

## مطالعه تغییرات ابعاد مقاطع دکل‌های مهار شده در تحلیل ایستایی

مجید برقیان  
سکینه تنهائی نمرور

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز  
کارشناس ارشد سازه، مهندسین مشاور فراز آب

### چکیده

یک برج مهار شده شامل یک دکل است که با کابل‌های مهاری پیش تنیده به طور جانبی نگه داشته می‌شود. در این مطالعه، تغییرات نیروهای محوری اعضای دکل شامل پایه‌ها، افقی‌ها، قطری‌ها و مقاطع آنها در ارتفاع بررسی می‌شود. تحقیق با تحلیل چندین برج که در معرض ترکیب بارهای مرده و باد است، با استفاده از برنامه کامپیوتری - نوشته شده (توسط نویسنده اول) - انجام گرفت. سپس بانرم افزار SAP2000 صحت مدل و نتایج کنترل گردید. در تحلیل، از اعضای خرپایی سه بعدی برای مدل سازی دکل استفاده شده و مهارها نیز با اجزای کابلی غیرخطی مدل‌سازی می‌شوند. نتایج تحلیل و طراحی نشان می‌دهند که نیروهای اعضای قائم با افزایش ارتفاع به میزان قابل توجهی تغییر می‌کنند لذا سطح مقطع پایه‌ها با افزایش ارتفاع می‌توانند کاهش یابند. همچنین تغییرات نیروهای محوری ماکزیمم اعضای افقی و قطری دهانه‌ها در ارتفاع چندان زیاد نبوده و می‌توان از تغییر مقطع آنها در ارتفاع صرف‌نظر نمود. کلمات کلیدی: دکل‌های مهار شده با کابل، تحلیل ایستایی غیر خطی دکل‌ها، دکل‌های مشبک.

## Studying of Guyed Mast Sections Variations in Static Analysis

M. Barghian Civil Engineering University of Tabriz  
S. Tanhayi Farazab Consulting Engineers

### Abstract

A guyed tower consists of a mast which is laterally supported by pre-tensioned guyed cables. In this study, the variations of axial forces in mast elements were investigated including chords, struts, diagonals and the changes of sections in elements in height, using several towers subjected to the combination of dead and wind load. Non-Linear analysis of all towers has been carried out using a finite element package - written by the former writer - and then the model and the results have been validated by Sap2000 package. The truss elements have been used to model the latticed mast. The guys have been modeled using non-linear cable elements. The results of analysis showed that the chord forces varied considerably with height increasing. Thus cross section of legs in mast can be reduced by height increasing. Also, the variations of maximum axial forces in diagonals and struts in panels are not significant in height; therefore the change of cross section of those members can be ignored in height.

**Key words:** Guyed towers, Non-linear static analysis of guyed towers, Latticed masts.

## ۱- مقدمه

دکل‌های مهار شده به لحاظ کارایی‌های ویژه‌ای که دارند علاوه بر استفاده در سیستم‌های مخابراتی در نگهداری سلول‌های خورشیدی، دودکش‌های طویل، آسیاب‌های بادی و احداث سکوی ساحلی و راهنما کاربردهای زیادی دارند.

ارتفاع دکل‌های مهار شده که تاکنون در کشورهای مختلف جهان ساخته شده بین ۱۰ الی ۶۰۰ متر متغیر است. این دکلها بوسیله مهارهایی که کابل‌هایی از جنس فولاد با مقاومت کششی زیاد بوده و در ترازهای مختلف به هسته آنها وصل شده‌اند مهار می‌گردند [۶].

دکل این‌گونه از سازه‌ها اغلب ترجیح داده می‌شود از تیرکهای لوله‌ای یا سازه‌های برجی شکل خرابایی با مقاطع مثلثی یا مربعی ساخته شوند که در عمل نیز مورد اخیر بیشتر مورد توجه بوده است. پایداری جانبی دکل‌های با مقطع مثلثی با سه مهار در هر تراز به صورت شعاعی و با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم تأمین می‌شود. این کار در دکل‌های با مقطع مربع با چهار مهار و زاویه ۹۰ درجه انجام می‌گیرد و در دکل‌های با مقطع لوله‌ای نیز بسته به مورد می‌توان از ۳ یا ۴ مهار در هر تراز استفاده نمود [۲].

