ی آیین‌نامه‌های مختلف طراحی برج در برابر باد

برای مقایسه و درک بهتر تفاوت بین آیین‌نامه‌های طراحی مطرح شده در قسمت‌های قبلی، نیروی باد با سرعت 13° km/h وارد بر یک قطعه‌ی ۱ متری از نبشی با پهنای ۱۰ سانتی‌متر در ارتفاع 4° متری از یک برج ۸۱ متری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از محاسبه‌ی بار باد وارده بر این نبشی بر مبنای آیین‌نامه‌های مختلف در جدول ۵ ارائه شده است.

چنان‌که مشاهده می‌شود بیشترین نیروی به دست آمده مربوط به آیین‌نامه‌ی ایران و کم‌ترین نیرو مربوط به آیین‌نامه‌ی ASCE/SEIV-05 آمریکاست. با توجه به این که آیین‌نامه‌ی TIA/EIA-222-F، آیین‌نامه‌ی شناخته‌شده در زمینه‌ی طراحی برج‌های مخابراتی است و در این تحقیق نیز از آن برای طراحی برج‌ها استفاده شده، سایر آیین‌نامه‌ها با این آیین‌نامه مقایسه شده‌اند. چنان‌که در جدول ۵ مشاهده می‌کنید، کم‌ترین اختلاف مربوط به آیین‌نامه‌ی هند است که دارای اختلاف ۳ درصدی با آیین‌نامه‌ی TIA/EIA-222-F است. بعد از آیین‌نامه‌ی هند نزدیک‌ترین مقدار مربوط به آیین‌نامه‌ی آلمان است که اختلافی $28/6\%$ درصدی با این آیین‌نامه دارد. علت این اختلاف وابستگی مقدار فشار باد با ارتفاع محل از سطح دریاست.

همچنین مقدار به دست آمده از آیین‌نامه‌ی ASCE/SEIV-05 اختلاف زیادی با آیین‌نامه‌ی TIA/EIA-222-F دارد. به نظر می‌رسد علت این اختلاف در این است که، علی‌رغم مشابهت روابط این آیین‌نامه با آیین‌نامه‌ی TIA/EIA-222-F، ضریبی در این آیین‌نامه وجود دارد که غالباً کاهشدهنده است و آیین‌نامه‌ی TIA/EIA-222-F فاقد این ضرایب می‌باشد. آیین‌نامه‌ی ایران برخلاف آیین‌نامه‌ی ASCE/SEIV-05 مقدار بسیار بالایی را به دست می‌دهد و از سایر آیین‌نامه‌ها کاملاً متمایز است. علت این اختلاف زیاد، چنان‌که در متن آیین‌نامه نیز به آن اشاره شده، وجود ضریبی است که بیشتر برای ساختمان‌ها مناسب بوده و برای سازه‌ی مانند برج ممکن است دقت کافی نداشته باشند.

جدول ۵. مقایسه‌ی عددی آیین‌نامه‌های مختلف طراحی در برابر باد.

آیین‌نامه	فشار باد (N/m^2)	نیروی باد وارد بر قطعه (N)	درصد اختلاف
TIA/EIA-222-F	۱۱۸۳٫۷۳	۲۹۸٫۹۶	۰
مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران	۸۴۵	۴۳۲٫۶۵	۴۴٫۷۲
ASCE/SEIV - 05	۸۲۹٫۴	۱۶۲	-۴۵٫۸
DIN 4131 - (1991)	۲۲۰۰	۲۱۳٫۴۴	۲۸٫۶
آیین‌نامه‌ی هندوستان IS : 875	۱۲۶۰٫۳۲	۲۸۹٫۹	-۳

۷.۳. ضوابط خاص طراحی

باتوجه به ویژگی‌های خاص عملکردی و حساسیت آنتن‌های مخابراتی نسبت به جهت تنظیم شده برای آن‌ها و همچنین اهمیت حفظ ارتباطات مخابراتی به‌ویژه در هنگام وقوع حوادث و بحران‌ها، در طراحی سازه‌ی برج‌های مخابراتی ضوابط خاصی، افزون بر ضوابط معمول طراحی سازه‌های فلزی، وضع شده است.

آیین‌نامه‌ی (1996) TIA/EIA-222-F برای سازه‌های با ارتفاع کم‌تر از ۲۱۳ متر، تنش مجاز را به مقدار 23% افزایش می‌دهد. همچنین محدودیت‌های لاغری اعضا طبق این آیین‌نامه عبارت است از:

- برای اعضای مربوط به پایه‌های برج (Leg): 150° ؛
- برای اعضای مربوط به مهاربندهای برج (Brace): 200° ؛
- برای اعضای اضافی (Redundant): 250° .

