



دانشگاه آزاد اسلامی

آموزشکده فنی و حرفه ای سما واحد شهرکرد

عنوان طرح تحقیقاتی:

ارائه مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی

دکل های مهارش تحت اثر نیروی زلزله

مهری طرح:

کاوه کیومرثی

عضو هیئت علمی تمام وقت

و رئیس آموزشکده فنی و حرفه ای سما

واحد شهرکرد

همکاران طرح:

افسانه بنی طالبی، عیسی محمودی

پائیز ۹۱



شماره: ۲۵/۲۰۱/۱۵۹۳۴
تاریخ: ۱۳۹۱/۸/۲۲
پیوست: _____

بسمه تعالی

نامه تصویب طرح

جناب آقای علوی سامانی

معاون محترم دانشگاه و رئیس مرکز آموزشی و فرهنگی سما واحد شهر کرد

سلام علیکم

بازگشت به نامه شماره ۸۲۰ تاریخ ۹۱/۰۶/۰۸ در خصوص طرح پژوهشی جناب آقای کاوه کیومرثی با موضوع «ارائه مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان جهت پیش‌بینی پاسخ دینامیکی دکل‌های مهاری تحت اثر نیروی زلزله» به اطلاع می‌رساند، طرح مذکور با اصلاح موارد ذیل قابل اجرا بوده و پس از اصلاح با تصویب شورای پژوهشی سمای آن واحد، انعقاد قرارداد با مجری امکان‌پذیر می‌باشد:

۱. تعداد همکاران طرح در رشته‌های مختلف، به خصوص کامپیوتر، کمتر شود.

۲. هزینه اجرای طرح به ۴۸.۰۰۰.۰۰۰ ریال کاهش یابد.

در صورت انجام اصلاحات فوق و عقد قرارداد با مجری محترم، ضروری است پروپزال نهایی، قرارداد و فرم پیوست بخشنامه شماره ۲-۲۵/۲۵۱۱۰/۲-۲ تاریخ ۸۹/۷/۲۷، ارسال گردد. همچنین جهت پرداخت قسط سوم، گزارش پایان طرح (به صورت شیرازه یا آی‌وی‌کو) به همراه فرم تکمیل‌شده ارزیابی گزارش نهایی را به این معاونت ارسال نموده تا مجوز لازم صادر گردد.

ورود به دفتر آموزش‌شکده

تاریخ: ۱۳۹۱/۸/۲۲

شماره: ۰۱۵۶۹

امان... پیشوا

معاون آموزشی، پژوهشی و فرهنگی

۹۶۸۸۱۵۱

نشانی: تهران، ولنجک بلوار
دانشجو، خیابان البرز یکم،
سازمان سما
صندوق پستی:

۱۹۳۹۵-۴۳۶۳

تلفن: ۲۲۱۷۴۳۲۷-۳۰

فاکس: ۲۲۴۲۶۱۸۱

WEB:
WWW.SAZMAN-SAMA.COM

E-MAIL:
INFO@SAZMAN-SAMA.COM

نتیجه گیری:

- ۱- با توجه به نتایج جدول ۸-۱ متوسط درصد خطای مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) در محاسبه تغییر مکان راس دکل مهاری نسبت به نرم افزار ANSYS برابر ۱۲,۴۲ در مجموعه داده های آموزش میباشد.
- ۲- با توجه به نتایج جدول ۸-۲ متوسط درصد خطای مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) در محاسبه تغییر مکان راس دکل مهاری نسبت به نرم افزار ANSYS برابر ۱۲,۵۱ در مجموعه داده های ارزیابی میباشد.
- ۳- باتوجه به نتایج جدول ۸-۳، ۸-۴، و ۸-۵ پارامترهای تابع کرنل rbf مسئله برای محاسبه تغییر مکان راس دکل مهاری به صورت $\zeta=100$ ، $\varepsilon=0.01$ و $C=150$ تعریف میگردد.
- ۴- با توجه به نتایج جدول ۸-۶ متوسط درصد خطای مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) در محاسبه فرکانس طبیعی دکل مهاری نسبت به نرم افزار ANSYS برابر ۱۵,۷۴ در مجموعه داده های آموزش میباشد.
- ۵- با توجه به نتایج جدول ۸-۷ متوسط درصد خطای مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) در محاسبه فرکانس طبیعی دکل مهاری نسبت به نرم افزار ANSYS برابر ۱۵,۲۲ در مجموعه داده های ارزیابی میباشد.
- ۶- باتوجه به نتایج جدول ۸-۸، ۸-۹، و ۸-۱۰ پارامترهای تابع کرنل rbf مسئله برای محاسبه تغییر مکان راس دکل مهاری به صورت $\zeta=300$ ، $\varepsilon=0.1$ و $C=150$ تعریف میگردد.

شماره: ۲۵/۲۰۲/۱۷۹۲

تاریخ: ۱۳۹۲/۰۲/۲۳

پوست:

ن. دار د



آزاد اسلامی

سازمان سما

بسمه تعالی

جناب آقای علوی سامانی
معاون محترم دانشگاه و رئیس مرکز آموزشی و فرهنگی سما واحد شهر کرد
موضوع: ارسال گزارش نهایی طرح پژوهشی آقای کاوه کی و مومنی

سلام علیکم؛
بازگشت به نامه شماره ۹۲/۱۶۳/۲۴ تاریخ ۹۲/۱/۱۹ در خصوص طرح پژوهشی
جناب آقای کاوه کیومرثی با موضوع ارسال گزارش نهایی طرح پژوهشی با عنوان
«ارائه مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی دکل های
مهارتی تحت اثر نیروی زلزله» به اطلاع می‌رساند، گزارش نهایی طرح مذکور تایید
می‌گردد.

ضروری است مندرجات: پخشنامه بانک اطلاعات طرح های پژوهشی به شماره
252511022 تاریخ 897727 (به استثنای نسخه صحافی گزارش نهایی)، در
اسرع وقت به این معاونت ارسال گردد.

امان اله پیشوا

معاون آموزشی، پژوهشی و فرهنگی

تصدیق

بسمه تعالی
۱۰۰ روزنامه کیهان
بازار کتاب (ب) -
۱۰۰ - ابراهیم و حبیب افغان
دکتر، مدرس
عربی
۹۶۶۲

نشانی: تهران، ولنجک بلوار
دانشجو، خیابان البرز یکم،
سازمان سما
مستوفی هستی:

۱۱۳۸۵-۴۴۶۲

تلفن: ۲۲۱۷۲۲۷۰۳۰

فکس: ۲۲۴۴۶۱۸۱

WWW.SAMA-IRAN.COM

IRAN

3080





هو العليم

فرم الف

معاونت آموزشی و پژوهشی

شناسنامه ی طرح پژوهشی

۱. نام واحد آموزشدهنده سما واحد شهرکرد	کد طرح :-
۲. گروه آموزشی اصلی طرح: فنی مهندسی	
۳. عنوان طرح پژوهشی: ارائه مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی دکل های مهاری تحت اثر نیروی زلزله	
۴. بودجه ی پیشنهادی طرح (ریال): ۷۰۰۰۰۰۰۰	۷. نوع طرح :
۵. بودجه ی تصویری طرح (ریال): ۷۰۰۰۰۰۰۰	داخلی ● برون دانشگاهی ○ مشترک با سازمان ○
۶. اعتبار تخصیصی (ریال): ۷۰۰۰۰۰۰۰	

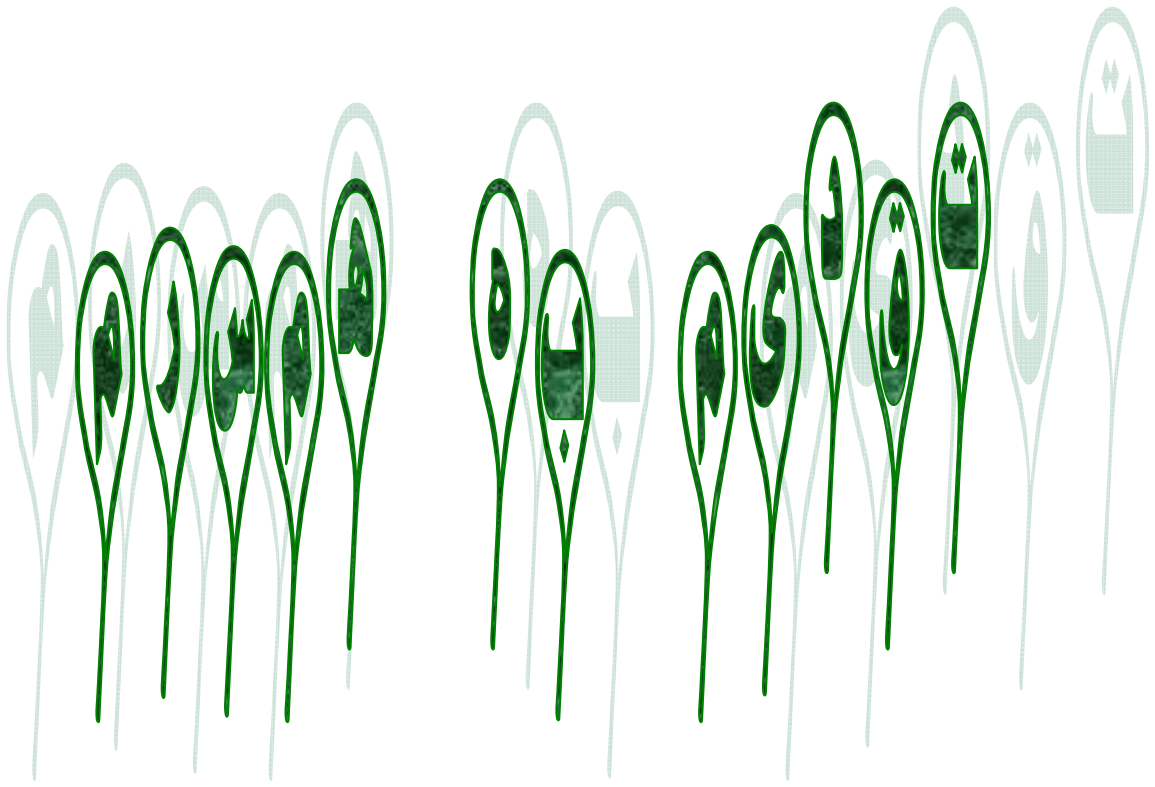
۸. هزینه های پیش بینی شده برای اجرای طرح :	
هزینه های پرسنلی:	۶۲۰۰۰۰۰۰ ریال
هزینه ی خرید تجهیزات	مصرفی : - غیرمصرفی : -
هزینه ی مسافرت ها :	۱۰۰۰۰۰۰ ریال
هزینه های متفرقه:	۵۰۰۰۰۰۰ ریال
جمع کل هزینه ها: به عدد	۷۰۰۰۰۰۰۰ ریال
	به حروف هفتاد میلیون

۹. موارد مربوط به مجری و همکاران طرح							
ردیف	نام و نام خانوادگی	رشته و آخرین مدرک تحصیلی	رتبه دانشگاهی	نوع همکاری با واحد(تمام وقت، نیمه وقت، مدعو)	میزان حقوق در ساعت(ریال)	میزان ساعت همکاری با طرح(در ماه)	کل مبلغ حق الزحمه
۱	کاوه کیومرثی	فوق لیسانس-عمران	مربی	تمام وقت	۱۲۰۰۰۰	۸۰	۳۲۰۰۰۰۰۰
۲	افسانه بنی طالبی	فوق لیسانس-کامپیوتر	مربی	مدعو	۸۰۰۰۰	۸۰	۲۰۰۰۰۰۰۰
۳	عیسی محمودی	فوق لیسانس-کامپیوتر	-	مدعو	۸۰۰۰۰	۶۰	۱۰۰۰۰۰۰۰

۱۰. چکیده ی طرح : در فاز اول این پژوهش اثر نیروی زلزله و پاسخ دکل به تحریکات لرزه ای مورد بررسی قرار میگیرد. در این پژوهش بدنبال ارائه مدلی جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی دکل های مهاری تحت اثر نیروی زلزله میباشیم که برای دستیابی به این هدف از یکی از تکنیک های یادگیری ماشین به نام ماشین بردار پشتیبانی که امروزه جهت مدلسازی پدیده های پیچیده مورد توجه محققین بسیاری در علوم مختلف منجمله مهندسی عمران قرار گرفته است، استفاده میکنیم.

سپاس‌گزاری:

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت، امنیت، آرامش و آسایش را برای من فراهم آورده است این پژوهش تقدیم به همسر میکردد. همو که سایه مهربانیش سایه ساز زندگی‌م بوده و با صبر و تحمل مثال زدنیش مشکلات مسیر را برایم تسهیل میکند. همچنین به مصداق «من لم یسکر المخلوق لم یسکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فریخته و فرزانه جناب آقای محمود علوی سامانی که در طول مدت انجام این پژوهش از رهنمودهای کاری و اخلاقی ایشان بهره‌مند شدم، کمال تشکر را کرده و درگاه خداوند بزرگ را شاکرم که افتخار شاکردی ایشان را نصیبم نمود.



فصل اول : دکل های مهاری

- ۱-۱- مقدمه ۱
- ۲-۱- دکل های مهاری بلند ۲
- ۳-۱- غیر خطی بودن هندسه دکل ۳
- ۴-۱- تحلیل دکل های مهاری ۴
- ۵-۱- تاریخچه دکلهای فروریخته ۴
- ۶-۱- نکات بارگذاری ۸
- ۷-۱- فرمول بندی طراحی ۹
- ۸-۱- کابل های معلق ۱۵
- ۱-۸-۱- کابل تحت اثر بار نقطه ای متمرکز ۱۶
- ۲-۸-۱- کابلهای تحت بارگذاری گسترده ۱۸
- ۳-۸-۱- کابل سهمی (تحت بار گسترده روی دهانه افقی) ۱۹
- ۴-۸-۱- کابل زنجیری (تحت بار گسترده روی طول عضو) ۲۲
- ۵-۸-۱- ویژگیهای کابلهای فولادی ۲۵

فصل دوم: مروری بر تاریخچه تحقیقات انجام گرفته

- ۲۷-۱-۲- آنالیز استاتیکی کابل ها ۲۷
- ۲۸-۲-۲- دینامیک کابل ۲۸
- ۲۸-۱-۲-۲- مقدمه ۲۸
- ۲۹-۲-۲-۲- روشهای حل ۲۹
- ۳۱-۳-۲-۲- ارتعاش (نوسان) آزاد ۳۱
- ۳۴-۴-۲-۲- ارتعاش واداشته (اجباری) ۳۴
- ۳۵-۵-۲-۲- سختی دینامیکی معادل ۳۵
- ۳۶-۶-۲-۲- میرایی کابل ها ۳۶
- ۳۷-۷-۲-۲- اندازه گیری های ارتعاش ۳۷
- ۳۸-۸-۲-۲- کابل هایی با نیروی کششی کم ۳۸
- ۳۹-۳-۲- نوسان ها (لرزه های) حاصل از باد ۳۹
- ۴۰-۴-۲- آنالیز دینامیکی و استاتیکی دکل های مهار شده ۴۰

فصل سوم : آنالیز استاتیکی کابل ها

- ۴۴-۱-۳- مقدمه ۴۴
- ۴۵-۲-۳- پیشرفت در تنظیم معادلات موازنه ۴۵
- ۴۶-۱-۲-۳- فرضیه ای اصلی ۴۶

- ۳-۲-۲- معادلات تعادل استاتیکی ۴۶
- ۳-۳- معدل تفاوت محدود برای معادلات غیرخطی تعادلی ۴۹
- ۳-۴- روش محاسباتی برای حل معادلات تعادلی ۵۱
- ۳-۴-۱- مقطع اولیه وزن خود کابل ۵۱
- ۳-۴-۲- پاسخ کابل با توجه به بارگذاری استاتیکی کلی ۵۱
- ۳-۵- ظرفیت جابجایی تجویزی (تعیین شده) در انتهای کابل ۵۵