محققین بسیاری در مورد دکل‌های مهار شده تحت بار باد به صورت استاتیکی کار کرده اند که فقط چند مورد برای نمونه ذکر می‌شود. بیرنر و فیشر [۸] پیچش دکل‌ها را برای حالت نامتقارن بررسی کردند. اسپارلینگ و همکارانش [۹ و ۱۰] اثر دینامیکی تندباد را بر دکل‌های مهار شده به شکل استاتیکی بکار بردند. میلار و برقیان [۱۱] رفتار فوج‌هشی کابل‌ها را در دکل‌ها بررسی کردند. جانز [۱۲] مرور فنی جامعی در مورد دکل‌های مهار شده تحت بار باد تا سال ۱۹۹۲ میلادی انجام داده است.

در این مقاله با توجه به ظاهر طره‌گونه دکل از یک طرف و وجود کابل‌های مهاری به عنوان تکیه‌گاههای جانبی آن از طرف دیگر روند تغییرات نیروهای محوری اعضای دکل و مقاطع آن در ارتفاع بررسی می‌گردد. در روند مطالعه اخیر چندین برج را اختیار و با تحلیل استاتیکی آنها در برابر باد و طراحی آنها، دیگرام نیروها را در ارتفاع برای اعضای دکل‌ها رسم نموده و روند تغییرات مقطع آنها را در ارتفاع بررسی می‌شود. در این مقاله تنها یک برج به عنوان نمونه آورده می‌شود.

## ۲- مدل مورد استفاده در تحلیل

مدل مورد استفاده در تحلیل مدل خرابایی است در این مدل، هر کابل - بسته به طول آن - با تعدادی اعضای کابلی سه بعدی و دو گرهی که فاقد قابلیت تحمل فشار است مدل می‌گردد. برای شرایط مرزی، پای دکل به صورت مفصلی فرض می‌شود که از جابجایی آن در سه جهت و نیز دوران پیچشی آن جلوگیری شده است [۵].

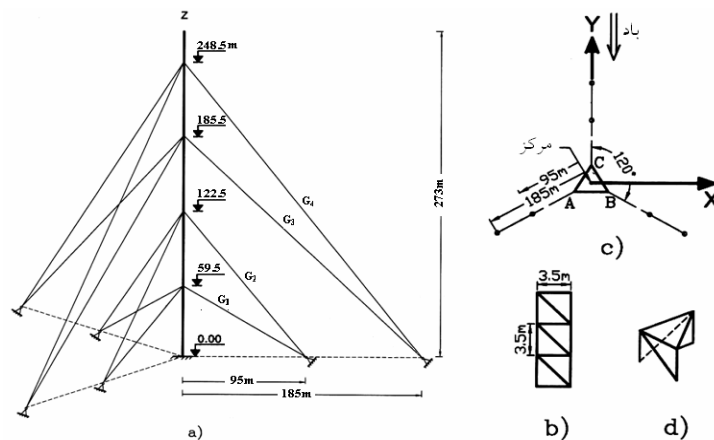
## ۳- تحلیل

برای بررسی روند کلی تغییرات نیروهای اعضای دکل در ارتفاع، برج مطابق شکل (۱) اختیار می‌شود.

سختی جانبی دکل‌ها با سه کابل مهاری در ترازهای مختلف تأمین می‌گردد که به صورت شعاعی با زوایای ۱۲۰ درجه نسبت به هم به پی متصلند. مدول الاستیسیته اعضای دکل و کابل‌ها به ترتیب برابر  $2/1E+6$  و  $1/6AE+6$  کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر مربع منظور گردیده است. نیروی پیش تنیدگی کابل‌ها T در کابل‌های  $G_1$  و  $G_2$  ۴۲۰۰، و در کابل‌های  $G_3$  و  $G_4$  ۸۳۵۰ کیلوگرم نیرو است.