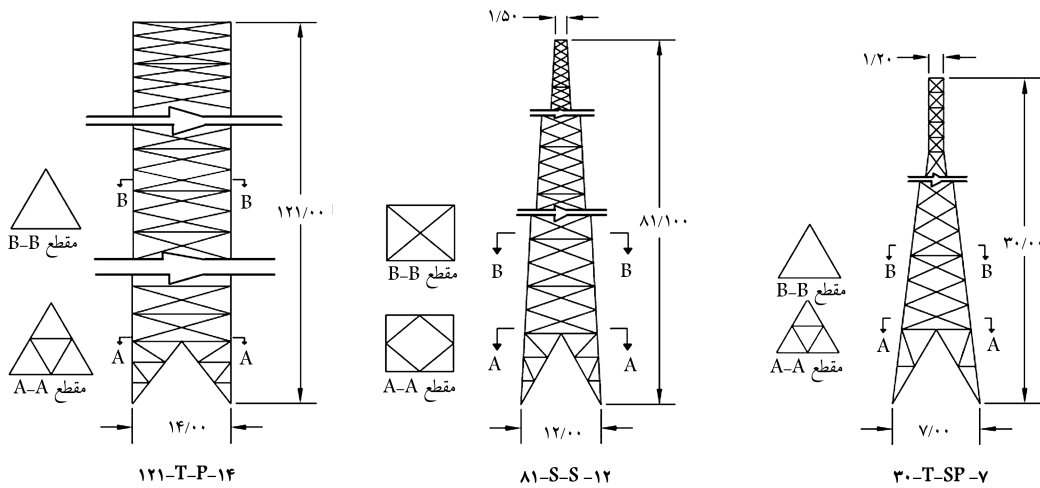
محدودیت‌های مربوط به جابه‌جایی و دوران برج، باید براساس توصیه‌های شرکت سازنده‌ی آنتن رعایت شود. در صورت عدم وجود ضوابط خاص از طرف شرکت سازنده، باید مقادیر عمومی ذکر شده مطابق برخی آیین‌نامه‌ها -- از جمله آیین‌نامه‌ی (1996) TIA/EIA-222-F -- در نظر گرفته شوند.

۴. تحلیل و طراحی برج‌های مخابراتی به منظور تعیین

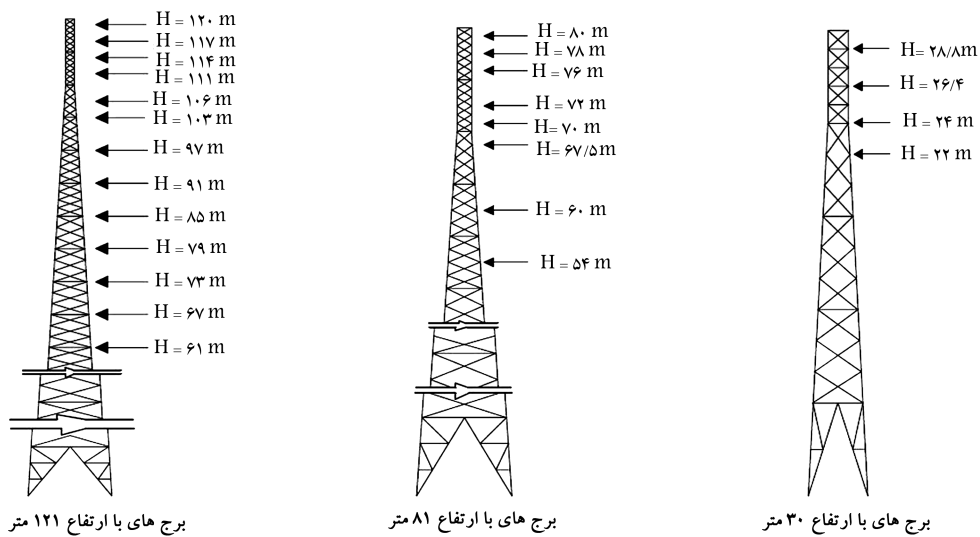
هندسه‌ی بهینه‌ی آن‌ها

در این نوشتار تحلیل و طراحی برج‌های خودایستا با مقاطع عرضی و طولی مختلف، و با ارتفاع‌ها و عرض مقطع‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاطع عرضی مورد بررسی مثلثی و مربعی‌اند. برای این برج‌ها سه شکل مقطع طولی متداول یعنی برج‌های با مقطع ثابت از پائین تا رأس (مشموری)، برج‌های با شیب ثابت از پائین تا رأس، و برج‌های با شیب ثابت تا ارتفاعی معین به همراه یک قسمت مشموری در بالای برج انتخاب شده است. تمامی اشکال مورد اشاره برای برج‌ها با سه ارتفاع 30° ، 81° و 121° متر تحلیل و طراحی شده‌اند. برای رسیدن به کمینه وزن سازه‌ی برج یا به عبارتی بهینه‌سازی اندازه‌ی مقطع مناسب برای اعضا، تحلیل و طراحی هر برج به دفعات و براساس فهرستی از گزینه‌های مقاطع پروفیل‌های استاندارد قابل انتخاب برای مقطع اعضا صورت گرفته است. در بسیاری از نرم‌افزارهای تحلیل و طراحی سازه‌های فلزی، نظیر [10] Sap 2000 که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، گزینه‌ی به‌عنوان انتخاب خودکار وجود دارد که عملیات بهینه‌سازی مقطع اعضا به‌کمک آن صورت می‌گیرد.