فصل چهارم : آنالیز دینامیکی کابل ها

- ۴-۱- مقدمه ۵۶
- ۴-۲- گسترش معادلات حرکت ۵۷
- ۴-۲-۱- فرضیه های اصلی ۵۷
- ۴-۲-۲- معادلات جنبش (جابجایی) ۵۷
- ۴-۲-۳- نرمال کردن معادلات ۶۰
- ۴-۲-۳-۱- نکات مورد نیاز در نرمال سازی ۶۰
- ۴-۲-۳-۲- غیر ابعادی کردن ۶۱
- ۴-۳- یکپارچگی زمانی مستقیم ۶۳
- ۴-۳-۱- طبقه بندی روشهای مختلف یکپارچگی زمانی ۶۴
- ۴-۳-۲- یکپارچگی زمانی با استفاده از روش β - Newmark ۶۵
- ۴-۴- مدل تفاوت محدود برای معادلات دیفرانسیل غیرخطی حرکت ۶۹

- ۷۵-۴-۵- روش محاسبه برای حل معادلات حرکت
- ۷۵-۴-۵-۱- مقطع وزن اولیه کابل
- ۷۵-۴-۵-۲- پاسخ کابل با توجه به بارگذاری دینامیکی عمومی
- ۷۹-۴-۶- تحقیق عددی
- ۸۰-۴-۶-۱- اطلاعاتی در مورد مسئله
- ۸۱-۴-۶-۲- اطلاعات پارامتریکی تحقیق
- ۸۱-۴-۶-۳- بحث در مورد نتایج مسئله
- ۸۱-۴-۶-۳-۱- تاریخچه زمانی پاسخ کابل
- ۸۴-۴-۶-۳-۲- تأثیر سختی محوری متغیر EA
- ۸۶-۴-۶-۳-۳- تأثیر جرم متغیر / طول واحد m
- ۸۸-۴-۶-۳-۴- تأثیر بارگذاری دینامیکی متغیر q_1, q_2, q_3
- ۹۰-۴-۶-۳-۵- تأثیر وزن متغیرها / طول واحد q_5
- ۹۱-۴-۶-۳-۶- تأثیر شیب وترى متغیر θ

فصل پنجم: ماشین بردار پشتیبان

- ۹۳-۵-۱- مقدمه
- ۹۴-۵-۲- تئوری یادگیری آماری
- ۹۷-۵-۳- بعد VC

۹۸	۴-۵- ابر صفحه جداساز
۹۹	۵-۵- ابر صفحه جداساز بهینه
۱۰۸	۶-۵- ابر صفحه جداساز بهینه تعمیم یافته
۱۱۲	۷-۵- تعمیم به فضای دارای ویژگی ابعادی بالا
۱۱۵	۸-۵- بررسی اجمالی
۱۱۵	۹-۵- توابع کرنل
۱۱۶	۱-۹-۵- کرنل خطی (<i>liner</i>)
۱۱۶	۲-۹-۵- <i>Polynomial</i>
۱۱۷	۳-۹-۵- <i>Gaussian Radial Basis Function (rbf)</i>
۱۱۷	۴-۹-۵- <i>Exponential Radial Basis Function</i>
۱۱۷	۵-۹-۵- <i>Multi – Layer Perception</i>
۱۱۸	۶-۹-۵- سریهای فوریه
۱۱۸	۷-۹-۵- چند جمله ایها (<i>SPLINE</i>)
۱۱۹	۸-۹-۵- چند جمله ایها (<i>Bsplines</i>)
۱۱۹	۹-۹-۵- کرنلهای جمع پذیر
۱۲۰	۱۰-۹-۵- کرنلهای چند بعدی
۱۲۰	۱۰-۵- سنجش عملکرد
۱۲۱	۱۱-۵- انتخاب کرنل مناسب
۱۲۲	۱۲-۵- مقایسه بین شبکه های عصبی مصنوعی و <i>SVM</i>

فصل ششم: نرم افزار *SVM*

- ۱-۶- نرم افزار *svm* ۱۲۵
- ۲-۶- خصوصیات نرم افزار *svm* ۱۲۶

فصل هفتم: مدلسازی دکل مهاری با *ANSYS*

- ۱-۷- مدل سازی با *ANSYS* ۱۳۹
- ۲-۷- آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی ۱۴۲
- ۳-۷- آنالیز مودال ۱۶۲

فصل هشتم: مدلسازی دکل مهاری با *SVM*

- ۱-۸- مدل سازی دکل مهاری با *SVM* ۱۶۶
- ۲-۸- ارائه مدل *SVM* برای محاسبه تغییر مکان راس دکل ۱۶۸
- ۳-۸- ارائه مدل *SVM* برای محاسبه فرکانس طبیعی دکل مهاری در مود اول ۱۸۱
- نتیجه گیری ۱۹۵

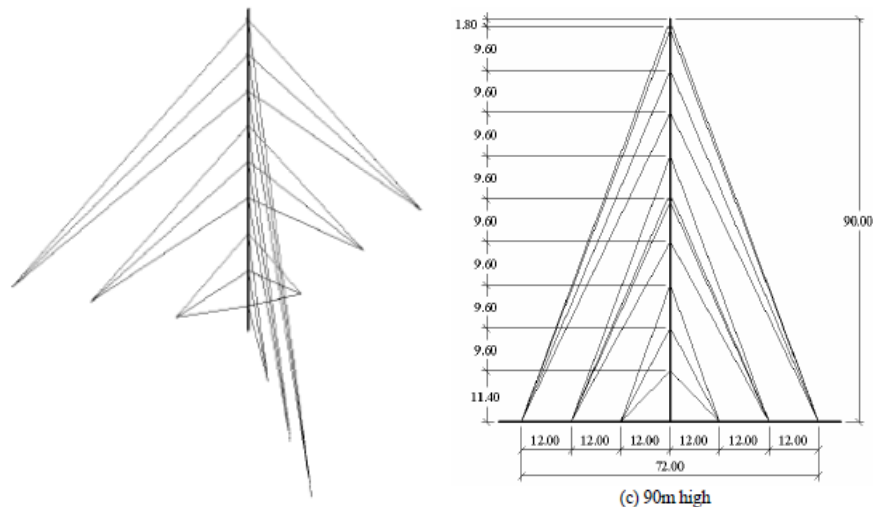
چکیده:

در این پژوهش جهت بررسی رفتار لرزه ای دکل های مهاری تعدادی از دکل های مهاری که در اقصی نقاط جهان مورد بهره برداری قرار گرفته اند تحت اثر نیروهای زلزله قرار میگیرند. به طور کلی مطالعات انجام شده بر روی دکل های مهاری به دو دسته نیروهای حاصل از باد و زلزله و واکنش متقابل دکل ها به چنین نیروهایی تقسیم بندی میشوند. به طور معمول به علت سبکی و بلندی دکل های مهاری مطالعات بر روی نیروی حاصل از باد و ترکیب آن با یخ به عنوان نیروی غالب در آنالیز این سازه ها مورد استفاده قرار میگیرد. با این وجود در سال های اخیر توجه بیشتری بر اثرات نیروی حاصل از زمین لرزه و مقایسه نتایج این آنالیز با اثر نیروی باد بر این سازه ها شده است. در فاز اول این پژوهش اثر نیروی زلزله و پاسخ دکل به تحریکات لرزه ای مورد بررسی قرار میگیرد. در این پژوهش بدنبال ارائه مدلی جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی دکل های مهاری تحت اثر نیروی زلزله میباشیم که برای دستیابی به این هدف از یکی از تکنیک های یادگیری ماشین به نام ماشین بردار پشتیبانی که امروزه جهت مدلسازی پدیده های پیچیده مورد توجه محققین بسیاری در علوم مختلف منجمله مهندسی عمران قرار گرفته است، استفاده میکنیم. روش ماشین بردار پشتیبان یکی از روش های یادگیری ماشینی است که بر مبنای تئوری یاد گیری آماری VAPNIK در دهه 90 میلادی توسط VAPNIK و همکارانش ارائه گردید. در SVM از اصول کمینه سازی ریسک ساختاری (SRM) استفاده شده است، در حالی که سایر روش ها از اصول کمینه سازی ریسک تجربی (ERM) بهره می برند. ثابت شده است که اصول SRM در مقایسه با ERM عمل کرد بهتری از خود نشان می دهند از ماشین بردار پشتیبان به طور کلی در مسائل طبقه بندی دو یا چند گروه و رگرسیون استفاده میشود. مانند بسیاری از روش های یادگیری ماشینی، در روش ماشین بردار پشتیبان نیز فرآیند ساخت مدل شامل دو مرحله آموزش و آزمایش می باشد. در انتهای فاز آموزش قابلیت تعمیم یابی مدل آموزش داده شده با استفاده از داده های آزمایش ارزیابی می شود. بصورت خلاصه ساز و کار اصلی SVM در حل مساله رگرسیون به صورت زیر بیان می شود.

- 1- ماشین بردار پشتیبان، تابع رگرسیون را با بکارگیر یک دسته تابع خطی تخمین می زند.
- 2- ماشین بردار پشتیبان عملیات رگرسیون را با تابعی که با انحراف از مقدار واقعی در آن به میزان کمتر از ϵ مجاز است انجام می دهد (تابع تلفات).

۳- ماشین بردار پشتیبان ، با کمینه کردن ریسک ساختاری، بهترین جواب را ارائه می دهد.

در روش هایی مانند شبکه های عصبی مصنوعی برای رسیدن به بهترین جواب از اصول کمینه سازی ریسک تجربی استفاده می شود، با کمینه کردن ریسک تجربی کارایی مناسب مدل بر روی داده های آموزش تضمین می شود، اما تضمینی برای قابلیت تعمیم یابی مناسب وجود ندارد، به همین دلیل در این روش طراحی مناسب شبکه ، برای بهبود عملکرد تعمیم یابی مدل ضروری است. هدف از کمینه سازی ریسک ساختاری، بهینه کردن قابلیت تعمیم یابی مدل، همزمان با کمینه کردن ریسک تجربی است. برای تولید و ارزیابی مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی دکل های مهار (تغییر مکان راس دکل) تحت اثر نیروی زلزله از تعداد ۳۰۰ نمونه دکل مهار که توسط نرم افزار ANSYS آنالیز شده اند استفاده میشود. هر نمونه دکل مهاری در بر گیرنده ۵ متغیر مستقل شامل: x1: فاصله افقی بین کابل های مهار بر روی سطح زمین، x2: ارتفاع اولین سطح مهار بر روی دکل تا سطح زمین، x3: ارتفاع بین کابل های مهار بر روی سطح دکل، x4: ارتفاع آنتن بر روی دکل و n: تعداد سطح تراز مهاری و یک متغیر وابسته: ماکزیمم تغییر مکان جانبی (Maximum Lateral Displacement) دکل میباشد. برای مثال ۵ پارامتر مستقل برای دکل مهاری ۹۰ متری نشان داده شده در شکل زیر به صورت زیر میباشد.



شکل ۱: دکل مهاری با ارتفاع ۹۰ متر

x1: فاصله افقی بین کابل های مهار بر روی سطح زمین (۱۲ متر)

x2: ارتفاع اولین سطح مهار بر روی دکل تا سطح زمین (۱۱,۴ متر)

x3: ارتفاع بین کابل های مهار بر روی سطح دکل (۹,۶ متر)

x4: ارتفاع آنتن بر روی دکل (۱,۸ متر)

n: تعداد سطح تراز مهاری (۹ سطح)

برای ایجاد نمونه های مختلف از دکل های مهاری محدوده تغییر پارامتر های فوق در این پژوهش به صورت x1: ۴ تا ۱۲ متر، x2: ۴ تا ۱۲ متر، x3: ۳ تا ۱۱ متر، x4: ۱ تا ۲ متر و n: ۲ تا ۱۰ سطح تعریف میگردد.

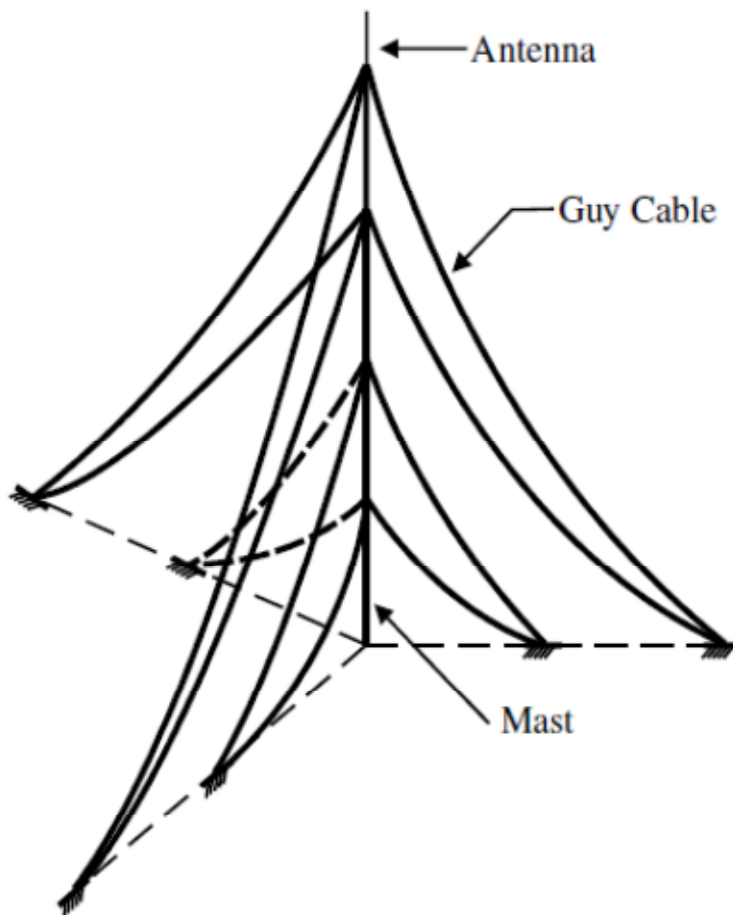
برای تولید مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان داده ها با نسبت ۷۰ به ۳۰ به دو دسته آموزش و ارزیابی تقسیم میشوند. (۲۱۰ نمونه برای آموزش و ۹۰ نمونه برای ارزیابی) مدل مورد نظر توسط داده های مجموعه آموزش تولید شده و کارایی آن در پیش بینی جمعیت مورد نظر به کمک داده هایی که در طول آموزش مدل تجربه نشده اند (مجموعه داده های آزمایش) بررسی میگردند. همچنین تابع کرنل پایه شعاعی (rbf) که در تحقیقات متعددی به عنوان بهترین تابع کرنل انتخاب شده در این تحقیق نیز به عنوان تابع کرنل استفاده میشود. در این پژوهش برای رسیدن به یک مدل بهتر با ترکیب های مختلفی از پارامتر های تابع کرنل (C، ε و ζ) مدل های متعددی را ایجاد و مورد ارزیابی قرار میدهم. نتایج ارزیابی پیش بینی مدل به کمک شاخص های آماری نظیر ضریب همبستگی ارائه میشود. ضریب همبستگی معیاری برای سنجش میزان انطباق مقادیر پیش بینی شده بر مقادیر اندازه گیری شده است.

فصل اول

دکل هاس مهارس

۱-۱- مقدمه

طرح کلی یک دکل مهار شده در شکل زیر نشان داده شده است. مهمترین جزء این سازه ها یک دکل یا تیر فولادی خرنپائی (MAST) تقویت شده باریک با مقطع عرضی سه گوش میباشد که به تکیه گاه به صورت مفصلی محکم میشوند (شکل ۱-۱).