برای بررسی روند کلی تغییرات نیروهای اعضای دکل در ارتفاع، لازم است با فرض مقاطع اولیه نیروهای ثقلی و بار باد محاسبه گردند. در محاسبه نیروهای ثقلی وزن مخصوص اعضای دکل و کابل‌ها به ترتیب ۷۸۵۰ و ۴۸۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب و در محاسبه بار استاتیکی باد، فشار مبنای باد برابر ۶۰۵ کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر مربع فرض شده است.

همچنین در محاسبه بار استاتیکی باد، بار باد را در سه جهت  $+X$ ،  $+Y$ ، و  $-Y$  در نظر گرفته و اثرات دینامیکی باد به صورت کاهش بار باد به اندازه ۲۵٪ بر روی هر یک از دهانه‌ها و نیز افزایش ۲۵٪ در طراحی ناحیه طره‌ای برج اعمال می‌گردد [۱]. بعد از تحلیل برج‌ها برای تمامی حالات فوق، منحنی پوش نیروهای اعضا را رسم کرده و مقاطع برای نیروهای حاصل از تحلیل، کنترل می‌شود. در صورتی که نیاز به طراحی مقاطع جدید باشد مراحل فوق، شامل محاسبه بار استاتیکی باد و بار مرده ناشی از وزن اعضا در گره‌ها، رسم منحنی پوش و کنترل مقاطع، تا زمانیکه مقاطع حاصل جوابگوی وضعیت موجود باشد تکرار می‌گردند. با در دست داشتن منحنی پوش برج‌ها، می‌توان روند تغییرات نیروهای اعضای دکل با مقطع ثابت را در ارتفاع مشاهده نمود.



شکل ۱- شکل هندسی برج (a) پروفیل (b) نما (c) مقطع عرضی (d) پانل نمونه

پوش اعضای دکل ترسیم گردید. منحنی‌های پوش حاصل برای اعضای قائم، افقی و قطری دکل با مقطع ثابت در برج به ترتیب در شکل‌های (۲) الی (۴) نشان داده شده است.

محور افقی این نمودارها، نیروی محوری ماکزیمم حاصل از تمام حالات بارگذاری را برای اعضای قائم، افقی و قطری در هر ارتفاع نشان می‌دهد که نیروی کششی در آنها مثبت فرض شده است. با توجه به منحنی‌های پوش ارائه شده در شکل‌های (۴) الی (۶)، تغییر مقاطع اعضای دکل در ارتفاع صورت می‌گیرد. نتایج حاصل و مقادیر ماکزیمم نیروهای فشاری و کششی اعضای دکل با مقطع متغیر برای برج در جدول‌های (۶) الی (۸) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مقاطع اعضاء برج

اعضاء	D <sub>1</sub> (cm)	D <sub>2</sub> (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	F <sub>c.al</sub> (Kgf)	F <sub>t.al</sub> (Kgf)
قائم	۱۶/۰	-	۲۰۱/۱	۲۳۸۵۸۸	۵۷۹۰۵۸
افقی	۸/۸۹	۷/۰۳	۱۳/۹	۱۴۲۹۱	۲۶۷۲۶
قطری	۱۱/۴۳	۱۰/۰۱	۲۳/۹	۲۰۶۹۱	۴۵۹۱۰
G <sub>1</sub>	۴/۵۰	-	۲۱/۶	-	۴۵۸۰۴
G <sub>2</sub>	۵/۲۵	-	۱۵/۹	-	۶۲۳۴۵
G <sub>3</sub>	۵/۷۵	-	۲۶/۰	-	۷۴۷۸۶
G <sub>4</sub>	۵/۷۵	-	۲۶/۰	-	۷۴۷۸۶