برای نام‌گذاری برج‌های مورد بررسی در این نوشتار از یک نام چهاربخشی با شکل عمومی H-CS-LS-D، استفاده شده است. در این نام‌گذاری H ارتفاع برج است که می‌تواند یکی از اعداد 30° ، 81° یا 121° متر باشد. همچنین نماد مربوط به شکل مقطع عرضی است؛ چنانچه این مقطع عرضی مربعی باشد به جای CS حرف S (مخفف Square) و در صورتی که مقطع عرضی مثلثی باشد به جای آن حرف T (مخفف Triangle) قرار می‌گیرد. نماد LS نیز مربوط به شکل مقطع طولی است که گاهی به جای آن حروف P، S، یا SP قرار می‌گیرد. نماد S (مخفف Slope) برای نشان دادن مقطع طولی برجی به‌کار می‌رود که دارای شیب ثابت در مقطع طولی است؛ نماد P (مخفف Prismatic) برای نشان دادن برجی که مقطع طولی آن شیب نداشته و در واقع دارای یک مقطع عرضی ثابت در تمام ارتفاع برج است به‌کار می‌رود و در نهایت از نماد SP برای مشخص کردن برج‌هایی که



شکل ۶. نام‌گذاری سه نمونه برج مخابراتی با مقاطع طولی و عرضی متفاوت.



شکل ۷. محل اعمال بار آنتن‌ها بر روی برج‌های ۱۲۱، ۸۱ و ۳۰ متری.

مقاطع اعضاء برج‌های مخابراتی موضوع طراحی از پروفیل‌های نبشی استاندارد انتخاب شده‌اند. تمام اعضاء از جنس فولاد ST۳۷ با حد جاری شدن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، با مدول کشسانی $10^6 \times 2/1$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و وزن مخصوص ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند. اتصالات اعضاء به یکدیگر و اتصال برج به پی آن نیز مفصلی در نظر گرفته شده است.

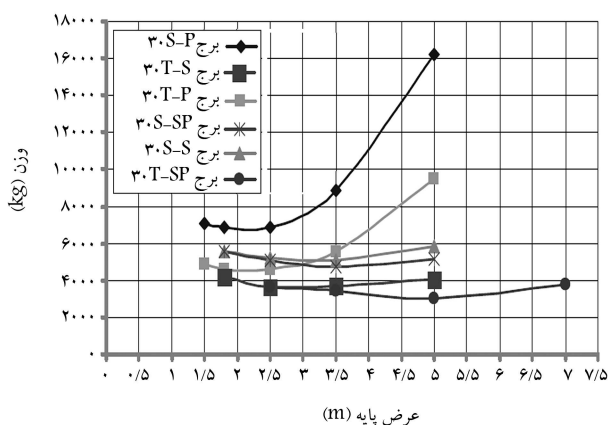
دارای مقطع طولی شیب‌دار تا ارتفاع معین هستند و سپس عرض مقطع‌شان ثابت می‌شود، بهره می‌گیرند. به جای حرف D نیز در نام برج، عرض پایه‌ی آن که از ۱/۵ تا ۱۴ متر تغییر می‌کند، قرار می‌گیرد. در شکل ۶ سه نمونه برج و نام آن‌ها براساس سیستم نام‌گذاری مورد اشاره ملاحظه می‌شود.

۱.۴. تحلیل و طراحی

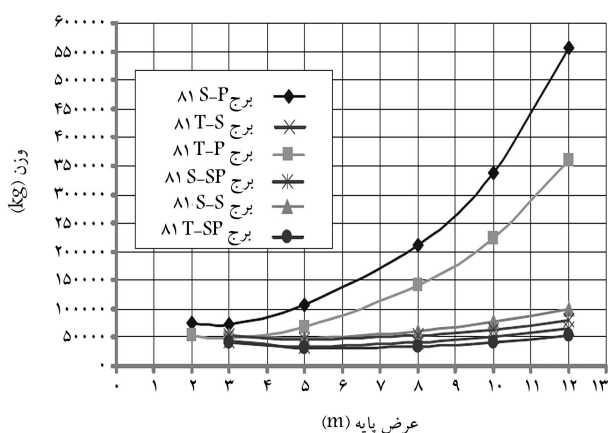
۲.۴. روش بهینه‌یابی

بهینه‌سازی توپولوژی، هندسه و اندازه‌ی مقاطع اعضاء یک سازه یکی از پیچیده‌ترین و مشکل‌ترین و در عین حال یکی از جالب‌ترین موضوعات در مهندسی سازه است. در گذشته برای حل این قبیل مسائل روش‌هایی در مهندسی بهینه‌سازی ارائه شده که به دلیل محدودیت‌هایی که داشته‌اند برای سازه‌های با مقیاس بزرگ و در طراحی‌های واقعی کمتر به کار گرفته شده‌اند. امروزه با وجود رایانه‌های پرسرعت و استفاده از روش‌های تکاملی در بهینه‌سازی، از جمله الگوریتم‌های ژنتیکی، امکان بهینه‌سازی توپولوژی و هندسه سازه‌ها علاوه بر بهینه‌کردن مقاطع اعضاء آنها بیش از گذشته میسر شده است. علاوه بر تحقیق حاضر، پژوهش