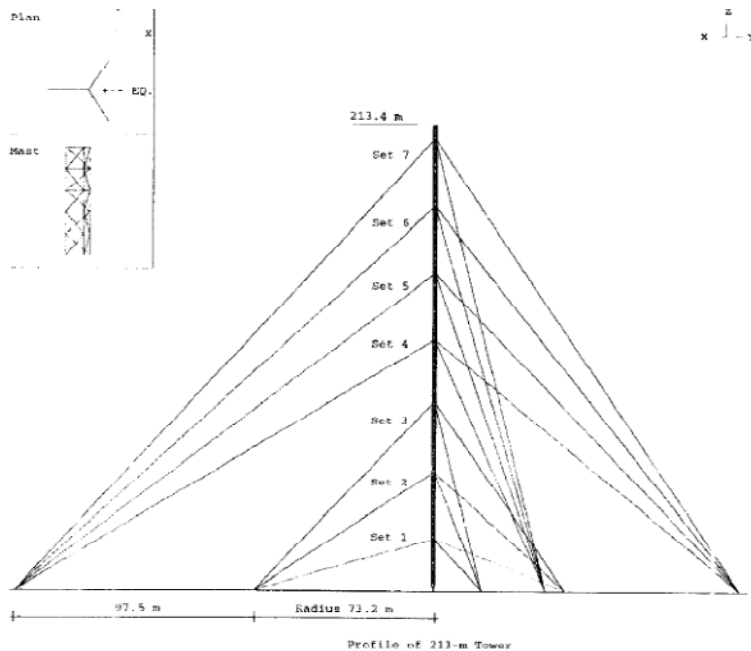
شکل ۱-۱: شکل کلی دکل مهار شده

مجموعه ای از کابل های مهار مایل جهت تامین سختی جانبی دکل (MAST) به طور جانبی دکل را در سطوح مختلف از ارتفاعش نگه میدارند. این کابل های مهار کشیده شده در زوایای مساوی اطراف دکل قرار می گیرند. اجزاء گوناگون نوعی دکل مهار شده بلند در شکل ۱-۱ نشان داده شده است [۱].

رفتار سازه ای دکل های مهار شده بر اساس هندسه غیر خطی دکل رفتاری پیچیده است که این پیچیدگی ناشی از دو عامل اندرکنش بین دکل و کابل و شکم دادن کابل مهار و دیگری لاغر بودن ستون دکل میباشد.

۱-۲- دکل های مهاری بلند

نظر به اهمیت روز افزون ارتباطات در زندگی امروزه بشر و لزوم به کار گیری تکنولوژی روز این صنعت لازم است تا بتوانیم سازه های خاصی که برای نصب، نگهداری و کاربرد تاسیسات و لوازم آن از قبیل انواع آنتن ها، رفلکتور ها، دیشها و... به کار میروند را آنالیز و طراحی کنیم. یکی از مهمترین سیستم های سازه ای در صنایع وابسته به ارتباطات، میکروویو و بیسیم، دکل های کابلی هستند که به عنوان تکیه گاه تاسیسات جذب، تقویت و انتشار امواج مورد استفاده قرار میگیرند. از آنجا که برای بسیاری از امواج و سیگنال های رادیویی و مخابراتی مسئله ارتفاع کانون پخش از زمین جهت دستیابی به یک حوزه پوشش بهینه بسیار حائز اهمیت میباشد و چون دکل های خود ایستا برای ارتفاع های بیش از حدود ۱۵۰ متر اقتصادی نیستند و معمولا ارتفاعی بیش از این حد و تا ۶۰۰ متر مد نظر می باشد، لذا دکل های مهار شده کابلی راه حل مناسبی جهت تامین این نیاز می باشند. با توجه به مطالب ذکر شده مینیمم حد ارتفاع برای دکل های بلند ۱۵۰ متر در نظر گرفته میشود که یک معیار مشترک برای دسته بندی دکل ها با توجه به ارتفاع آنهاست. معمولا برج های مهار شده از یک شافت با سیستم خرپائی تشکیل میشوند اگر چه شافت دابل نیز در مواردی به کار برده شده است. این شافت به وسیله کابل های مهاری پیش تنیده شده مقاومت بالا که با زوایای مساوی در سه یا چهار جهت اطراف دکل قرار گرفته اند در ترازهای مختلف دکل را مهار میکنند. شکل ۱-۲ مربوط به دکل مهاری با ارتفاع ۲۱۳ متر با ۷ سطح تراز مهاری میباشد. مقطع شافت ممکن است مثلثی و یا مربعی باشد که از اجزاء خرپائی شامل سه جزء افقی، قائم و مورب تشکیل شده است. این المانها میتوانند گوشه دار، لوله ای و یا گرد توپر باشند. ستونهای بال پهن نیز میتوانند به عنوان وترها استفاده شوند. پایه شافت میتواند گیردار و یا مفصلی باشد. معمولا شافت بر روی یک نقطه فیزیکی به صورت مفصلی بر روی شالوده اتکا دارد [۱].



شکل ۱-۲: دکل مهار شده ۲۱۳ متر

۱-۳- غیر خطی بودن هندسه دکل

غیرخطی بودن هندسه دکل ها به صورت نسبت زمان دوره کمترین مود خمشی ستون دکل بر زمان ماکزیمم تغییر شکل جانبی ستون همان دکل تعریف می شود. برای بدست آوردن میزان پارامتر غیر خطی بودن هندسه دکل های مهاری در یک آنالیز مودال سه دکل مهاری ۲۱۳، ۳۱۳ و ۳۴۲ متری را تحت وزن خود دکل و نیروهای پیش تنیدگی کابل در زمانی که دکل در بالاترین ارتفاع بیشترین تغییر مکان را دارد آنالیز کرده که نتایج در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

Tower Height (m)	First Flexural Period of Mast (s)		Ratio
	Time = 0	Time of Maximum Lateral Displacement	
213	0.879	1.093	1.24
313	2.310	3.392	1.47
342	1.860	2.460	1.32

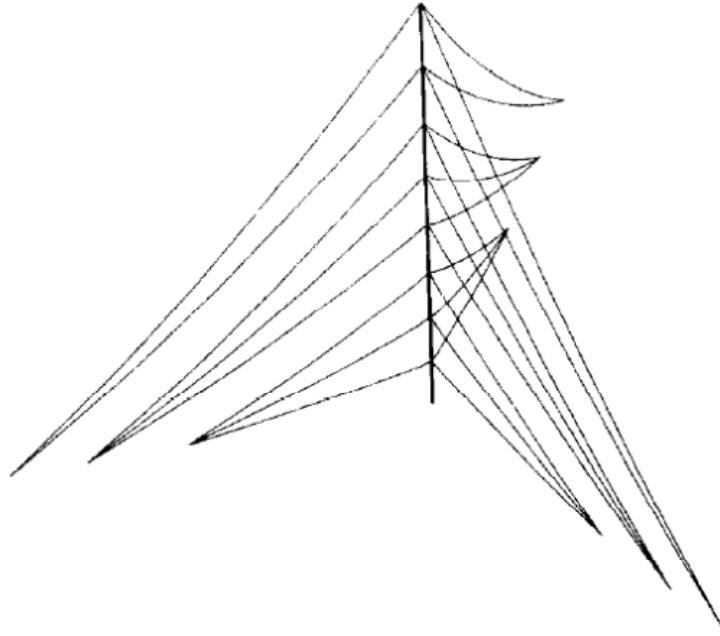
جدول ۱-۱: اولین مود خمشی دکل

۴-۱- تحلیل دکل های مهاری

از آنجا که این دکلها به وسیله کابل مهار میشوند جزء دسته سازه های کابلی محسوب میشوند. کابلها از نظر تحلیل پیچیدگیهای خاصی دارند. وابستگی سختی سازه به شکل آن و لاغری قابل توجه سازه دکل مسئله تحلیل را به صورت غیر خطی درآورده است که در مواردی مسئله غیر خطی مواد نیز علاوه بر غیر خطی هندسی به مسئله افزوده شده و وابستگی متغیرهای مستقل و تابعهای وابسته را پیچیده میکند. گذشته از حل معادلات مربوط به آنالیز استاتیکی تحلیل دینامیکی این دکلها نیز به نوبه خود به متد های خاص و ویژه ای نیاز دارد. با توجه به وزن کم سازه و وجود اجزائی با سطوح بادگیر در ارتفاع بالا نظیر دیشها نیروی عمده و اساسی مطرح در بارگزاری این سازه ها نیروی باد میباشد. هر چند در بحث زلزله اندرکنش دینامیکی دکل و کابل و اختلاف طبیعت دینامیکی آنها حائز اهمیت میشود. بلند و باریک بودن دکل و در حقیقت لاغری قابل توجه شافت در این میان از مسائل مورد توجه میباشد. از آنجا که جهت باد ممکن است در یک فاصله زمانی به صورت رفت و برگشت و یا حتی چرخشی باشد تغییر جهت تیرک دکل را موجب میشود که نتیجه آن حذف نیروی مهاری تعدادی از کابلها و درگیر شدن کابلهای دیگر میباشد. با توجه به اینکه کابلها اصولاً تنها در کشش عمل میکنند، کابلهای سمت پشت باد گیر از حوزه عمل خارج میشوند. به عبارت دیگر در طول مدت بارگزاری هندسه اولیه ممکن است کاملاً عوض شود. اهمیت استراتژیک بالای این دکلها به جهت اینکه سازه های مهم زیر بنائی و حیاتی هستند و پایداری آنها بعد از حوادثی از قبیل طوفان و زلزله تقدم بالائی دارد، هزینه نصب خود دکل و همچنین لوازم و تاسیسات مخابراتی گران قیمت و حساسی که بر روی آن نصب میشوند لزوم یک طرح ایمن برای آن را باعث میشود که آن هم بدون یک آنالیز دقیق غیر خطی میسر نمیشود [۶].

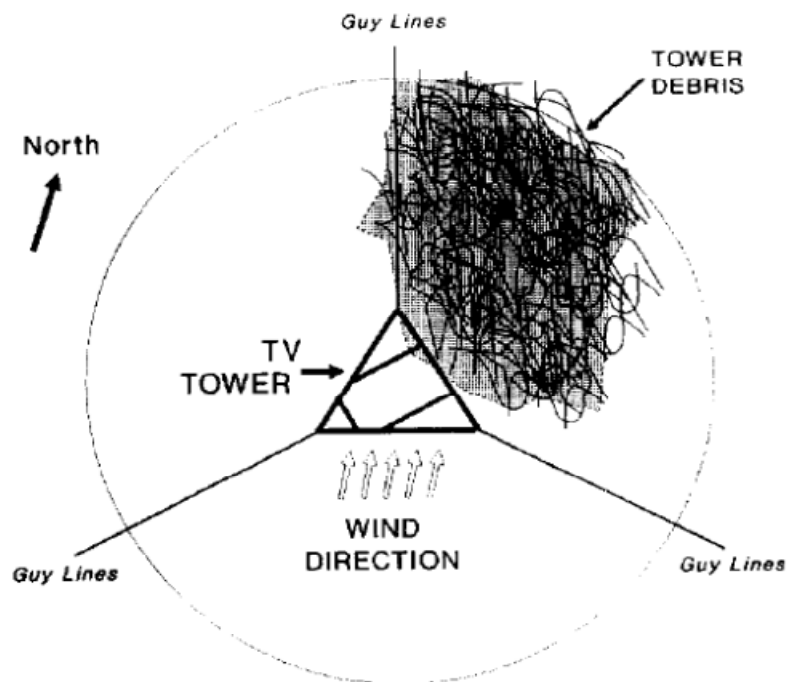
۵-۱- تاریخچه دکلهای فروریخته

ستون دکل که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، یک خرپای فضائی به شکل منشوری مثلثی بوده، که با ستونهایی محکم در سه گوشه اش اعضا افقی را در فواصل ۵ فوت و مهاربند های قطری را نگه می دارد.



شکل ۱-۳: نمای ۳ بعدی دکل مهاری

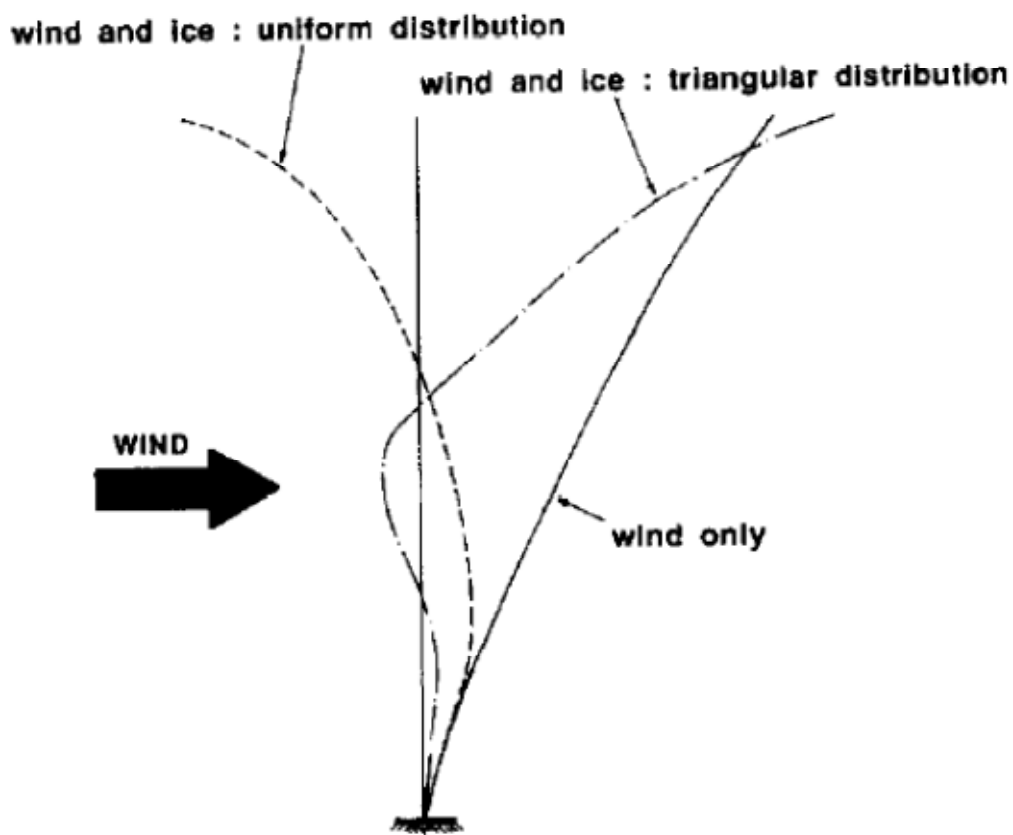
این دکل ۱۹۰۰ فوت ارتفاع داشت، هر ضلع آن ۹ فوت بود و یک آنتن تلویزیون را نگه میداشت. این دکل به صورت جانبی توسط ۸ سطح مهاری که در هر سطح سه کابل مهاری با زوایای ۱۲۰ درجه قرار گرفته اند مهاری شده بود. این دکل تحت بارهای باد سبک و یخ سنگین فروریخته است. جهت وزش باد و محل باقیمانده مصالح پس از ویرانی در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴: محل ریزش مصالح

طبق داده های هوا سنجی سرعت باد حدود ۱۵ mph بوده و یخ با ماکزیمم ضخامت ۱۰ اینچ به طور مثلی در طول ارتفاع دکل پراکنده بوده است. یک بررسی از واکنش دکل تحت این دو بار نشان داده است که این دکل برای بارهای باد جانبی خیلی قویتر از آنچه از آن چیزی که هنگام فروریختن باید طراحی می شد طراحی شده بود ولی در طراحی اولیه آن بار یخ در نظر گرفته نشده بود.

یخ اثری سه گانه بر رفتار دکل دارد، نه تنها یک بار محوری اساسی در ستون دکل ایجاد میکند بلکه سطح تصویر شده برای باد و شکم دادگی کابل ها را افزایش داده و در نتیجه سختی جانبی آنها را کاهش میدهد. اثر یخ بر واکنش سازه توسط شکل های تغییر یافته دکل در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۵: توزیع اثر یخ بر شکل تغییر یافته دکل

در شکل فوق تنش های محوری در ساق های دکل تحت ترکیب بار های باد و یخ نشان داده شده است. مشاهده میشود که کمانش موضعی در یک عضو عمودی به سمت پشت باد گیر بین سطح مهار ششم و هفتم وارد میشود. به محض اینکه این عضو کمانه میکند مهارها در سطح ۸ و ۷ به سبب بارگذاری مرکب به شدت کشیده شدند و بخش بالائی دکل را به پائین میکشند که این رفتار باعث میشود ۵ سطح مهار پائین تر خارج از مود طبیعی خود رفتار کنند. در یک لحظه مکانیسم فشار و کشش بین این ۵ دسته از مهارها نمایان شده که موجب فروریختن همه دکل میشود. محل باقیمانده مصالح مربوط به پایه دکل و جهت وزش باد در هنگام فروریختن دکل این مکانیسم گسیختگی را تأیید میکند با اینکه هیچ نشانه ای از خطای طراحی

یا ساخت در دکل مشاهده نمیشود، دلیل فروریختن دکل کمبود اطلاعات دقیق بارگزاری و به خصوص در نظر نگرفتن بارگزاری یخ بوده است [۸].