جدول ۲- نیروی فشاری ماکزیمم اعضاء دکل

تغییر مقاطع اعضای دکل در ارتفاع با توجه به منحنی‌های پوش نهایی حاصل صورت می‌گیرد. در روند فوق در هر مرحله که از یک ارتفاع به بعد، مقاطع تغییر یابد بار باد وارد برگره‌های مربوط به ترازهای بالاتر را مجدداً محاسبه نموده و بعد از تحلیل، کلیه مقاطع دکل برای وضع موجود کنترل می‌شوند. در صورت نیاز به طراحی مجدد، مراحل فوق شامل بارگذاری، تحلیل و کنترل تکرار می‌گردند. بدین ترتیب بعد از چند مرحله تکرار، مقاطع نهایی با بارها و منحنی پوش مربوط برای هر برج به دست می‌آید.

### ۵- نتایج تحلیل

نتایج حاصل از تحلیل و طراحی برج مذکور شامل مشخصات مقاطع اعضای برج، مقادیر نیروی فشاری و کششی ماکزیمم اعضای دکل با مقطع ثابت به ترتیب در جدول‌های (۱) الی (۳) ارائه شده است.

در این جدول‌ها:

D<sub>1</sub>: قطر خارجی

D<sub>2</sub>: قطر داخلی

A: سطح مقطع عضو

F<sub>c.al</sub>: نیروی فشاری مجاز

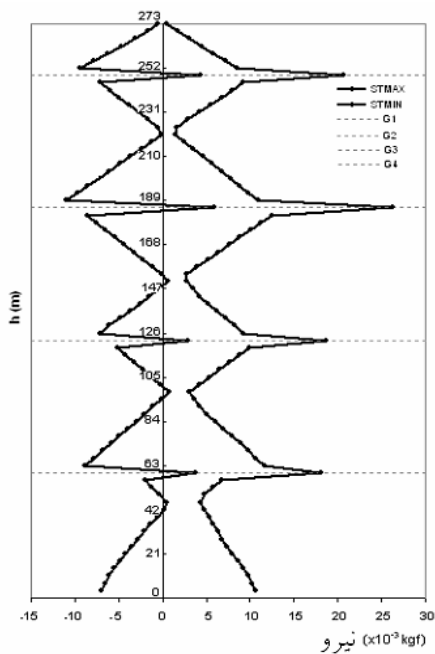
F<sub>t.al</sub>: نیروی کششی مجاز

F<sub>c.av</sub>: نیروی فشاری ماکزیمم

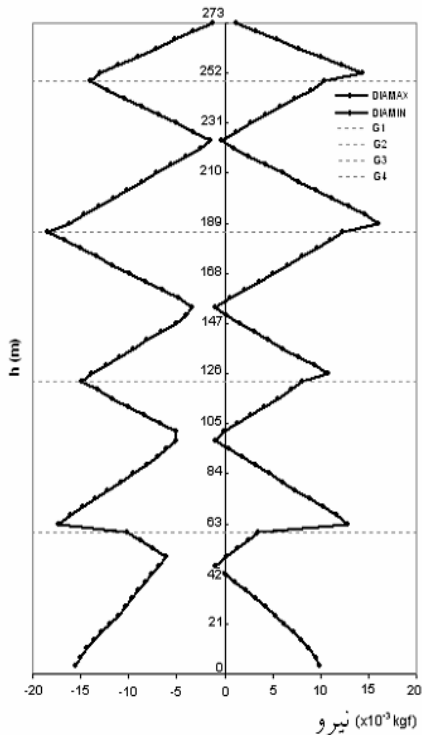
F<sub>t.av</sub>: نیروی کششی ماکزیمم

Z: محور مختصات (در اینجا ارتفاع دکل)

همانطور که گفته شد برای بررسی روند تغییرات نیروهای اعضای دکل و مقاطع آن در ارتفاع، منحنی‌های