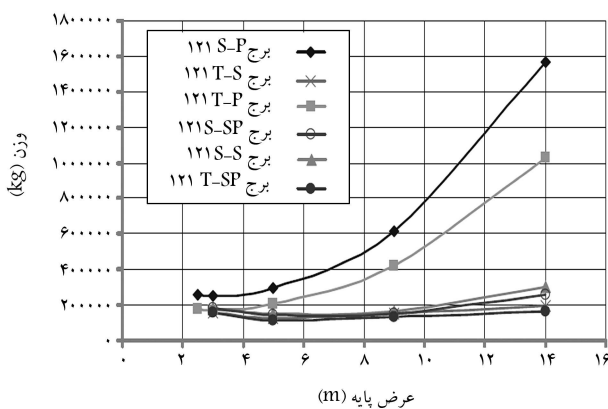
برج‌های مخابراتی مقایسه شده مطابق با ترکیبات بارگذاری شرح داده شده در بند ۵.۳ بارگذاری شده‌اند. علاوه بر بار مرده‌ی اسکلت، باد و یخ، بار مرده‌ی آنتن‌ها نیز بر روی برج‌ها اثر داده شده است. در شکل ۷ محل اعمال بار آنتن‌ها بر روی برج‌ها به صورت شماتیک نشان داده شده است. تحلیل و طراحی برج‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ و براساس آیین‌نامه‌ی AISC-ASD^{۱۱} آمریکا و به روش تنش مجاز صورت پذیرفته است. سرعت باد برای طراحی ۱۳۰ km/h و برای محاسبه‌ی تغییر مکان‌ها ۱۰۰ km/h در نظر گرفته شده است. ضخامت یخ نیز ۱۵ میلی‌متر منظور شده، و برای طراحی از فولاد ST۳۷ استفاده شده است.^[۱۱]



الف) تغییرات وزن برج‌های با ارتفاع ۳۰ متری؛



ب) تغییرات وزن برج‌های با ارتفاع ۸۱ متری؛



ج) تغییرات وزن برج‌های با ارتفاع ۱۲۱ متری.

شکل ۸. تغییرات وزن برج‌های ۳۰، ۸۱ و ۱۲۱ متری بر مبنای عرض پایه.

مکان افقی پیروی می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که چرخش برج‌های مربعی از برج‌های مثلثی با مقطع طولی مشابه همواره کم‌تر است؛ به‌طور کلی می‌توان گفت که تمام برج‌های مربعی نسبت به برج‌های مثلثی چرخش کم‌تری دارند. نکته‌ی قابل توجه دیگر حساسیت بیشتر برج‌های مثلثی نسبت به چرخش است، به‌طوری که با کاهش عرض پایه شدت افزایش چرخش در برج‌های مثلثی بسیار بیشتر از برج‌های مربعی است و نمودارهای برج‌های مثلثی از برج‌های مربعی فاصله‌ی بیشتری می‌گیرند.

دیگری در زمینه‌ی بهینه‌سازی هندسه و توپولوژی برج‌های مخابراتی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی در دست تهیه است، در نوشتار حاضر صرفاً با استفاده از مقایسه عددی نتایج تحلیل و طراحی ۸۴ برج مخابراتی هندسه بهینه آنها تعیین شده است.

در این تحقیق ۸۴ برج با توپولوژی ثابت، مطابق نمونه‌هایی که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود با مقاطع عرضی، طولی و ابعاد مختلف در سه ارتفاع ۳۰، ۸۱ و ۱۲۱ متر مورد بررسی قرار گرفته و هندسه بهینه برای هر یک از ارتفاع‌های مزبور به دست آمده است. براساس نتایج به دست آمده، تغییرات وزن برج‌ها نسبت به تغییرات عرض پایه‌ی آنها، در دامنه‌ی مورد بررسی، از منحنی‌هایی با یک نقطه‌ی کمینه‌گی مشخص پیروی می‌کند. از این رو برای به دست آوردن هندسه بهینه از روش‌های ریاضی پیچیده استفاده نشده، بلکه سعی شده است با استفاده از ترسیم نمودارهای تغییرات وزن برج نسبت به عرض پایه‌ی آن به‌کمک ۵ نقطه‌ی مناسب، عرض پایه‌ی بهینه (هندسه بهینه) به دست آورده شود.