۱-۶- نکات بارگذاری

دکل های مهار شده به عنوان سازه های بسیار انعطاف پذیر تحت بار های شدید باد واکنش دینامیکی از خود نشان میدهند. کابل های مهار نیز به طور دینامیکی رفتار میکنند و بسیار مستعد گسیختگی میباشند، بخصوص هنگامیکه پیش کشیدگی آنها کم باشد. گسیختگی یک وضعیت ناپایدار است که توسط ارتعاشات خود تحریک شده ایجاد میشود و منجر به یک درجه آزادی مجزا میشود. از زمانی که طراحان توانستند از رفتار ناپایدار دکل و کابل اجتناب کنند خاصیت دینامیکی بار باد با بکار بردن یک ضریب تندباد بر بارهای استاتیکی معادل محاسبه میشود. اغلب شیوه های موجود طراحی که در زمینه دکل های مهار استفاده میشوند بر اساس رفتار دکل ها تحت بار های استاتیکی معادل با استفاده از ضرایب تند باد و ارتفاع است، ترکیب بار های باد با بار های یخ انباشته شده واکنش را پیچیده تر میکند. همانطور که قبلا گفته شد، تشکیل یخ انباشته بر روی دکل و کابل ها اثری چند برابر دارد به صورتیکه بار مرده به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد، سطح تصویر شده اعضا افزایش پیدا میکند و بنابراین بارهای باد بزرگتر میشوند و شکم دادگی در کابل ها نیز افزایش میابد، در نتیجه سختی جانبی آنها کاهش میابد. علاوه بر این توزیع یخ در ارتفاع دکل یکنواخت نیست. معمولا در قسمت بالای دکل یخ بیشتری نسبت به قسمت پائین دکل وجود دارد. این مورد اثر ترکیب بار باد و یخ را که بر روی دکل اعمال میشود را وخیم تر میکند. برای طراحی دکل های مهار ترکیبات بار مورد استفاده بصورت زیر میباشد: [۸]

$$D+W_0$$

رابطه ۱-۱

$$D+0.75W_i+I$$

رابطه ۱-۲

در فرمول های فوق:

D: بار مرده

W₀: بار باد روی سازه بدون یخ

Wi: بار باد روی سازه با یخ

l: بار یخ

سطح موثری که برای بارهای باد بر روی سازه بدون یخ مورد توجه قرار میگیرد کوچکتر از سطح موثری است که برای محاسبه بارهای باد روی سازه با یخ استفاده میشود. به عنوان یک قانون کلی سطح تصویر شده اعضا توسط فرمول زیر افزایش میابد.

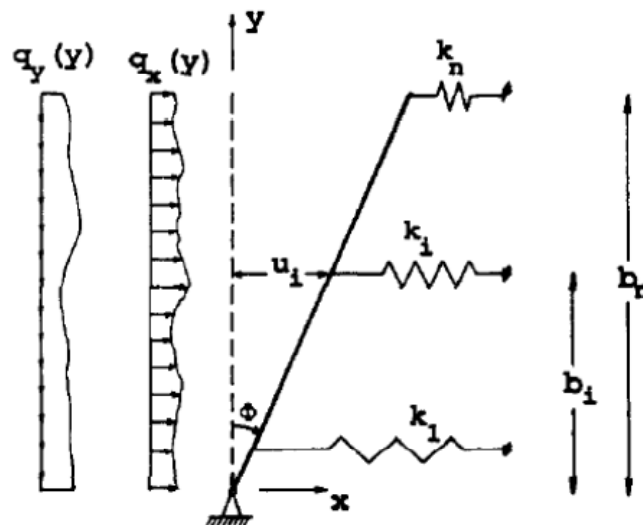
$$\delta A = \nu t l$$

رابطه ۳-۱

در فرمول فوق t ضخامت یخ انباشته شده و l طول عضو است. بر اساس گزارشات هواشناسی فرض اینکه ضخامت یخ به طور خطی از یک مقدار کم در قسمت پایین دکل تا یک مقدار ماکسیمم در بالای دکل تغییر میکند منطقی است.

۷-۱- فرمول بندی طراحی

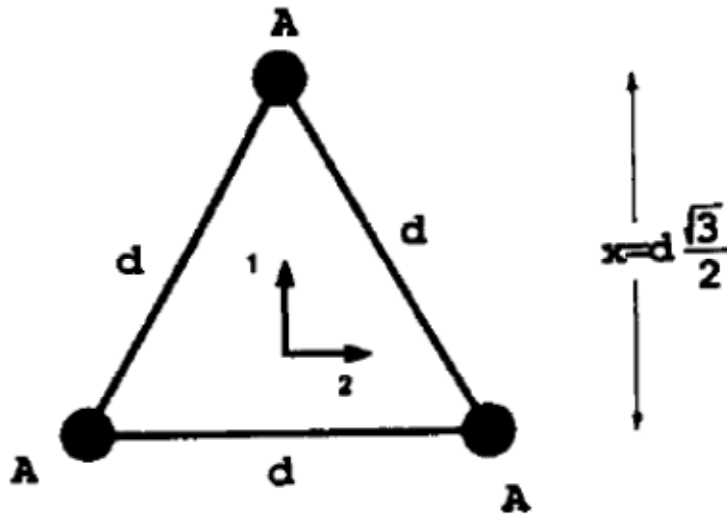
به منظور فرمول بندی حل مسائل طراحی دکلها چندفرض ساده کننده به منظور بدست آوردن عبارات تحلیلی برای واکنش دکل اتخاذ شده است. فرض اصلی اینست که در موقعیت های تغییر یافته، ستون دکل تقریباً مستقیم باقی می ماند و فقط حول پایه خود با زاویه Φ دوران میکند. ساختار تغییر یافته دکل مهاری برای فرموله کردن مسائل طراحی بصورت شکل ۱-۶ است [۵].



شکل ۱-۶: ساختار تغییر یافته دکل مهاری برای فرموله کردن مسائل طراحی

برای مهارها مدل فنر معادل و برای ستون دکل مدل تیر معادل استفاده میشود. دکل در معرض بارهای عمودی $q_y(y)$ که بطور کلی شامل وزن ستون دکل، وزن یخ روی ستون دکل و بارهای متمرکز حاصل از کابل ها بواسطه وزن مرده آنها و بارهای افقی $q_x(y)$ که بواسطه بار باد بر روی ستون دکل و مهارها حاصل میشوند، قرار دارد.

مشخصات مقطع عرضی تیر معادل مطابق شکل ۱-۷ بدست میآیند.



شکل ۱-۷: مقطع عرضی تیر معادل

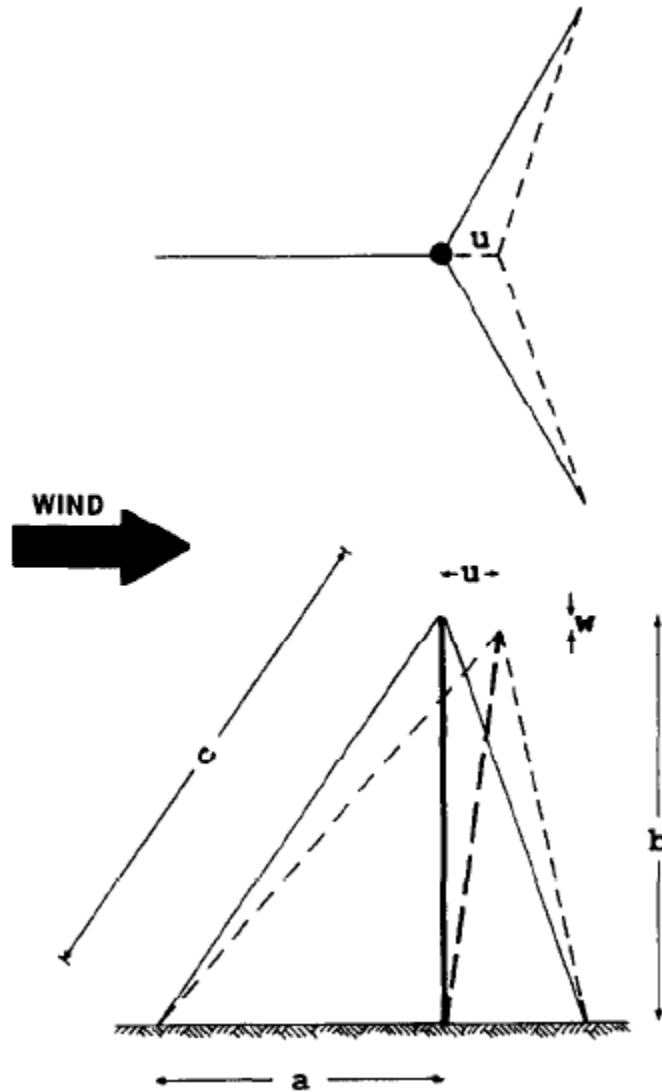
مشخصات مقطع عرضی تیر معادل به صورت زیر محاسبه میشود: (رابطه ۱-۴)

$$A_{eq} = 3A \quad (1)$$

$$I_{eq1} = A \left(\frac{2x}{3} \right)^2 + 2A \left(\frac{x}{3} \right)^2 = \frac{1}{2} Ad^2 \quad (2)$$

$$I_{eq2} = 2A \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} Ad^2. \quad (3)$$

برای محاسبه سختی فنر معادل ساده ترین روش مدلی است که هر دسته از سه مهاری که در شکل نشان داده شده اند را با یک فنر جانشین می کنیم. در شکل ۱-۸ یک نمونه از دکلی که توسط یک دسته کابل سه تایی به طور جانبی با پیش کشیدگی اولیه T_p نگه داشته شده است نشان داده شده است.



شکل ۸-۱: دکل با دسته کابل سه تایی

بواسطه یک جابجائی افقی u و یک جابجائی قائم w در جهاتی که در شکل نشان داده شده است، برآیند نیروی کششی در مهارها از رابطه زیر بدست می آیند. (رابطه ۵-۱) [۱۲]

$$F_u = 3T_p \left(\frac{u}{c} \right) + \frac{3}{2} (EA_g - T_p) \left(\frac{a}{c} \right)^2 \times \left(\frac{u}{c} \right) \left\{ 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{a}{c} \right) \left(\frac{u}{c} \right) \right\}.$$

و برای جابجائی افقی در جهت مخالف داریم: (رابطه ۶-۱)

$$F_u = 3T_p \left(\frac{u}{c} \right) + \frac{3}{2} (EA_g - T_p) \left(\frac{a}{c} \right)^2 \left(\frac{u}{c} \right) \times \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{a}{c} \right) \left(\frac{u}{c} \right) \right\}.$$

جزء عمودی برآیند برای هر دو جهت جابجائی افقی یکسان و به صورت زیر مشخص میشود: (رابطه ۷-۱)

$$F_w = 3T_p \left(\frac{b-w}{c} \right) + \frac{3}{2} (EA_g - T_p) \left(\frac{b}{c} \right) \times \left\{ \left(\frac{u}{c} \right)^2 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right] - 2 \left(\frac{b}{c} \right) \left(\frac{w}{c} \right) \right\}$$

برای جابجائی های کوچک عبارت $\frac{u^2}{c}$ را می توان نادیده گرفت. علاوه بر این فرض شده است که $T_p \ll EA_g$. معادلات نیروی کششی کابل های فوق بدون در نظر گرفتن جهت جابجائی به صورت زیر درمی آیند: (رابطه ۸-۱)

$$F_u = 3T_p \left(\frac{u}{c} \right) + \frac{3}{2} (EA_g) \left(\frac{a}{c} \right)^2 \left(\frac{u}{c} \right).$$

$$F_w = 3T_p \left(\frac{b}{c} \right).$$

معادلات ۸-۱ را برای یک دکل شامل دسته ای از N مهار که بطور متقارن در اطراف دکل قرار گرفته اند به صورت زیر میتوان تعمیم داد: (رابطه ۹-۱)

$$F_u = NT_p \left(\frac{u}{c} \right) + \frac{N}{2} (EA_g) \left(\frac{a}{c} \right)^2 \left(\frac{u}{c} \right)$$

$$F_w = NT_p \left(\frac{b}{c} \right).$$

معادلات ۹-۱ برای به حساب آوردن حالت غیر خطی کابل ها و شکم دادگی آنها به صورت زیر اصلاح میشود (فرمول دیشینگر): (رابطه ۱۰-۱)

$$(EA_g)_{eq} = \frac{EA_g}{1 + \left(\frac{mga}{T_p} \right)^2 \frac{EA_g}{12T_p}},$$

در فرمول ۱۰-۱ mg وزن مرده کابل در واحد طول است. بدلیل اثرات شکم دادگی کابل ها و وزن مرده آنها کشش در طول کابل ثابت نیست، بدین جهت استفاده از یک کشش اولیه متوسط T_p توصیه میشود، که در این صورت نیروی کششی کابل به صورت زیر بدست می آید: (رابطه ۱۱-۱)

$$F_u = N \left\{ T_p + \frac{\frac{1}{2} EA_g \left(\frac{a}{c} \right)^2}{1 + \left(\frac{mga}{T_p} \right)^2 \frac{EA_g}{12T_p}} \right\} \left(\frac{u}{c} \right).$$

در نتیجه دسته مهارها توسط یک فنر خطی در جهت باد و یک بار متمرکز عمودی میتوان مدل سازی شود. سختی معادل فنر از رابطه زیر بدست می آید: (رابطه ۱-۱۲)

$$k_{eq} = N \left\{ T_p + \frac{\frac{1}{2} EA_g \left(\frac{a}{c}\right)^2}{1 + \left(\frac{mga}{T_p}\right)^2 \frac{EA_g}{12T_p}} \right\} \left(\frac{1}{c}\right).$$

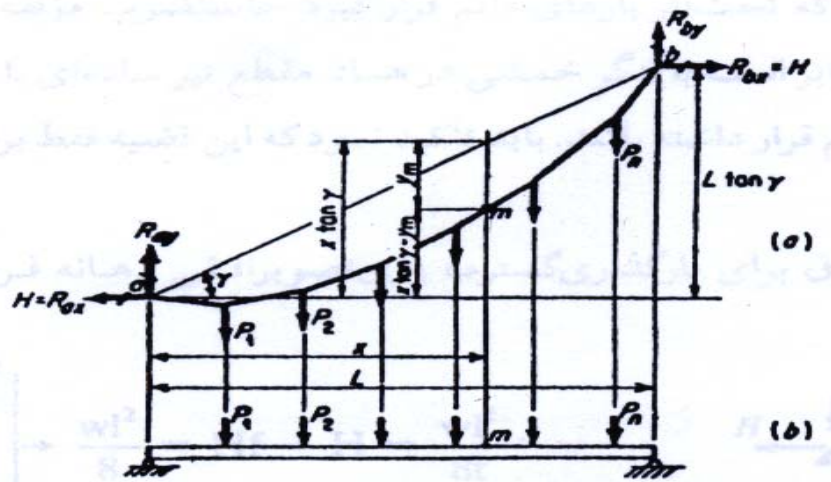
با پیشرفت در صنعت ارتباطات و مخابرات استفاده از دکل های مهار شده گسترش فراوانی یافته است. با توجه به حساسیت خاص و نقش ویژه تجهیزات نصب شده بر روی دکل های مهاری در امر اطلاع رسانی این دکل ها جزء زیر ساخت های ضروری و اجزاء اساسی سیستم های ارتباطی پس از زلزله، سیل و طوفان هستند. لوازم و تاسیساتی که بر روی این دکل ها نصب میشود بسیار گران قیمت میباشند و دارای حساسیت و ظرافت خاص هستند بنابراین محافظت از آنها در طول یک زلزله شدید از اهمیت بالایی برخوردار است لذا عملکرد لرزه ای این سازه ها بایستی به طور مناسبی ارزیابی شود. ذکر مطالب فوق لزوم یک طرح با حاشیه اطمینان بالا برای این دکل ها ایجاب میکند که لازمه آن داشتن اطلاعات کافی از رفتار سازه و شناخت پاسخ های آن به بار های احتمالی و به طور خلاصه یک آنالیز دقیق میباشد [۱۲].