شکل ۳- منحنی پوش اعضای افقی در برج

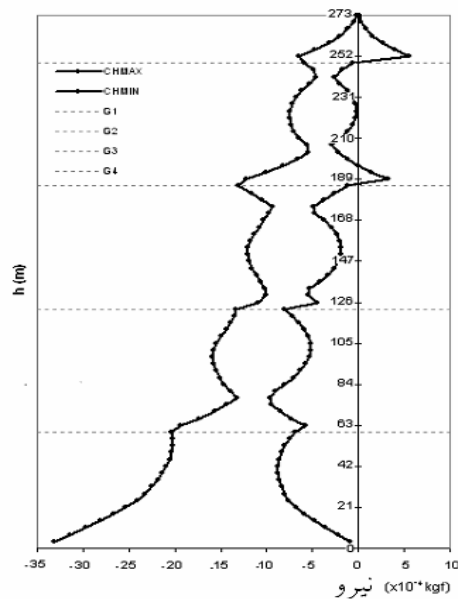


شکل ۴- منحنی پوش اعضای قطری در برج

حالت بارگذاری بحرانی	$F_{c,av}$ (Kgf)	اعضاء
بار باد در جهت Y	-۳۳۱۷۹۰	قائم
بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه سوم	-۱۰۹۷۱	افقی
بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه چهارم	-۱۸۴۶۱	قطری

جدول ۳- نیروی کششی ماکزیمم اعضاء دکل

حالت بارگذاری بحرانی	$F_{t,av}$ (Kgf)	اعضاء
بار باد در جهت -Y با افزایش ۲۵٪ در ناحیه طره‌ای	۵۵۵۴۶	قائم
بار باد در جهت Y با کاهش ۲۵٪ در دهانه اول	۲۶۲۴۲	افقی
بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه سوم	۱۶۰۸۳	قطری



شکل ۲- منحنی پوش اعضای قائم در برج

جدول ۶- نیروی کششی ماکزیمم اعضاء دکل در برج با مقطع متغییر

اعضاء	Z (m)	F <sub>L,av</sub> (Kgf)	حالت بارگذاری بحرانی
قائم	۰-۶۶/۵	۱۹۴۵۷	بار باد در جهت Y- با کاهش ۲۵٪ در دهانه چهارم
	۶۶/۵-۱۹۶	۳۳۶۶۳	بار باد در جهت Y-
	۱۹۶-۲۷۳	۴۹۸۲۱	بار باد در جهت Y- با افزایش ۲۵٪ در ناحیه طره‌ای
افقی	۰-۶۶/۵	۱۶۶۲۰	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه چهارم
	۶۶/۵-۱۹۶	۲۳۷۳۹	بار باد در جهت Y با کاهش ۲۵٪ در دهانه اول
	۱۹۶-۲۷۳	۱۸۰۱۲	بار باد در جهت Y با کاهش ۲۵٪ در دهانه دوم
قطری	۰-۶۶/۵	۱۱۳۷۵	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه چهارم
	۶۶/۵-۱۹۶	۱۳۹۱۷	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه سوم
	۱۹۶-۲۷۳	۱۲۶۰۷	بار باد در جهت X با افزایش ۲۵٪ در ناحیه طره‌ای

#### ۷- بحث در نتایج تحلیل استاتیکی

##### الف) نیروی محوری پایه‌ها

مطابق شکل (۲)، نیروی محوری اعضاء قائم در دهانه اول سریعاً از بیشترین مقدار در پای دکل به کمترین مقدار در محل برخورد مهارهای تراز اول می‌رسد و در دهانه‌های بالاتر نیز وجود مهارهای سبب می‌شود تا نیروی محوری در محل برخورد مهارهای کمترین مقدار و در وسط دهانه بیشترین مقدار را داشته باشد. آنچه روشن است این که در اعضاء قائم فشار تعیین کننده بوده و نیروی فشاری ماکزیمم اعضاء قائم در دهانه‌ها از پایین به بالا کاهش می‌یابد.

##### ب) نیروی محوری اعضاء قطری

منحنی‌های پوش ارائه شده در شکل (۴) نشان می‌دهد که نیروی محوری اعضاء قطری در دهانه اول از بیشترین مقدار در پای دکل به کمترین مقدار خود در نزدیکی محل برخورد مهارهای سبب می‌رسد و در دهانه‌های دیگر نیز نیروی محوری در وسط دهانه‌ها کمترین مقدار و در محل برخورد مهارهای بیشترین مقدار را دارا است.