۱.۲.۴. بررسی و مقایسه‌ی وزن برج‌ها

در شکل ۸ تغییرات وزن برج‌های فلزی مشبک مخابراتی با ارتفاع ۳۰، ۸۱ و ۱۲۱ متر و با مقاطع عرضی مثلثی و مربعی، و نیز با مقاطع ثابت و متغیر در ارتفاع به صورت تابعی از عرض پایه‌شان نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود برج‌های با مقطع عرضی مثلثی از برج‌های با مقطع عرضی مربعی که مقطع طولی یکسانی دارند سبک‌ترند. برج‌های منشوری -- S-P (۱۲۱ یا ۸۱) ۳۰ و T-P (۱۲۱ یا ۸۱) ۳۰ -- دارای بیشترین و برج‌های با مقطع طولی مرکب -- S-SP (۱۲۱ یا ۸۱) ۳۰ و T-SP (۱۲۱ یا ۸۱) ۳۰ -- دارای کم‌ترین مقدار وزن نسبت به سایر برج‌های با مقطع عرضی مشابه‌اند. بررسی نتایج حاصله نشان می‌دهد که برج‌های مثلثی با مقطع طولی مرکب یا T-SP (۱۲۱ یا ۸۱) ۳۰ نسبت به سایر برج‌ها وزن کم‌تری دارند. در بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش ابعاد عرض پایه فاصله‌ی بین نمودارهای وزن برج‌های با مقطع عرضی مشابه افزایش می‌یابد. چنان که در نمودارها مشخص است با افزایش ابعاد عرض پایه وزن برج‌های منشوری با شدت بیشتری افزایش می‌یابد، به‌طوری که نمودار وزن برج‌های مذکور از سایر برج‌های هم‌گروه خود کاملاً جدا شده و فاصله می‌گیرد. علت این امر این است که با افزایش عرض پایه طول اعضای برج افزایش یافته و نسبت لاغری، KL/r ، در طراحی اعضا حاکم می‌شود. به این ترتیب از تمام ظرفیت مقاومتی مقطع اعضا استفاده نمی‌شود و این موجب افزایش وزن قابل توجه برج‌های با مقطع ثابت منشوری نسبت به سایر برج‌ها می‌شود. با کاهش عرض پایه نمودار وزن برج‌ها به هم نزدیک می‌شود، زیرا با کاهش عرض پایه و با توجه به ثابت بودن عرض مقطع در قسمت بالای برج، شیب برج‌های غیرمنشوری کاهش یافته و در واقع مقطع طولی این برج‌ها نیز به شکل منشوری نزدیک‌تر می‌شود. نمودارهای الف تا ج در شکل ۸ نشان می‌دهند که بیشترین کاهش وزن برج‌های با مقطع مثلثی نسبت به برج‌های با مقطع مربعی برای ارتفاع ۳۰، ۸۱ و ۱۲۱ متری به ترتیب معادل ۴۱/۶، ۳۵/۴ و ۳۴/۲۵ درصد است. این مقادیر به‌خوبی نشان‌دهنده‌ی تأثیر نوع مقطع انتخاب‌شده در میزان صرفه‌جویی در وزن سازه‌اند.

۲.۲.۴. بررسی و مقایسه‌ی چرخش برج‌ها

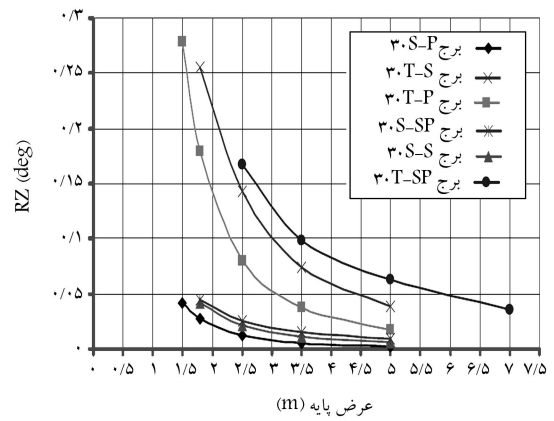
در شکل (۹ الف، ب، ج) نمودار چرخش مقطع فوقانی برج‌های تحت بررسی حول محور قائم نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود نمودارهای چرخش برج‌ها بر مبنای عرض پایه‌ی آنها، جز در برج‌های ۱۲۱ متری مثلثی، از روند تغییر

و در عرض پایه ۵ متر جهت نمودار تغییر کرده و مقدار چرخش در محل آنتن‌ها کاهش می‌یابد، به طوری که در عرض پایه‌های کم‌تر از ۳ متر میزان چرخش برج‌های مربعی مشابه نیز کم‌تر می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که علت این رفتار افزایش چرخش مثبت ناشی از آنتن‌های در ارتفاع پائین برج با کاهش عرض پایه است. کم‌تر بودن میزان چرخش برج‌های مثلی در عرض پایه‌های کم‌تر از ۳ متر نشان‌دهنده برتری این برج‌ها در تحمل لنگر پیچشی نسبت به برج‌های مربعی نیست. کاهش زاویه‌ی پیچش برج در این مثال خاص ناشی از چرخش مثبت ناشی از آنتن‌های با سطح بادگیر وسیع نصب‌شده در قسمت‌های پائین برج است که سبب کاهش چرخش کلی برج در بالای آن شده است. بدیهی است در صورت تغییر چیدمان آنتن‌ها چرخش برج‌های مثلی به مراتب بیشتر از برج‌های مربعی خواهد بود.