۱-۸- کابل های معلق

از آنجایی که پایداری و سختی جانبی دکل های مهار شده کابلی توسط مهارهای جانبی آنها تامین می گردد لذا رفتار دکل های مهار شده چه در حالت دینامیکی و چه در حالت استاتیکی به شدت متأثر از رفتار کابل های نگهدارنده آن می باشد. نظر به اهمیت ذکر شده به مطالعه رفتار مهارها و کابلها می پردازیم و در این راستا به بررسی رفتار کابلها و بررسی روابط تحلیلی خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است که روابط به دست آمده و ارائه شده در این فصل اهمیت پایه ای و تئوریک دارند.

۱-۸-۱- کابل تحت اثر بار نقطه ای متمرکز

با فرض ناچیز بودن وزن کابل در مقابل بارهای وارده به طوری که بتوان از آن صرفنظر نمود و انعطاف پذیری کامل به طوری که هیچگونه لنگر خمشی مقاوم در طول کابل وجود نداشته باشد و تنها نیروی داخلی نیروهای کششی محوری باشد، کابل شکل زیر را در نظر بگیرید (شکل ۱-۹)، این کابل یک حالت کلی با دو تکیه گاه غیر همتراز a و b است که تحت اثر بارهای قائم p_1, p_2, \dots, p_n قرار دارد. مولفه افقی کشش کابل که آن را با H نشان می دهیم در تمام نقاط کابل دارای مقدار یکسان می باشد و واکنشهای افقی در دو تکیه گاه نیز برابر H می باشند [۴].



شکل ۱-۹: فرم کلی کابل معلق تحت اثر بار متمرکز

فرض کنید ΣM_b جمع جبری لنگرهای بارهای p_1, p_2, \dots, p_n حول نقطه b و ΣM_m جمع جبری لنگرهای بارهای p_1, p_2, \dots واقع در سمت چپ نقطه m حول نقطه m می باشد (m یک نقطه اختیاری واقع بر کابل میباشد). معادله تعادل لنگر تمام کابل حول نقطه b عبارتست از: (رابطه ۱-۱۳)

$$H((L_0 \text{tg}(\gamma)) + R_{ay} L - \Sigma M_b = 0$$

$$\Rightarrow R_{ay} = \frac{\Sigma M_b}{L} - H \text{tg}(\gamma)$$

تعدادل قسمتی از کابل واقع در سمت چپ نقطه m را در نظر می گیریم و معادله تعادل لنگری از آن را حول نقطه m می نویسیم.

$$H(X \cdot \text{tg}(\gamma) - Y_m) + R_{ay} \cdot X - \Sigma M_m = 0 \quad (\text{رابطه ۱-۱۴})$$

واکنش R_{ay} را در معادلات ۱-۱۴ جایگزین کرده و نتیجه را ساده می کنیم در این صورت خواهیم داشت:

$$H \cdot Y_m = \frac{X}{L} \Sigma M_b - \Sigma M_m \quad (\text{رابطه ۱-۱۵})$$

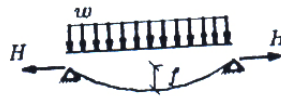
در این رابطه Y_m فاصله قائم از نقطه m کابل تا وتر ab می باشد که نقاط تکیه گاهی را به هم وصل می کند. طرف راست معادله ۱-۱۵ برابر است با لنگر خمشی در نقطه m تیری به طول L (شکل ۱-۹-b) که بر آن بارهای p_1 تا p_n اثر کنند. بنابراین براساس معادله ذکر شده می توان قضیه عمومی کابلها را به صورت زیر بیان نمود:

در هر نقطه از کابلی که تحت اثر بارهای قائم قرار گیرد حاصلضرب مولفه افقی کشش کابل و فاصله قائم آن نقطه تا وتر کابل برابر است با لنگر خمشی در همان مقطع تیر ساده ای با دهانه برابر با دهانه کابل که تحت اثر همان بارهای قائم قرار داشته باشد. باید تأکید نمود که این قضیه فقط برای کابلهای تحت بارگذاری قائم صادق است.

با استفاده از روش فوق برای بارگذاری گسترده روی تصویر افقی دهانه فرمول تقریبی زیر پیشنهاد می شود.

$$\text{ممان تیر فرضی} = \frac{wl^2}{8}$$

$$\rightarrow \frac{wl^2}{8} = Hf \rightarrow H = \frac{wl^2}{8f}$$



$$Hf = \text{ممان در کابل}$$

جهت تعیین طول کابل بر حسب خیز روابطی تقریبی برای نسبت خیزهای کوچک ارائه شده است که از آن جمله می توان به روابط زیر اشاره کرد:

$$S_o = L(1 + \frac{8}{3}F^2 + \frac{1}{2}tg^2\theta) \quad (\text{رابطه ۱-۱۶})$$

$$S_o = \frac{L}{\cos\theta} (1 + \frac{8}{3}(F \cos\theta)^2) \quad (\text{رابطه ۱-۱۷})$$

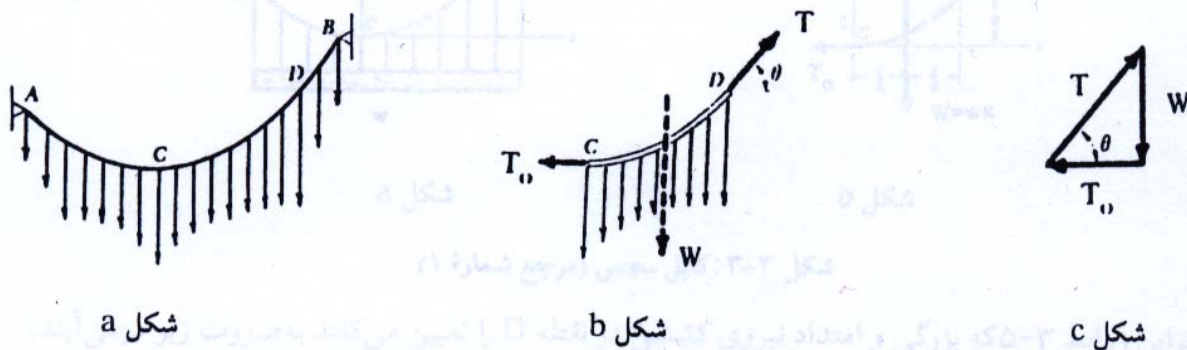
θ : زاویه بین وتر کابل با صفحه افق

$$F = \frac{f}{L} \quad \text{نسبت خیز}$$

L : طول تصویر افقی وتر کابل

۱-۸-۲- کابل‌های تحت بارگذاری گسترده بدون در نظر گرفتن اثر تغییر شکل الاستیک

کابل AB را که به نقاط ثابت A و B متصل و بار گسترده ای را تحمل می کند در نظر بگیرید (شکل ۱-۱۰). در حالت بارهای متمرکز دیدیم که نیروی داخلی در هر نقطه از کابل یک نیروی کششی در امتداد کابل می باشد. در حالت بارگذاری گسترده، کابل به شکل منحنی آویزان می گردد و نیروی داخلی در هر نقطه کابل (مانند نقطه D) نیروی کششی T مماس بر منحنی کابل در آن نقطه می باشد. در این بخش ابتدا نیروی کششی در هر نقطه از کابل را تحت یک بارگذاری گسترده معین پیدا می کنیم. سپس شکل کابل را تحت دو نوع خاص بارهای گسترده پیدا خواهیم کرد [۶].



شکل ۱-۱۰: کابل‌های تحت بارگذاری گسترده بدون در نظر گرفتن اثر تغییر شکل الاستیک

بافرض اینکه کابل تحت اثر حالت کلی بارگذاری گسترده قرار داشته باشد، نمودار جسم آزاد قسمتی از کابل واقع بین پایین ترین نقطه کابل (نقطه C) و یک نقطه معین دیگر از کابل (نقطه D) را رسم می کنیم (شکل ۱-۱۰-b). نیروهای وارد بر قسمت CD کابل عبارتند از نیروی کششی T_0 در نقطه C که افقی است، نیروی کششی T در نقطه D که در امتداد مماس بر منحنی در نقطه D می باشد و نیروی W که برآیند بار گسترده وارد بر قسمت CD کابل است. اگر مثلث نیروهای (شکل ۱-۱۰-c) را رسم کنیم روابط زیر به دست می آیند: (رابطه ۱-۱۸)

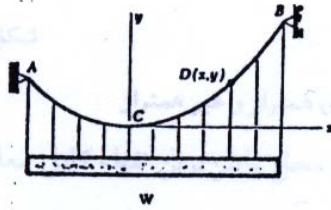
$$T \sin \theta = W \quad \text{و} \quad T \cos \theta = T_0$$

$$\tan \theta = \frac{W}{T_0} \quad \text{و} \quad T = \sqrt{T_0^2 + W^2}$$

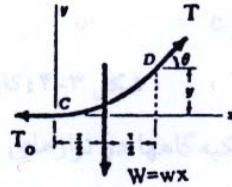
از روابط فوق می توان نتیجه گرفت که مولفه افقی نیروی کششی T در هر نقطه از کابل یکسان است و مولفه قائم T برابر با بزرگی W که از پایین ترین نقطه کابل اندازه گیری شود می باشد. روابط ۱-۱۸ نشان می دهند که نیروی کششی T در پایین ترین نقطه مینیمم و در محل یکی از دو تکیه گاه ماکزیمم است.

۱-۸-۳- کابل سهمی (تحت بار گسترده روی دهانه افقی)

فرض کنید کابل AB (شکل ۱-۱۱-a) بار گسترده یکنواختی را در امتداد افق حمل می کند. بارگذاری وارد بر کابلهای اصلی پلهای معلق را می توان این چنینی فرض نمود، چون وزن کابلها در مقایسه با وزن سواره رو کوچک می باشد. شدت بار در واحد طول افقی را با w (بر حسب N/m یا g/m) نشان می دهیم. اگر مبدا محورها را مطابق شکل در نقطه C، پایین ترین نقطه کابل انتخاب کنیم، بزرگی بار کل W که به وسیله قسمتی از کابل بین نقاط C و D به مختصات x و y حمل می شود برابر $W=wx$ خواهد بود (شکل ۱-۱۱-b).



شکل a



شکل b

شکل ۱-۱۱: کابل سهمی

بنابراین روابطی که بزرگی و امتداد نیروی کششی در نقطه D را تعیین می کنند به صورت زیر در می آیند:

$$T = \sqrt{T_0^2 + w^2 x^2}$$

$$\tan \theta = \frac{wx}{T_0} \quad (\text{رابطه ۱-۱۹})$$

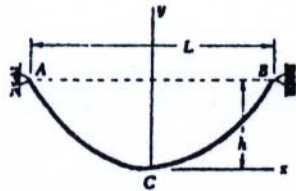
بعلاوه فاصله D تا خط اثر برآیند W برابر نصف فاصله افقی C تا D می باشد. با نوشتن معادله تعادل لنگری قسمت CD کابل حول نقطه D خواهیم داشت:

$$\Sigma M_D = 0 \Rightarrow wx\left(\frac{x}{2}\right) - T_0 y = 0 \Rightarrow \frac{wx^2}{2T_0} \quad (\text{رابطه ۱-۲۰})$$

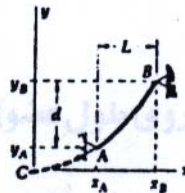
این معادله یک سهمی است که محور آن قائم و رأس آن در مبداء مختصات می باشد. بنابراین منحنی کابلهایی که تحت اثر بارهای یکنواخت در امتداد افق قرار دارند یک سهمی می باشد. کابلهایی که تحت اثر وزن خودشان آویزان می باشند به طور یکنواخت در امتداد افق بارگذاری نشده اند و شکل آنها سهمی نمی باشد. اما موقعی که کابل به قدر کافی کشیده شده باشد، اگر فرض کنیم کابل تحت اثر وزن خودش یک سهمی است خطای ناشی از این فرض کوچک می باشد.

موقعی که تکیه گاههای A و B کابل در یک تراز قرار دارند (شکل ۱-۱۲-a) و فاصله L بین تکیه گاهها (موسوم به دهانه کابل) و فاصله قائم h از تکیه گاهها تا پایین ترین نقطه کابل (موسوم به افت کابل) و

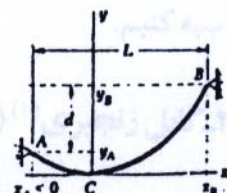
همچنین شدت بار در واحد طول افقی w معلوم باشند، کشش حداقل T_0 با جایگزینی $X=L/2$ و $y=h$ در رابطه فوق بدست می آید. در این صورت روابط ۱-۱۹ و ۱-۲۰ نیروی کششی در هر نقطه از کابل و شکل کابل را مشخص خواهند نمود.



شکل a



شکل b



شکل c

شکل ۱-۱۲: کابل معلق با تکیه گاههای همتراز و غیر همتراز

موقعی که تکیه گاهها در ترازهای مختلف قرار دارند، محل پایین ترین نقطه کابل معلوم نمی باشد و مختصات x_A ، y_A ، x_B ، y_B تکیه گاهها را باید تعیین نمود (شکل های ۱-۱۲b و ۱-۱۲c). برای پیدا کردن این مختصات، آنها را در معادله بدست آورده شده قرار می دهیم و همچنین از روابط $x_B - x_A = L$ و $y_B - y_A = d$ استفاده می کنیم (L و d به ترتیب فاصله افقی بین تکیه گاهها می باشند). طول کابل از پایین ترین نقطه C تا تکیه گاه B را می توان از رابطه زیر به دست آورد: (رابطه ۱-۲۱)

$$S_B = \int_0^{x_B} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

اگر از معادله فوق مشتق بگیریم و سپس از قضیه دو جمله ای استفاده کنیم خواهیم داشت: (رابطه ۱-۲۲)

$$S_B = \int_0^{x_B} \left(1 + \frac{w^2 x^2}{T_0^2}\right)^{\frac{1}{2}} dx =$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^{x_B} \left[1 + \frac{w^2 x^2}{2T_0^2} - \frac{w^4 x^4}{8T_0^4} + \dots \right] dx \\
&= x_B \left(1 + \frac{w^2 x_B^2}{6T_0^2} - \frac{w^4 x_B^4}{40T_0^4} + \dots \right)
\end{aligned}$$

با استفاده از رابطه $y_B = \frac{wx_B^2}{2T_0}$ رابطه فوق به صورت زیر در می آید: (رابطه ۱-۲۳)

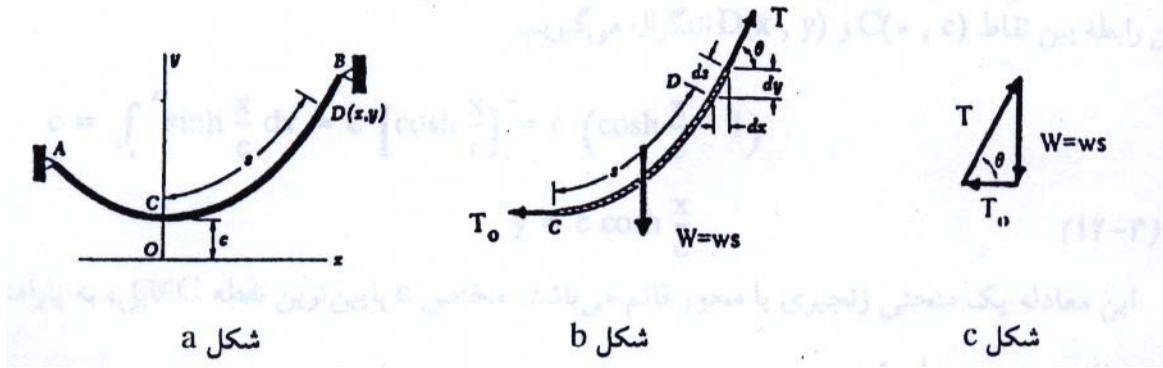
$$s_B = x_B \left[1 + \frac{2}{3 \left(\frac{y_B}{x_B} \right)^2} - \frac{2}{5 \left(\frac{y_B}{x_B} \right)^4} \right]$$

در اغلب حالات نسبت $\frac{y_B}{x_B}$ خیلی کوچکتر از واحد می باشد و فقط کافی است دو جمله اول سری را محاسبه کنیم.