جدول ۴- مشخصات مقاطع اعضاء برج با مقطع متغییر

اعضاء	Z (m)	D <sub>1</sub> (cm)	D <sub>2</sub> (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	F <sub>C,al</sub> (Kgf)	F <sub>L,al</sub> (Kgf)
قائم	۰-۶۶/۵	۱۵/۵۰	-	۱۸۸/۷	۳۰۷۱۹۰	۵۴۳۳۳۲
	۶۶/۵-۱۹۶	۱۲/۵۰	-	۱۲۲/۷	۱۴۴۴۸۰	۳۵۳۴۲۹
	۱۹۶-۲۷۳	۱۰/۵۰	-	۸۶/۶	۷۱۹۲۷	۲۴۹۳۷۹
افقی	۰-۲۷۳	۸/۸۹	۸/۱۷	۹/۶	۱۰۰۲۰	۱۸۵۲۳
قطری	۰-۲۷۳	۱۱/۴۳	۱۰/۳۱	۱۹/۱	۱۶۸۵۴	۳۶۷۱۷
G <sub>1</sub>	۰-۵۹/۵	۴/۰	-	۱۲/۶	-	۳۶۱۹۱
G <sub>2</sub>	۰-۱۲۲/۵	۵/۰	-	۱۹/۶	-	۵۶۵۲۹
G <sub>3</sub>	۰-۱۸۵/۵	۵/۵۰	-	۲۳/۸	-	۶۸۴۲۴
G <sub>4</sub>	۰-۲۴۸/۵	۵/۵۰	-	۲۳/۸	-	۶۸۴۲۴

جدول ۵- نیروی فشاری ماکزیمم اعضاء دکل در برج با مقطع متغییر

اعضاء	Z (m)	F <sub>C,av</sub> (Kgf)	حالت بارگذاری بحرانی
قائم	۰-۶۶/۵	-۳۰۸۸۰۱	بار باد در جهت Y
	۶۶/۵-۱۹۶	-۱۳۱۲۷۷	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه چهارم
	۱۹۶-۲۷۳	-۶۰۹۷۵	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه دوم
افقی	۰-۶۶/۵	-۷۷۰۶	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه چهارم
	۶۶/۵-۱۹۶	-۹۴۶۶	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه سوم
	۱۹۶-۲۷۳	-۸۳۱۷	بار باد در جهت X با افزایش ۲۵٪ در ناحیه طره‌ای
قطری	۰-۶۶/۵	-۱۵۹۵۶	بار باد در جهت Y با کاهش ۲۵٪ در دهانه چهارم
	۶۶/۵-۱۹۶	-۱۶۷۵۶	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه چهارم
	۱۹۶-۲۷۳	-۱۲۲۱۵	بار باد در جهت X با کاهش ۲۵٪ در دهانه دوم

[۲] دکتر قدرتی امیری، غلامرضا. مهندس بکائی جزئی، مهرداد. ۱۳۷۹. تحلیل غیرخطی برج‌های مخابراتی مهار شده. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین‌المللی عمران. ۱۹ الی ۲۱ اردیبهشت، دانشگاه فردوسی مشهد، صفحه ۴۴ - ۵۱.

[۳] دکتر میرقادری، رسول. مهندس رضایی مهر، مرتضی. ۱۳۷۹. تحلیل غیرخطی سازه‌های مهار شده با کابل. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین‌المللی عمران. ۱۹ الی ۲۱ اردیبهشت، دانشگاه فردوسی مشهد، صفحه ۲۹۹ - ۳۰۶.