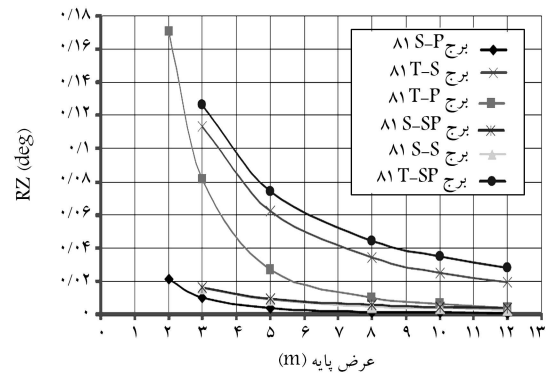
۳.۲.۴. بررسی و مقایسه‌ی تغییر مکان برج‌ها

در شکل ۱۰ تغییر مکان برج‌ها در راستای محورهای مختصات نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود با کاهش عرض پایه، مقدار تغییر مکان همواره افزایش می‌یابد. برای توجیه این رفتار برج می‌توان آن را به صورت یک تیر طره در نظر گرفت. روشن است که با کاهش ابعاد مقطع تیر، تغییر مکان نقاط مختلف آن تحت بارهای وارده افزایش می‌یابد. در بررسی روند افزایشی نمودارها شاهدیم که با کاهش عرض پایه، بر شیب نمودارها نیز افزوده می‌شود. برج‌های با مقطع عرضی مربعی دارای تغییر مکان کم‌تری نسبت به برج‌های مثلی با مقطع طولی مشابه‌اند. در مقایسه‌ی برج‌های با مقطع عرضی مشابه می‌بینیم که برج‌های با مقطع طولی منشوری، S(T)-P (۱۲۱ یا ۸۱) ۳۰، دارای کم‌ترین و برج‌های با مقطع طولی مرکب، S(T)-SP (۱۲۱ یا ۸۱) ۳۰، دارای بیشترین تغییر مکان‌اند. در برج‌های ۳۰ متری در عرض پایه ۵ متر به‌ظاهر در روند نمودارها اختلال ایجاد می‌شود. بررسی دقیق نمودارها مشخص می‌کند که اختلاف بین نمودارها کم‌تر از ۱ سانتی‌متر است و این مقدار در سازه‌ی بزرگی مانند برج قابل چشم‌پوشی است. حساسیت آنتن‌های نصب‌شده روی یک برج مخابراتی نسبت به انحراف از راستای قائم، یکی از عوامل مهم و تعیین‌کننده در انتخاب عرض مناسب پایه‌ی آن است. چنان‌که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، برج‌های ۳۰، ۸۱ و ۱۲۱ متری به ترتیب با عرض پایه‌های بیش از ۳/۵، ۵ و ۸ متر کم‌ترین شیب افزایش تغییر مکان را دارند و از این رو برای محدود کردن انحراف برج از راستای قائم گزینه‌های مناسبی هستند.

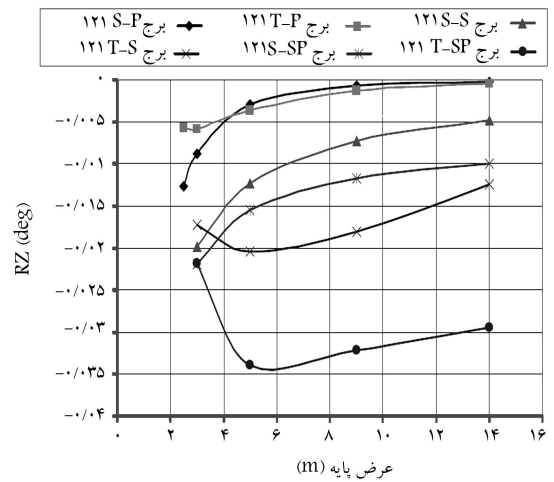
با در نظر گرفتن عوامل وزن، تغییر مکان و چرخش به نظر می‌رسد برج‌های با مقطع طولی منشوری به‌واسطه‌ی وزن بسیار بالا نسبت به سایر برج‌ها بهینه نیستند. وزن برج‌های مربعی نسبت به برج‌های مثلی بیشتر است، اما میزان تغییر مکان و به‌خصوص چرخش آن‌ها بسیار کم‌تر از برج‌های مثلی است. بنابراین در بارگذاری‌های سنگین و نامتقارن به‌منظور محدود کردن چرخش و تغییر مکان ممکن است به برج‌های مثلی ارجحیت داشته باشند. در گروه‌های برج‌های مربعی و مثلی، نمودارهای وزن، تغییر مکان و چرخش برج‌های S(T)-S (۱۲۱) یا S(T)-SP (۸۱) ۳۰ و S(T)-S (۱۲۱) یا S(T)-SP (۸۱) ۳۰ نزدیک به هم‌اند. براین اساس می‌توان گفت، اگرچه برج‌های S(T)-S (۱۲۱) یا S(T)-SP (۸۱) ۳۰ از برج‌های S(T)-S (۱۲۱) یا S(T)-SP (۸۱) ۳۰ سنگین‌ترند، اما در صورت وجود بارگذاری‌های سنگین یا نامتقارن، با توجه به تغییر مکان و چرخش کم‌تر برج‌های S(T)-S (۱۲۱) یا S(T)-SP (۸۱) ۳۰، اگر به‌جای افزایش ابعاد مقطع عرضی، شکل مقطع طولی را تغییر دهیم می‌توانیم طرح اقتصادی‌تری داشته باشیم.