۱-۸-۴- کابل زنجیری (تحت بار گسترده روی طول عضو)

اکنون کابل AB را که بار گسترده یکنواخت در طول خود کابل را حمل می کند در نظر می گیریم (شکل ۱-۱۳-a). کابلهایی که تحت اثر وزنشان آویزان می باشند این چنین بارگذاری شده اند. شدت بار در طول کابل را w می نامیم (w در طول کابل اندازه گرفته می شود). بزرگی بار کل w که به وسیله قسمتی از کابل به طول s از پایین ترین نقطه C تا نقطه D حمل می شود برابر $W=ws$ می باشد (شکل ۱-۱۳-b). به جای W این مقدار را در روابط بدست آمده قرار می دهیم. خواهیم داشت: (رابطه ۱-۲۴)

$$T = \sqrt{T_0^2 + w^2 s^2}$$



شکل ۱-۱۳: کابل زنجیری

نمودار جسم آزاد قسمت CD کابل در شکل ۱-۱۳-b رسم شده است. اما از این نمودار نمی توان مستقیماً معادله منحنی کابل را به دست آورد، زیرا فاصله افقی نقطه D از خط اثر برآیند W بار هنوز معلوم نمی باشند. برای به دست آوردن معادله منحنی کابل ابتدا عنصر کوچکی از کابل به طول ds را در نظر می گیریم. طول تصویر افقی این عنصر کابل $dx = ds \cos \theta$ می باشد. با توجه به مثلث نیروها در شکل ۱-۱۳-c داریم $\cos \theta = \frac{T_0}{T}$. در این صورت با استفاده از رابطه ۱-۲۴ می توانیم بنویسیم: [۸]

$$dx = ds \cos \theta = \frac{T_0}{T} ds = \frac{wcds}{w\sqrt{c^2 + s^2}} = \frac{cds}{\sqrt{c^2 + s^2}} \quad (\text{رابطه ۱-۲۵})$$

مبداء O محورهای مختصات را به فاصله C مستقیماً در زیر نقطه C انتخاب می کنیم (شکل ۱-۱۳-a) و از رابطه فوق از C(0, c) تا D(x, y) انتگرال می گیریم. (رابطه ۱-۲۶)

این معادله را که طول s قسمت CD کابل و فاصله افقی x را به یکدیگر مربوط می کند می توان به صورت زیر نوشت: (رابطه ۱-۲۷)

$$s = c \sinh \frac{x}{c}$$

اکنون رابطه بین مختصات x و y را با نوشتن رابطه $dy = dx \tan \theta$ به دست می آوریم. با توجه به شکل ۱-۱۳- c داریم $\tan \theta = W/T_0$. با استفاده از روابط ۱-۲۶ و ۱-۲۷ می توانیم بنویسیم: (رابطه ۱-۲۸)

از این رابطه بین نقاط $C(0, c)$ و $D(x, y)$ انتگرال می گیریم. (رابطه ۱-۲۹)

$$y - c = \int_0^x \dots$$

$$y = c \cosh \frac{x}{c}$$

این معادله یک منحنی زنجیری با محور قائم می باشد. مختص c پایین ترین نقطه C کابل، به پارامتر منحنی زنجیری موسوم است.

اگر طرفین روابط ۱-۲۸ و ۱-۲۹ را به قوه دو رسانده و از یکدیگر کم کنیم رابطه زیر بین y و s به دست می آید:

$$y^2 - s^2 = c^2 \quad (\text{رابطه ۱-۳۰})$$

کمیت s^2 را از رابطه فوق به دست آورده در معادله آخر روابط ۱-۲۹ قرار می دهیم.

$$T_0 = wc \quad ; \quad W = ws \quad ; \quad T = wy \quad (\text{رابطه ۱-۳۱})$$

معادله آخر در روابط فوق نشان می دهد که نیروی کششی در هر نقطه D کابل با فاصله قائم D تا محور افقی X متناسب است [۱۲].

موقعی که تکیه گاههای A و B در یک تراز قرار داند افت h کابل (فاصله قائم بین تکیه گاهها و پایین ترین نقطه کابل) باتوجه به محورهای مختصات انتخاب شده از رابطه زیر به دست می آید:

$$h = y_A - c \quad (\text{رابطه ۱-۳۲})$$

در بعضی مسائل کابل زنجیری، ناچار به حل معادلات فرازنده می باشیم که باید آنها را به روش های عددی (مثلاً تقریبات متوالی) حل نمود. اما موقعی که کابل به اندازه کافی کشیده می باشد می توان بار گسترده را در امتداد افق یکنواخت فرض نمود و به جای منحنی زنجیری از سهمی استفاده نمود. بدین ترتیب خطای کوچکی در محاسبات وارد می شود ولی حل مسأله به مقدار زیادی آسان می گردد.

هنگامی که تکیه گاههای A و B در ترازهای مختلف قرار دارند محل پایین ترین نقطه کابل مشخص نمی باشد. در این مورد نیز می توان مسأله را مطابق کابلهای به شکل سهمی حل نمود. بدین ترتیب که منحنی کابل باید از نقاط تکیه گاهی عبور کند و روابط $x_B - x_A = L$ ، $y_B - y_A = d$ نیز برقرار است (L و d به ترتیب فاصله افقی و قائم بین تکیه گاهها می باشند). با استفاده از چهار معادله حاصل، چهار مجهول x_A ، y_A ، x_B و y_B به دست می آیند.

۱-۸-۵- ویژگیهای کابلهای فولادی

استفاده از سه نوع مختلف از کابلهای فولادی در مصارف سازه ای معمول است. اول وایرها (wire) که سیمهایی موازی هستند و به هم بسته و پیچیده نشده اند. دوم سیمهای سازه ای (strands) که از وایرهائی که به دور یک هسته مرکزی پیچیده می شوند تشکیل یافته اند و سوم طنابهای سازه ای (rope) که چندین سیم با قطر کمتر دور یک هسته ضخیم تر پیچیده شده است (شکل ۳-۹). طنابهای سازه ای کمترین مدول

الاستیسیته را دارند ($E=140000 \text{ Mpa}$) پس از آن سیمها با مدول ($E=170000 \text{ Mpa}$) و سپس سیمهای موازی بیشترین مدول الاستیسیته را دارا می باشند ($E=210000 \text{ Mpa}$).

معمولاً تنش نهایی در حدود 1500 Mpa فرض می شود و در این حالت کرنش حداکثر در حدود 3% برای rope و 6% برای strand می باشد. همچنین برای هر یک ضرایب اطمینان فرق می کند. ولی معمولاً یک تنش مجاز 500 Mpa (با ضریب اطمینان در حدود ۳) برای strand و rope به کار می رود. برای سیمهای موازی ضریب اطمینان $2/5$ با تنش مجازی در حدود 600 Mpa توصیه می شود [۱۳].

فصل دوم

مروارث بر تاریخچه

تحقیقات انجام گرفته

۲-۱- آنالیز استاتیکی کابل ها

ویلسون و وین (۱۹۷۴) راه حل مستقیمی برای کابلی با بار متمرکز یا بارگذاری متلاطم و همسان ارائه کردند. آنها فرض کردند که کابل دارای مقطع سهمی شکل است. راه حل آنها مربوط به کابلی با وترهای مورب (شیب دار) بود.

ایروین (۱۹۷۵) راه حل های عمومی را برای پاسخ کابل با وتر افقی، آزاد و معلق تحت بار متمرکز یا بار گسترده ارائه کرد. در این راه حل ها فرض می شد که مقطع کابل یک سهمی الاستیک است. این مقطع محدود به کابل هایی می شد که نسبت افت (شکم دهی) به دهانه سازه، یک به هشت بود.

ایروین و سینکلایر (۱۹۷۶) یک سری معادلات غیر ابعادی ارائه کردند که براساس آنها، راه حل دقیقی برای کابل الاستیکی آویزان تحت وزن خود مشخص شد. حل این معادلات می توانست یک راه حل زنجیره ایی الاستیکی برای بارهای غیرمتمرکز ایجاد کند. این راه حل ها به شرح رفتارهای استاتیکی و تئوریک واقعی یک کابل الاستیکی خطی مهاری که در طول آن، عایق هایی قرار گرفته است می پردازد.

ایروین (۱۹۸۱) کتاب مشهور «سازه های کابلی» را به عنوان مرجعی کاملی منتشر کرد که میتواند تاریخچه و روند کار تئوریک در زمینه مکانیک کابل ها و سازه های کابلی را نشان دهد. در این کتاب، او به کاری که خود و دیگران قبل از ۱۹۸۰ انجام داده اند، می پردازد. این کتاب به شرح بسیاری از جنبه های آنالیز کابل می پردازد از جمله معادلات واقعی و تقریبی که به شرح رفتار استاتیکی کابل های معلق (کابل های افقی و مورب) اشاره دارد. سپس با در نظر گرفتن دسته کابل های مهاری و اثرات افت (شکم دهی) و الاستیسته توجه دارد سپس معادلات عمومی را ارائه می کند [2].

بل (۱۹۸۶) جزئیاتی را در مورد جزء محدود سه بعدی عمومی (عددی) ارائه کرده که می تواند به بارگذاری مربوط به سیالات و بارگذاری توزیعی سه بعدی بر کابل ها پردازد.

بل (۱۹۸۸) جزئیات آنالیزی رادر مورد کابل الاستیکی ارائه کرده است که این جزء در جای دیگر جهت گیری شده و در هر صفحه بارگذاری ناهمسان توزیعی را داشته باشد. او از جزء افقی تحت کشش و زاویه کابل به عنوان مجهول در معادله استفاده کرده است.

لئونارد (۱۹۸۸) کتاب مرجع «سازه های کششی: رفتار و آنالیز» را منتشر کرد که به موضوع سازه های کابلی توجه دارد. موضوع کتاب او جدید است و نسبت به کتابهای منتشر شده قبلی توسط ایروین (۱۹۸۱) دیدگاه بهتر و ارائه شیواتری دارد. در این کتاب پر کاربرد آنالیز جزء محدود به عنوان روش اصلی برای حل مسئله عمومی سازه های کابلی تحت انواع مختلف بارگذاریها استفاده میشود. در این کتاب، مشخصات سازه های تحت کشش مورد بحث قرار گرفته است که از آن جمله میتوان به جنبه های عمومی رفتار و مواد ساختمانی آنها اشاره کرد. همچنین در مورد استاتیک بخشهای مختلف کابل و دکل با توجه به پاسخ به

بارهای گسترده و متمرکز و رفتار سه بعدی آنها بحث می شود. این کتاب به شرح آنالیز جزء محدود (استاتیک) شبکه های کابلی از طریق توسعه اجزاء کابل و آنالیز غیرخطی جزء محدود کابل می پردازد. در نهایت، رفتار خطی شده و غیرخطی غشاها (پوسته ها) معرفی شده و اثرات پیش تنش بر رفتار پوسته های تحت فشار شرح داده می شود.

والابان (۲۰۰۰) مدل جدیدی را معرفی کرد که به شرح تعادل استاتیکی دو بعدی کابل تحت بارهای همسان یا متمرکز می پردازد. در این مدل، او از آخرین فرضیه برای رسیدن به معادله تعادلی غیرخطی کابل استفاده کرده است. برای حل این معادلات او از فرمول بندی روش المان محدود FEM همراه با روش پیوسته (متوالی) استفاده کرده است. سپس در همان سال به بررسی مسائل استاتیکی کابل سه بعدی، فرضیه سازی و استفاده از روشهای یکسان پرداخت.

۲-۲- دینامیک کابل

۲-۲-۱- مقدمه

ایروین در کتابش (۱۹۸۱) با عنوان سازه های کابلی، به تحقیق مستند قبلی در مورد دینامیک های کابل که قبل از ۱۹۸۰ منتشر شده بود پرداخته است. در این کتاب، او به دینامیکهای کابل معلق پرداخته و تئوری خطی ارتعاشات آزاد، ارتعاش اجباری خطی شده و تئوری های غیرخطی در آن مطرح شده است. همچنین او به کاربردهای دینامیکهای سازه کابلی، مانند دسته های کابل هایی مهاری، خریپاهای کابلی و پل های معلق پرداخته و علاوه بر آنها، کاربردهای سه بعدی هم در نظر گرفته شده است.

لئونارد در کتابش (۱۹۸۸) بخش کاملی را به موضوع دینامیک های سیستم های کابلی اختصاص داده است. این بخش به دینامیکهای خطی شده سیستم های کابلی پرداخته که شامل نوسان آزاد کابل ها و کاربرد مدل های کابلی جزء محدود در دینامیک های کابل می باشد. او تحقیق خود را روی دینامیکهای غیرخطی سیستم های کابلی توسعه داده و شرح کاملی را برای یکپارچگی زمانی مستقیم در معادلات غیرخطی، جزء غیرخطی کابل ایزوپارامتریک و مدلسازی نیروهای هیدرو دینامیک ارائه کرده است. همچنین او پاسخ دینامیکی غشاها تنش و آنالیز جزء محدود رفتار دینامیکی و غیرخطی پوسته های سازه را ارائه کرده است.

تری آنتافیلو (n.d) به بررسی دینامیکهای کابل از طریق پیش زمینه های تاریخی و مرور مقالات در مورد فرمول بندی مسئله و دینامیکهای خطی پرداخته است. تاکید او بر تاثیر الاستیته (خاصیت ارتجاعی) روی دینامیکهای خطی کابل ارتجاعی که بین دو نقطه در یک سطح آویزان است، بوده است.

استاروسک (۱۹۹۴) به بررسی تاریخچه تئوری مربوط به نوسان های کابلی از قرن ۱۸ تا زمان حال پرداخته است. او معادلات اصلی دینامیک های خطی کابل شکم داده کششی را نشان داده و براساس این معادلات، سختی دینامیکی را بدست آورده است. به نظر او محدود کردن انتقال ها نتایج دیگری را به همراه دارد: مدول های هم ارز استاتیکی الاستیسیته که توسط ارنست مطرح شده و فرکانس های طبیعی جابجایی که ایروین وکاگی (۱۹۷۴) ارائه کرده اند. همچنین او در مورد مکانیسم های تحریک دینامیکی واندرکنش دینامیکی میان کابل ها و دیگر اجزاء سازه بحث کرده است [2].

۲-۲-۲- روشهای حل

روهرس (۱۸۵۱) به بحث در مورد راه حل تقریبی ارائه شده توسط فوریر پرداخته و آن را برای ارتعاشات زنجیره افقی و ترها که غیرکششی بوده و انحنای کمی دارد. (شکم دهی آن صفر نیست) ، آماده کرده است. او جزئیاتی را در مورد سه راه حل معادل در مسئله ارائه کرده است.

وینگت و هوستون (۱۹۷۶) یک مدل دینامیکی سه بعدی غیرخطی و قطعه محدود را برای کابل یا زنجیر ارائه کرده اند. این مدل شامل قطعات متصل به یکدیگر توسط اتصالات مفصلی گلوله ای می باشد که اندازه، شکل و حجم آن اختیاری است. به علاوه، این مدل این امکان را فراهم می کند که در هر اتصال، یک سیستم فشاری اختیاری به کار رود. از این مدل برای ایجاد یک کد کامپیوتری استفاده شد که براساس آن معادلات سیستماتیک، سیستم فشاری و دینامیکی ارائه می شوند. خروجی برنامه و دربر گیرنده تاریخچه زمانی کل پاسخهاست. (جابجایی ها، سرعت ها، شتاب ها و نیروها). این مدل بیشتر معطوف به دینامیک های کابل با حرکت محدود است و کاربرد آن بیشتر در آنالیز حرکت در ارتباط با زنجیرهای سنگین یا کابل های یدک کش طویل است.

لئونارد (۱۹۷۳) به توسعه جزء محدود برای پاسخ دینامیکی کابل های غیرخطی پرداخته که اجزاء کابل صاف را در مدل منحنی سیستم کابل به کار برده است. توسعه این آنالوگ مربوط به حالتی بود که در آن اجزاء بسیار خمیده در مدل سازی سیستم کابل استفاده شوند تا از گسستگی گره ای که در فرضیه ها آمده، جلوگیری شود. او گفته که با استفاده از اجزاء خمیده نمی توان پاسخی پایدار و دقیق بدست آورد.