- [4] American Society of Civil Engineers. 1988. Guide for Design of Steel Transmission Towers. Second Edition. Task Committee on Updating Manual 52 of the Structural Division.
- [5] Barghian, Majid. 1996. Nonlinear static and dynamic analysis of bar element structures. Ph.D. Thesis, U.M.I.S.T.
- [6] International Association for Shell Spatial Structures., Spain, 1981. Recommendations for guyed masts. working Group No. 4.
- [7] Mahmoud EL Hassan Aly Ashmawy. 1992. Nonlinear dynamic analysis of guyed masts for wind and earthquake loading. Ph.D. Thesis. The School of Architecture and Engineering, Polytechnique of Central London.
- [8] Pirner M. and Fischer O. 1996. Dynamic behaviour of Prague-TV tower. Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures. Vol. 37, No. 2, pp. 139-146.
- [9] Davenport, A. G. and Sparling, B. F. 1998. The Evolution of Dynamic Gust Response Factors for Guyed Towers. Structural Engineering International. Vol. 8 No. 1, pp. 45-49.
- [10] Sparling B. F. and Wegner L. D. 2006. Comparison of frequency- and time-domain analyses for guyed masts in turbulent winds. Can. J. Civ. Eng. Vol. 33, No. 2, pp. 169-182.
- [11] Millar M. A. and Barghian M. 2000. Snap-through behaviour of cables in flexible structures. Computers and Structures, Vol. 77, Issue 4, pp. 361-369.
- [12] Johns D. J. 1992. Wind Excited Behavior of Structures VI. The Shock and Vibration Digest, Vol. 24, No. 4, pp. 3-16.

علت این امر وجود مهارهای با به عنوان تکیه‌گاه‌های جانبی و در نتیجه عملکرد دکل به صورت یک تیر یکسره می‌باشد. همچنین شکل مذکور نشان می‌دهد که مقادیر ماکزیمم نیرو در دهانه‌ها در ارتفاع تغییر چندانی نداشته و نیروی فشاری و کششی اعضا نیز در هر تراز اختلاف چندانی زیادی ندارند و در طراحی مقاطع اعضای قطری، فشار و کشش هر دو باید کنترل گردند.

### ج) نیروی محوری اعضای افقی

با توجه به منحنی‌های پوش ارائه شده در شکل (۳)، تغییرات نیروی محوری در اعضای افقی شبیه اعضای قطری است. با این تفاوت که نیروی فشاری اعضای افقی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها ناگهان از مقدار ماکزیمم خود به نیروی کششی تغییر می‌یابد و نیروی کششی آنها به علت وجود مهارهای در محل تکیه‌گاه‌ها دارای جهش نسبتاً زیادی می‌باشد. به عبارتی در اعضای افقی، کشش تعیین کننده است. جداول (۱) الی (۶) نیز مطالب فوق را تأیید می‌کنند و نیز نشان می‌دهند که در اعضای قائم، مقاطع قویتری نسبت به اعضای قطری و در آنها نیز مقاطع قویتری نسبت به اعضای افقی نیاز است.

### ۸- نتیجه‌گیری

۱- نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی دکل‌های مهار شده با کابل نشان داد که نیروی محوری ماکزیمم اعضای قائم دکل در دهانه‌ها با افزایش ارتفاع دهانه‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش در دهانه اول بیشتر است. همچنین وجود کابل‌های مهار به عنوان تکیه‌گاه‌های جانبی سبب می‌شود نیروهای محوری ماکزیمم اعضای قطری و افقی دکل در دهانه‌ها کاهش چندانی با افزایش ارتفاع دهانه‌ها نداشته باشند.

۲- در دکل‌های مهار شده با کابل مشاهده می‌گردد بر اساس منحنی پوش نیروی محوری اعضای قائم دکل، سطح مقطع پایه‌ها در ارتفاع و حداقل در دهانه‌های دوم به بعد نسبت به دهانه اول می‌تواند کاهش یابد.

### مراجع

- [۱] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان. ۱۳۷۹. آئین‌نامه حداقل بار وارده بر ساختمان‌ها و ابنیه فنی (تجدید نظر در استاندارد ۱۹). انتشارات مدیریت.