الف) تغییرات چرخش مقطع فوقانی برج‌های ۳۰ متری حول محور قائم؛



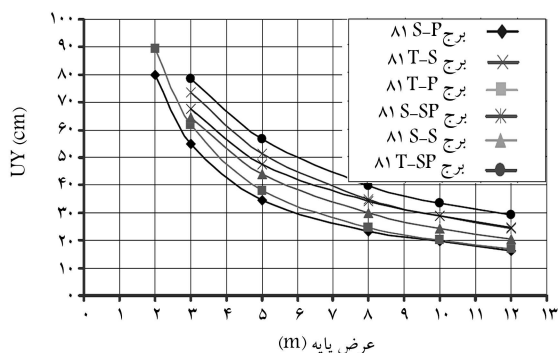
ب) تغییرات چرخش مقطع فوقانی برج‌های ۸۱ متری حول محور قائم؛



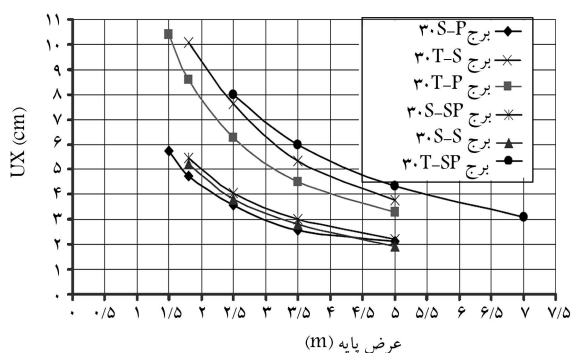
ج) تغییرات چرخش مقطع فوقانی برج‌های ۱۲۱ متری حول محور قائم.

شکل ۹. چرخش برج‌های ۳۰، ۸۱ و ۱۲۱ متری حول محور قائم بر مبنای عرض پایه.

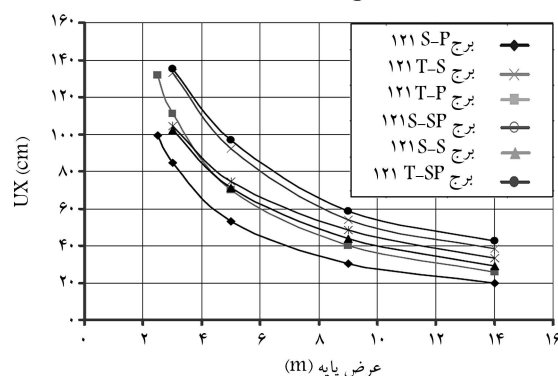
چرخش برج‌های ۱۲۱ متری برخلاف برج‌های ۳۰ و ۸۱ متری منفی بوده و در جهت عقربه‌های ساعت است. علت تفاوت چرخش برج‌های ۱۲۱ متری با برج‌های دیگر در چیدمان خاص آنتن‌هاست. برج‌های ۱۲۱ متری با مقطع عرضی مربعی از همان روند نمودارهای چرخش برج‌های ۳۰ و ۸۱ متری پیروی می‌کنند؛ در این برج‌ها نیز با کاهش عرض پایه مقدار چرخش افزایش می‌یابد و شیب نمودار چرخش بیشتر می‌شود. چرخش برج‌های ۱۲۱ متری با مقطع مثلی نیز در ابتدا با کاهش عرض پایه از روندی افزایشی پیروی می‌کند. با کاهش بیشتر عرض پایه



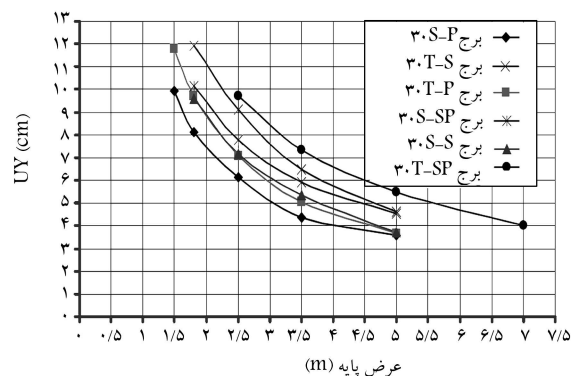
د) تغییر مکان راس برج های ۸۱ متری در راستای محور Y؛



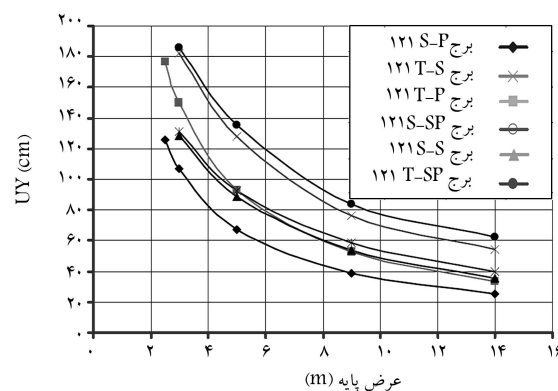
الف) تغییر مکان راس برج های ۳۰ متری در راستای محور X؛