هنگولد و راسل (۱۹۷۶) گروهی از اجزاء غیرخطی را ارائه کرده اند که در سازه های کابلی کاربرد دارند. این از نظر هندسی غیر خطی اند و هر گونه تغییر شکل الاستیکی در آنها می تواند ایجاد می شود. آنها به بررسی مسائل تغییر مکان استاتیکی و تعیین فرکانس طبیعی برای ارتعاشات کوچک برای تعادل غیرخطی کابل در یک دهانه پرداختند [3].

فرید (۱۹۸۲) به معرفی جزء محدود غیرخطی با درجه بالاتر (سه گره ایی) در کابل کششی پرداخته است. او برای یکپارچه سازی انرژی پتانسیل کل و استفاده از راه حل نیوتن-رافسون، به تکمیل ربع دایره Gauss در معادلات سختی غیرخطی پرداخته است.

وارنیتیچای، فوجینو و ساسومپو (۱۹۹۵) یک مجموعه از معادلات را برای جابجایی های عرضی دینامیکی کابلی با شکم دهی کوچک بدست آورده اند و اثرات جابجایی های محدود و جابجایی های تکیه گاهی کوچک را در نظر گرفته اند. جابجایی های کابلی به دو بخش تقسیم می شوند: جابجایی های شبه استاتیک و جابجایی های مودال. آنها از روشی استفاده کردند که در آن، جابجایی های کل بصورت جابجایی های موضعی و کلی بیان می شوند. همچنین آنها از معادلات جابجایی لاگرانگ برای رسیدن به معادلات جابجایی های غیرخطی کابل با اتصالات غیرخطی استفاده می شد. آنها از FEM سه بعدی برای مدل سازی جابجایی های کلی سیستم سازه ایی کابلی که ترکیبی از مودهای ویژه بود استفاده کردند که در آن، کابل ها به عنوان تاندون در نظر گرفته می شوند. تحقیق نشان داد که برای کنترل مودهای کلی یا موضعی احتمالات زیادی را می توان در نظر گرفت.

محرابی و طباطبایی (۱۹۹۸) فرمول بندی تفاوت محدود را در آنالیز ارتعاش آزاد کابل های سازه ای معرفی کردند. فرمول بندی آنها مربوط به اثرات سختی خمشی کابل و مشخصه های کششی شکم دهی آن است و می تواند ابزاری برای تعیین شکلهای مورد ارتعاشی و فرکانس ها محسوب شود. همچنین این فرمول بندی برای حالات انتهایی کابل، سطح مقطع های مختلف و جهش ها یا میرانه های میانی کابل کاربرد دارند. آنها از فرم غیرابعدی فرمول بندی برای تحقیق پارامتریک تاثیر سختی خمشی و کششی شکم دهی روی پاسخ دینامیکی کابل ها استفاده کرده اند. در کاربرد عملی، آنها فرمول غیرابعدی ساده ایی را برای ارتباط و فرکانس های ارتعاشی کابل ها با قابلیت افزایش شکم دهی و سختی خمشی پیشنهاد کردند. این فرمول می تواند به عنوان ابزاری برای اندازه گیری نیروهای کششی در کابل های نگهدارنده با استفاده از روش ارتعاشی محسوب شود [3].

لیسا و ساد (۱۹۹۴) مجموعه جدیدی از معادلات پیوسته را برای شرح ارزه ای جانبی غیرمیرا و آزاد غیرخطی در یک نوار کشیده شده معرفی کردند. برای حل معادلات غیرخطی، آنها از روش جدید گالرکین (Galerkin) استفاده کردند که جابجایی های عرضی و طولی را در فضا و زمان نشان می دهد. آنها اعتبار راه حل ها را به وسیله راه حل های تفاوت محدود مستقل مشخص می کنند. به نظر آنها مودهای بالاتر وقتی ایجاد می شوند که یک مود شروع شده و جابجایی به صورت غیر تناوبی باشد.

والابان (۲۰۰۰) مجموعه جدیدی از معادلات مختلف را برای شرح ارتعاشات سه بعدی و غیرخطی در کابل افقی تحت تأثیر بارگذاری دینامیکی یکنواخت ارائه کرده است. در این کار او از چند فرضیه برای رسیدن به معادلات حرکت کابل استفاده کرده است. در حل این معادلات، او از فرمول بندی تفاوت محدود

مؤثر استفاده کرده و آن را با روش دیگری ترکیب کرده است. او به تعیین اعتبار این مدل پرداخته و روش محاسبه را با مقایسه نتایج بدست آمده از راه حل های جزء محدود و توسط دیگران ارائه کرده است.

۲-۲-۳- ارتعاش (نوسان) آزاد

ساکسون و کان (۱۹۵۳) معادله دیفرانسیل درجه ۴ را بدست آورند که ارتعاشات دامنه ایی کوچک را در زنجیریا کابل افقی غیرالاستیکی با هر مقدار شکم دهی را در بر می گرفت. آنها آن را به دو مسئله درجه ۲ تقابل کردند و برای هر کدام دو راه حل مجانب بدست آوردند.

ایروین و کافی (۱۹۷۴) یک تئوری خطی برای نوسان های آزاد درون صفحه ایی یا برون صفحه ایی کابل افقی معلق با نسبت شکم دهی یک به هشت معرفی کردند. با در نظر گرفتن یک سطح سهمی شکل ، آنها راه حل های صحیحی را برای فرکانس های طبیعی و شکل های نرمال و تانژانتی از مودها بدست آوردند. آنها معادلاتی را در مورد شرح پدیده تلاقی مودال ارائه و مورد بحث قرار دادند. وست، گسکویندر و سوهوسکی (۱۹۷۵) در تحقیقی نشان دادند که کابل ها را به عنوان اتصالی محسوب میشوند که شامل تعداد محدودی میله های صاف می باشند که با پیچ های بدون اصطکاک به هم وصل می شوند. آنها معادلات غیرخطی حرکت را برای نوسان آزاد بدست آورند و سپس آنها را خطی کردند. سپس مسئله درجه مرزی را به عنوان مجموعه هایی از مسائل با مقدار اولیه برای فرکانس هایی مجهول حل کرده اند. همچنین مطالعات پارامتریک را برای بررسی مشخصه های کابل های معلق با شکلهای مختلف انجام دادند.

هنگولد، راسل و مورگان (۱۹۷۷) با استفاده از اجزاء محدود غیرخطی نتایج آنالیز جامعی را برای نوسان آزاد سه بعدی کامل با یک دهانه ارائه کردند. به نظر آنها این روش در کل طیف های مربوط به شرایط نهایی و غیرخطی بودن هندسی نتایج خوبی ارائه می کند. آنها نشان دادند که برای کابل همگن با سطح مقطع ثابت، موقعیت تعادلی غیرخطی و فرکانس های طبیعی فقط بستگی به شرایط نهایی و نسبت سختی به وزن دارد. آنها گفتند که بر اساس طرحهای ایجاد شده، می توان مقدار واقعی نسبت سختی به وزن بدست آورد از اینرو انحراف از این مقدار منجر به تغییرات جزئی در فرکانس ها می شود. به علاوه براساس محاسبات آماری، آنها یک فرمول تجربی ارائه کردند که کمترین فرکانس طبیعی را به خوبی محاسبه می کند. وقتی مسائل پیچیده تری در مورد جرم متمرکز، بارهای اعمال شده و بهسازی شبکه ایی پیش می آید، روش آنها هنوز هم معتبر است و می تواند در محاسبه استفاده شود.

گامبیر و بلچور (۱۹۷۷) روش سریع و دقیقی را برای پیش بینی مشخصه های ارتعاش آزاد کابل های پیش تنیده و شبکه کابل های نسبتاً ساده ارائه کردند. در این روش، آنها به مقایسه **sparing-mass** پرداختند که در طراحی روش دقیق استفاده می شوند و نتایج حاصل از روش پیشرفته در فرم چند جمله ای، محاسبه می گردد.

رامبرگ و گریفین (۱۹۷۷) به بررسی تجربی نوسان های طبیعی کابل های دریایی در مدل ارائه شده توسط ایرومن و کافی (۱۹۷۴) پرداختند. آزمایش های آنها برای تعیین فرکانس طبیعی، میرایی سازه ای: میرایی سیال و جرم افزوده سیال انجام شد. آنها دیدند که دینامیک های سازه ای کابل های معلق دریایی با شکم دهی (افت) جزئی می تواند با استفاده از مدل پیشنهادی در زمانی شرح داده شود که میرایی و جرم افزوده سیال در آن مطرح شده باشد.

ایروین (۱۹۷۸) نشان داد که کار تحلیلی اولیه او می تواند گسترش یابد و آویزان شدن کابل مورب را تحت وزن خالص، پوشش دهد. به ویژه، فرکانس های طبیعی غیر ابعادی برای مودهای متقارن درون صفحه ایی بستگی به یک پارامتر غیر ابعادی دارد در حالیکه فرکانس های مودهای درون صفحه ایی نامتقارن و مودهای خارج از صفحه مستقل به عنوان پارامترهای دیگر محسوب می شدند. این یافته ها محدود به کابل ها و مقطعی هستند و با وترها فرق دارند. براساس این محدودیت، نتایج را می توان برای شیب وتر، از افقی تا عمودی، به کار برد. با مقایسه این کار با آنالیزهای قبلی جزء محدود، او نتیجه گرفت که تئوری خطی برای کابل های مورب آویزان تحت وزن خالص و کابل هایی که در سازه ها کاربرد دارند می تواند ابزار سریع و دقیقی برای تعیین فرکانس های طبیعی باشد [10].

گامبیر و بلچور (۱۹۷۸) از روش جزء محدود برای بررسی فرکانس های طبیعی و مودهای نوسان (ارتعاش) کابل های شکم داده استفاده کرده اند. آنها نتایجی را برای اجزاء صاف و خمیده بدست آوردند و آن را با راه حل های کلاسیک موجود در مقالات مقایسه کردند. در نهایت یک تحقیق پارامتریک را برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف روی طیف فرکانس های طبیعی کابل شکم داده انجام دادند. و نتایج را در فرم گرافهای غیر ابعادی نشان دادند که می تواند فرکانس های طبیعی درون صفحه ایی را با دامنه های وسیعی از نسبت های شکم دهی - دهانه استفاده کند. آنها نتیجه گرفتند که اولاً فرکانس های طبیعی بستگی به شکم دهی و ثانیاً بستگی به مقدار شکم دهی نسبت به دهانه دارد و آنها مستقل از جرم کابل یا سختی محوری اند. رامبرگ و بار تولموف (۱۹۸۲) به تکمیل تئوری خطی ایروین و کافی (۱۹۷۴) برای کابل های کششی شکم دهی کمتری با نسبت های به دهانه $\frac{1}{8}$ با توجه به ارتعاش های کابلی پرداختند. آنها به بحث در مورد توسعه آنالیز اولیه که ایروین آن را ارائه کرده بود پرداختند. در این بحث، ارزش کابل های شیب دار که در ارتفاعات مختلف دارای تکیه گاه بودند با در نظر گرفتن سیستم هماهنگ کننده وتر کابل مورب، تعدیل گردید. همچنین آنها به بررسی کار بر تئوری اصلاح شده در ترکیبات مختلف شیب وتر و نسبت

های شکم دهی به دهانه پرداختند. تریانتافیلو (۱۹۸۴) معادلاتی بدست آورد که به شرح رفتار دینامیکی و ترمورب در کابل الاستیکی و بدون میرایی می پردازند. او نشان داد که برای کابل شیب دار علاوه بر داشتن سطح مقطع مودال، یک چرخش منحنی ایجاد می شود.

تریانتافیلو و گرینفولگ (۱۹۸۶) معادلات مجانبی برای فرکانس های طبیعی و شکل دهی مورد استاتیک در کابل الاستیکی مورب بدست آوردند. این معادلات براساس نتایج بدست آمده از کشش شبه استاتیک بدست آورده اند. این فرضیه می تواند ارزش نتایج چند مود طبیعی اول را که کمتر از فرکانس های طبیعی الاستیکی اولیه است را محدود کند. این دانشمندان گفتند که برای کابل های افقی، کل نتایج قبلی ثبت شده اند در حالیکه برای کابل های مورب که خواص دیگری را هم دارند، نتایج با کارروی نتایج کابل افقی، بدست نمی آیند. آنها پدیده تقاطع الغایی و مود هیبریدی (مثلاً ترکیبی از شکلهای متقارن و نامتقارن) را در کابل های مورب بدست آورده اند بویژه بر اثر کشش دینامیکی، آنها ثابت کردند که در کابل مورب، نه تنها مودهای متقارن، بلکه مودهای هیبریدی ارزش (نوسان) مهم در تعیین کشش های دینامیکی به یک اندازه مهم هستند.

تاکاشی و کونیشی (۱۹۸۷) به آنالیز و ارائه نتایج ارتعاش آزاد غیرخطی در کابل های افقی و شیب دار در سه بعد پرداختند و در آن از روش گالکین (Galerkin) و تعادل هارمونیک استفاده کردند. آنها مقادیر زیاد شکم دهی را نسبت به دهانه در نظر گرفتند و نتایج محاسباتی را برای پارمترهای مختلف هندسی و مصالح ارائه کردند. آنها نشان دادند که غیرخطی بودن هندسی می تواند به مقدار شکم دهی نسبت به دهانه از نوع سفت شدگی یا نرم شدگی بستگی داشته باشد. آنها نشان دادند که بار جانبی می تواند مشخصه های ارتعاشی را با ایجاد مودهای جفت شده در سه مسیر به تغییر دهد. به علاوه آنها نشان دادند که وجود یک جزء تناوبی در بار جانبی منجر به ناپایداری پارامتریک در کابل می شود [10].

کاشانی (۱۹۸۹) تحقیقی روی فرکانس های طبیعی درون صفحه ای یا برون صفحه ایی برای کل نسبت های شکم دهی به دهانه در کابل معلق انجام داد. در این تحقیق او به مقایسه نتایج بدست آمده خود با نتایج بدست آمده توسط دیگر محققان (تجربی یا تئوریک) پرداخته است. او راه حل های دقیق تری برای فرکانس های طبیعی کابل های بدون قابلیت کش آمدن ارائه کرد.

کای و چن (۱۹۹۴) به بررسی دینامیکهایی غیرخطی کابل سنگین معلق الاستیکی برای استفاده در سیستم دودکش / کابل پرداخت. آنها از آنالیز عددی برای پیش بینی همناوی های پارامتریک و خارجی کابل الاستیکی که حاصل نوسان های کوچک در کابل های متصل به دودکش است استفاده کردند و جابجایی خمشی دودکش را بررسی کردند. آنها با توجه به کیش کابل به غیرخطی های مکعبی و با توجه به خمیدگی کابل تعادلی در حالت کج به غیرخطی مربعی این تحقیق را انجام دادند. آنها آنالیزهای پارامتریکی

دیگری را برای تشخیص هم‌نوایی‌های خارجی و پارامتریک و جفت‌شدگی آنها انجام دادند. آنها دیدند که زوایای خمش و مقدار دامنه‌ی تحریک در این هم‌نوایی‌های نقش مهمی را ایفا می‌کند.

۲-۲-۴- ارتعاش واداشته (اجباری)

دومینگوز و اسمیت (۱۹۷۲) اصول روش‌های به کار رفته در ارزیابی رفتار دینامیکی سیستم‌هایی کابلی را ارائه کردند. این روش اولین بار برای آنالیز سیستم‌های لنگر انداختن کشتی‌ها را در اقیانوس‌های عمیق استفاده شد. این روش، باعث توسعه توانایی استاتیکی برای سیستم‌های آنالیزکننده نسبت به توانایی‌های دینامیکی گردید. در ابتدا به ارزیابی رفتار آماری سیستم پرداخته می‌شود و سپس در پاسخ به بارگذارهای دلخواه یا تغییر شکل سیستم مشخصه‌ها یا جابجایی اجباری آنها را نشان می‌دهد.