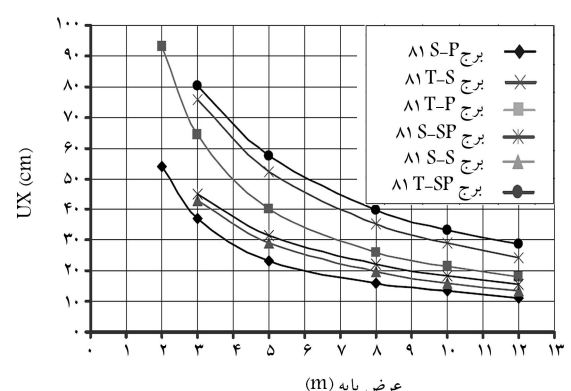
ه) تغییر مکان راس برج های ۱۲۱ متری در راستای محور X؛



ب) تغییر مکان راس برج های ۳۰ متری در راستای محور Y؛



و) تغییر مکان راس برج های ۱۲۱ متری در راستای محور Y.



ج) تغییر مکان راس برج های ۸۱ متری در راستای محور X؛

شکل ۱۰. تغییر مکان برج های ۳۰، ۸۱ و ۱۲۱ متری در جهات محورهای مختصات بر مبنای عرض پایه.

شیب دار و یک قسمت منشوری دارای کمترین وزن و بیشترین تغییر مکان و چرخش اند.

۴. تحت بارگذاری یکسان، برج های بهینه با مقطع طولی منشوری دارای بیشترین وزن و کمترین تغییر مکان و چرخش اند.

۵. با کاهش عرض پایه ی برج، مقدار وزن ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد اما مقدار تغییر مکان و چرخش همواره افزوده می شود.

۶. با توجه به وزن بسیار بالای برج های منشوری، استفاده از این برج ها کم تر توصیه می شود.

۷. تحت بارگذاری یکسان، چرخش برج های بهینه با مقطع مربعی نسبت به برج های مثلثی کم تر است و به نظر می رسد برج های بهینه با مقطع مربعی در عرض پایه های کوچک و در مواردی که چرخش دارای اهمیت است به برج های مثلثی ارجحیت داشته باشند.

۵. نتیجه گیری

با توجه به بررسی های به عمل آمده می توان درمورد طرح هندسی برج های مخبراتی خودایستا چنین گفت:

۱. تحت بارگذاری یکسان، وزن برج های بهینه با مقطع عرضی مثلثی نسبت به برج های با مقطع عرضی مربعی کم تر است.

۲. تحت بارگذاری یکسان، تغییر مکان برج های بهینه با مقطع عرضی مربعی نسبت به برج های با مقطع عرضی مثلثی کم تر است.

۳. تحت بارگذاری یکسان، برج های بهینه با مقطع طولی مرکب شامل یک قسمت

پانوشته

1. self-supporting towers
2. guyed masts
3. structural design optimization
4. Indian standard
5. gust response factor
6. force coefficient
7. structure force coefficient
8. linear or discrete appurtenance force coefficient
9. linear appurtenance
10. exposure coefficient
11. topographic factor
12. wind directionality factor
13. area averaging factor
14. combination factor
15. risk coefficient
16. importance factor
17. basic wind speed
18. design wind speed
19. height factor

منابع

1. Khedr Mohamed, A.H., *Seismic Analysis of Self-Supporting Latticed Telecommunication Towers*, PHD thesis, Department of civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Canada (1998).
2. Sullins, E.J., *Analysis of Radio Communication Towers*

- Subjected to Wind, Ice and Seismic Loadings*, PHD thesis, University of Missouri-Columbia (2006).
۳. پارسی‌راد، پرویز، سازه دکل‌ها، برج‌ها، دودکش‌ها، انتشارات فدک، تهران (۱۳۸۵).
 4. www.qom.iran-tejarat.com/News/Cat13/News_N10116.html.
 5. Mukhanov, K. and Leib, G. "Design of metal structures", Mir publisher, Moscow (1968).
 6. Kirsch, U. "Structural optimization fundamentals and applications", Springer-Verlag (1993).
 7. Nabeel, A.J. and Alaa, C.G. "Optimum design of square free-standing communication towers", *Journal of Constructional Steel Research*, **58**, pp 413-425 (2002).
 8. ASCE Standard, *American Society of Civil Engineers*, ASCE/SEI7-05 (2006).
 9. TIA/EIA Standard, *Telecommunications Industry Association*, copyright by the Electronic Industries Alliance 2005, TIA/EIA-222-F (1996).
 10. Indian Standard, *Wind Loads on Buildings and Structures- Proposed Draft & Commentary*, IS: 875 (part 3) (2004).

۱۱. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، انتشارات توسعه ایران، تهران (۱۳۸۶).
12. Sap2000 Help Manual, Sap2000 Advanced 11.0.0, University Avenue Berkeley, California, USA.
۱۳. شرکت ارتباطات سیار، معاونت فنی و مهندسی، مشخصات عمومی دکل‌های خودایستا، سایت‌های BTS، Ver ۱/۰-۴۰۲۰-MCCI- (۱۳۸۴).