علی (۱۹۸۶)، معادلاتی را در مورد جابجایی کابل در حالتی که کابل در دو ارتفاع مختلف به تکیه‌گاه وصل شده و بارهای استاتیکی و دینامیکی میان تکیه‌گاه‌ها وجود دارد، ارائه کرد. کار او مربوط به نوسان‌های واداشته در کابل شکم‌داده با تکیه‌گاه‌هایی با قابلیت جابجایی است. او از ارتباط غیرخطی کرنش جابجایی برای محاسبه تغییرات کشش کابل در طول جابجایی استفاده کرد. از معادلات جفتی و غیرخطی حرکت را با استفاده از روش المان محدود برای زمانی که تکیه‌گاه ثابت یا متحرک وجود دارد، حل کرد. او بار ثابت و یکنواخت در طول زمان، سینوسی در طول زمان و تاریخچه‌ی زمانی تجویز شده در یک سر کابل را در نظر گرفت. بر اساس این نتیجه‌گیری، تئوری خطی راه‌حل‌های خوبی برای جابجایی‌ها می‌دهد، گرچه تغییرات در کشش کابل آنقدر زیاد است که نمی‌توان آن را نادیده گرفت.

تا کاهاشی و کونیشی (۱۹۸۷) به آنالیز ارتعاشات پارامتریک خارج صفحه‌ای کابل‌ها تحت بارهای سینوسی متغیر در طول زمان پرداختند و از روش چند درجه آزادی استفاده کردند. آنها به آنالیزهای معادلات جفتی Hill با روش تعادل هارمونیک پرداختند تا پاسخ‌های درون صفحه‌ای و ارتعاشات ناپایدار برون صفحه‌ای نشان داده شود. آنها به بررسی مشخصه‌های اساسی و مسئله مورد نظر پرداختند و نتایج عددی را برای پاسخ‌های درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای بدست آوردند.

رائو و اینگار (۱۹۹۱) معادلات غیرخطی جفتی جابجایی کابل شکم‌داده را در اولین مورد متقارن برای نوسان درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای با استفاده از روش مقیاس‌های متعدد برای پاسخ ارتعاش واداشته (اجباری) حل کردند. آنها موقعیت گردبادزایی را با اعمال بار جانبی یکنواخت بر جزء هارمونیک درون صفحه‌ای، مدلسازی کردند. سپس آنالیز پایداری را روی راه‌حل‌های حالت پیوسته انجام دادند و به بررسی تأثیر شکم‌دهی کابل در این راه‌حل‌ها و پایداری آنها پرداخته‌اند. آنها در مورد تأثیر بار جانبی همراه یا درون هم‌نوایی داخلی در بخش‌های پایداری بحث کرده‌اند [3].

چنگ و پرکینس (۱۹۹۴) در تحقیق خود به بررسی پاسخ واداشته (اجباری) کابل الاستیکی شکم داده که تکیه گاههای جداگانه دارد، پرداخته اند. این سیستم بیشتر در مهندسی دریایی کاربرد دارد. آنها تحریک کابل را به صورت هارمونیک و نرمال مطرح کردند که می توان براساس آن بارگذاری محیطی را محاسبه کرد. آنها مدلی را معرفی کردند که به شرح پاسخ اجباری (واداشته) کابل/ جرم می پردازد که خمش تعادلی کمی دارد. آنها به بررسی کاربرد و راندمان این راه حل ها پرداخته اند تا راه حل هایی برای بسیاری از ابعاد توزیع بارگذاری حاصل شود با اندازه گیری آزمایشی طیف فرکانس طبیعی و پاسخ فرکانس در تعلیق کابل / جرم، پیش بینی های پاسخ تئوریک بدست آمد. و الاابام (۲۰۰۰) به بررسی مسئله ارتعاش واداشته در کابل افقی تحت بارگذاری یکنواخت و ناگهانی پرداخته است. او معادلات غیرخطی متفاوتی را با استفاده از روش المان محدود برای جداسازی فضایی و روش β - Newmark برای یکپارچگی زمانی بدست آورد.

۲-۲-۵- سختی دینامیکی معادل

ولتسوس و داربر (۱۹۸۳) به بررسی جنبه های خاص ارتعاش واداشته در کابل های مورب سهمی شکل پرداخته و اطلاعات فیزیکی و تفسیرهای روشهای اصلی را مطرح کرده اند. همچنین آنها محاسبات ساده ایی را انجام داده اند تا مشخص شود کدام طیف از فرکانس های طبیعی را می توان به سرعت ترکابل کرد. به علاوه، آنها عبارات ساده ایی را در مورد مجموعه های نامحدود و خاص ارائه کرده اند که در بر گیرنده اجزاء موده های طبیعی کابل است. استاروسک (۱۹۹۱) به بررسی رفتار دینامیکی کابل شکم داده قابل کشش پرداخته است. او ماتریکس سختی دینامیکی را مطرح کرده که ضرایب آن مربوط به فرکانس جابجایی (حرکت) است. این روش برای آنالیز سختی مستقیم دینامیکی در سیستم های مرکب مانند پل های نگهداشته شده با کابل یا دکل های مهار شده مناسب می باشد. تحقیق او محدود به جابجایی های جزئی (تئوری خطی) بود و بیشتر حرکتی را شامل می شد که فقط در سطح کابل عمودی انجام می گرفت. او با توجه به سیال خارجی، میرایی گران را و در نظر گرفته که دلالت بر ساده سازی آنالیز ارتعاش میرا در سازه دارد. با استفاده از محاسباتی که به عنوان نمونه بیان شده است، او عملکردهای سختی را در مورد بحث قرار داده و آن را با راه حل های دیگر مقایسه کرده است [2].

استاروسک (۱۹۹۳) برای سختی دینامیکی کابل شکم داده تحت جابجایی های مرزی هارمونیک، توابع تحلیلی وابسته به فرکانس را بدست آورد. او این حقیقت را که سختی، با توجه به مسئله ارزش ویژه، وابسته به فرکانس است را با استفاده از روشی که به موجب آن سختی دینامیکی تحلیلی به ماتریکس خطی تبدیل می شود، رفع نموده است. این کاربرد بر طبق اصول ریاضیاتی، حاصل سیستم ارتعاشی همپایه است. در این کار، او میرایی کابل را در نظر گرفته و اینطور فرض کرده که توابع سختی دینامیکی، واقعی اند.

یاماگوچی و فوجینو (۱۹۸۷) نتایج مربوط به اندازه گیری میرایی مودال را برای نوسان خمشی در مدل‌های کابل معلق گزارش کردند. آنها نسبت شکم دهی به دهانه را یک پارامتر مهم در آزمایش در نظر گرفتند. اثرات طول دهانه، سخت پایی کششی، و مورب بودن وتر بررسی شدند. آنها آنالیزهای عددی روی نوسان آزاد کابل ها انجام دادند تا به محاسبه فرکانس های طبیعی، مودهای نرمال و فشارهای دینامیکی اضافی پردازند. این نتیجه بدست آمد که فشار دینامیکی اضافی در هر مود معامل اولیه میرایی مودال است و میرایی اولین مود متقارن درون صفحه ایی بیش از دیگر مودهایی است که ترکیبی از اولین و دومین فرکانس های طبیعی است. همچنین آنها نتیجه گرفتند که میرایی مودال برای کابل هایی با کشش اولیه کمتر و دهانه های کوچکتر، بیشتر است.

یاماگوچی و فوجینو (۱۹۸۸) به بررسی اثرات انعطاف پذیری تکیه گاهی بر میرایی مودال نوسان خمشی کابل ها پرداخته اند. آنها به صورت تجربی به اندازه گیری میرایی مودال با استفاده از مدل کابل الاستیکی دارای تکیه گاه پرداخته اند و در محاسبه فرکانس های طبیعی، مودهای نرمال و کشش های دینامیکی اضافی از روش جزء محدود استفاده کرده اند. آنها نتیجه گرفتند که انعطاف پذیری تکیه گاه ها اثرات زیادی بر میرایی مودال مودهای جانب دارد. (در بخشی که تغییر مودال صورت می گیرد) آزمایشات آنها نشان داد که پراکنش انرژی از تکیه گاه، یکی از منابع اصلی میرایی است و باید بیشتر مورد تحقیق قرار گیرد.

یا ماگوچی و آدیکاری (۱۹۹۵) به بررسی تحلیلی مشخصه های میرایی مودال در کابل های سازه ایی پرداخته اند. آنها میرایی مودال را براساس انرژی در کابل های سازه ای بدست آورند که حاصل فاکتور اتلاف و نسبت پتانسیل کل انرژی است. آنها نتیجه گرفتند که نسبت انرژی کششی مودال به پتانسیل کل برای تغییر شکل های محوری و خمشی با استفاده از روش جزء محدود بدست می آید. در این آنالیز آنها فهمیدند که میرایی مودال در یک کابل سازه ای بسیار کم است زیرا توزیع زیاد فشار در کابل نسبت به انرژی پتانسیل اولیه باعث می شود نسبت های انرژی کششی مودال به مقدار کم بدست آید. در نهایت آنها در مورد عملکرد و تأثیر میرایی کابل های سازه ایی بحث کرده اند [10].

۲-۲-۷- اندازه گیری های ارتعاش

استاندارد ELALTLA (۱۹۹۱) دو روش برای تعیین کشش های کابل مهاری با استفاده از لرزه ها ارائه می کند. اولین روش براساس زمان لازم برای بالا و پائین رفتن تکانه ها در طول کابل می باشد. دومین روش براساس زمان لازم برای کابل مهاری در حرکت نوسان پاندولی است. دو معادله ساده برای محاسبه نیروی کششی در کابل مهاری استفاده شده است.

زو، شینک و نامیتا (۱۹۹۶) فرمول های عملی را برای روش ارتعاشی (لرزشی) با در نظر گرفتن اثرات سختی خمشی و شکم دادن کابل پیشنهاد کردند. فرمول های پیشنهادی براساس راه حل های تقریبی با دقت بالا براساس معادلات مربوط به کابل شیب دار با سختی خمشی ارائه شده اند. بدون توجه به طول و کشش، این فرمول ها برای کابل استفاده می شوند تا کشش آنها براساس فرکانس های طبیعی اندازه گیری شده در موده های low-order اندازه گیری شود. دقت آن با مقایسه مقادیر بدست آمده توسط فرمول ها اندازه گیری شده و با روش جزء محدود محاسبه شده است.

راسل و لاردنر (۱۹۹۸) نتایج حاصل از تحقیق تجربی را روی فرکانس های طبیعی کابل نشان دادند و نتایج آزمایشی را با پیش بینی های تئوریکی مقایسه کردند و برای فرکانس های طبیعی، مسیر انتهایی را توضیح دادند. آنها روشهای دیگری را برای کاربرد خمیدگی ها در تعیین فرکانس های طبیعی عنوان کرده اند که در آن نشان داده اند می توان این روش را برای تعیین کشش در پایه کابل استفاده کرد و در آن به مقایسه فرکانس های طبیعی اندازه گیری شده و محاسبه شده پرداخته اند. این روش و اندازه گیری کشش ها در کابل های مهاری مفید است و می توان آنها را با مقادیر طراحی شده مقایسه کرد. جونز و پورترفیلد به شرح و تفسیر اطلاعات حاصل از پروژه بلند مدت پرداخته اند که برای تعیین و ثبت گزارش های کابل در پل کابلی (پل ترکه ای) استفاده شده است. هدف از این کار استناد به پدیده لرزش و تعیین تأثیر سیستم کاهش میرانه مکانیکی بود. آنها سه دوره مجزا برای لرزش و ارتعاش کابل را از اندازه گیری در مقیاس کامل مشخص کردند. ارتعاش های موجود در شرایط بدون بارندگی، بارندگی ملایم و بارش سنگین آنها گفتند که این سه دوره پاسخ با سرعت و مسیر با دو مدارهای مختلف شتاب در ارتباط هستند. آنها نشان دادند که سطوح نسبتاً پائین ارتعاش در زمانی که بارندگی موجود نداشت دیده می شد و حجم پاسخهایی با دامنه بالا در ارتباط با بارش ملایم باران بود. آنها گفتند که حرکات موجود نشانگر دو بعدی بودن و نقش موده های مختلف کابل است [10].

۲-۲-۸- کابل هایی با نیروی کششی کم

گودمن و برسلین (۱۹۷۶) روشی را برای آنالیز استاتیک ها و دینامیک های کابل های لنگر کشتی ارائه کردند. کار آنها برای بررسی اثرات شناوری مورد استفاده قرار گرفت.

تریانتافیلو و هوول (۱۹۹۲) به بررسی دینامیک های کابل هایی با کشش کم پرداختند که مود تکانه ایی نیروهای کششی در سازه و سرعت ها را در زمان جابجایی و حرکت سازه مورد توجه قرار می دهند. در زمان اعمال نیرو بر کابل (با کشش صفر)، آنها نشان دادند که برای جابجایی و حرکت با سرعت محوری مجاز، معادلات پیشرفته تکانه ایی به دقت به کشش و سرعت پرداخته است. آنها خاطر نشان می کنند که به نقاطی که در آن خمش به سرعت تغییر می کند باید توجه کرد. دلیل آن این است که این تغییرات نشان می دهند که سرعتهای چرخشی زیاد در یک بخش کوچک ایجاد می شوند که احتمالاً دارای عدم پیوستگی است. آنها نتیجه گرفتند که وجود سختی خمشی باعث ساده شدن راه حل می شود. آنها آنالیز پیشرفته خود را روی مسئله زنجیر معلق، آزمایش کردند. این آنالیز نشانگر تغییر رفتار نیروهای کششی کم و زیاد در زمان بررسی تغییر و به پاسخ از انتهای فوقانی کابل تا انتهای پایینی و آزاد کابل است. آنها نشان دادند که نقش تکانه ایی نیروی کششی در بخش کم کشش زنجیر دیده می شود.

جاواراس، زوو، لیو، تریانتافیلو و یو (۱۹۹۸) به بررسی مکانیسم های کابل هایی با قابلیت کشش زیاد به صورت عددی پرداختند. آنها به فرمول بندی معادلات برای حرکت کابل با استفاده از پارامترهای اولر (Euler) و استفاده از رابطه کشش و فشار غیرخطی پرداختند. همچنین آنها از اصطلاح سختی خمشی برای حل مسئله در زمانی که کشش بسیار کم است استفاده کردند. معادلات با استفاده از تفاوت های محدود و طرح یکپارچگی عددی به صورت ضمنی حل شدند. مدل آنها در حالیکه می تواند کشش صفر یا منفی را در طول دهانه کابل ایجاد کند، باعث ایجاد ضربه می شود. آنها به بررسی رفتار دینامیکی کابل های سفت در زمان گسیختگی و پس از گسیختگی پرداختند و پاسخ دینامیکی و پاسخ دینامیکی جسم شناور بسته شده در نزدیک سطح که تحت تحریک امواج است را بررسی کردند.

کوه، ژانگ و کوئک (۱۹۹۹) به مدلسازی جابجایی وسیع کابلهایی با نیروی کششی کم می پرداختند. معادلات حرکت ها بوسیله سیستم مختصات بدست آمد که در آن تغییرات محوری و خمشی در نظر گرفته می شد. آنها طرح منسجم و تئوری را براساس روش FD ارائه کردند که در آن از طرح اصلاح شده ایی با روش تکراری برای حل عددی معادلات غیرخطی استفاده می شد. همچنین آنها به بررسی مسئله جابجایی وسیع کابل با سقوط آزاد پرداختند و دقت را مشخص کردند بویژه وجود نوسان های پرفرکانس در نیروی کششی کابل توسط آزمایش فیزیکی با مقایسه نتایج این طرح و با استفاده از مراحل زمانی مختلف و براساس نتایج آزمایشی با نسبت های مختلف، آنها نتیجه گرفتند که ارتباط مود با فرکانس بالا در

مرحله زمای بکار رفته یک پدیده عددی است نه فیزیکی. به علاوه مشخص شد که طرح اصلاحی به حذف مودهای پرفرکانس ساختگی پرداخته و براساس نتایج آزمایشی، کشش کابل را به خوبی نشان می دهد. آنها نتیجه گرفتند که براساس همگرایی عددی، سرعت و راندمان، طرح اصلاحی پیشنهادی برای روشهای ارائه شده در حل معادلات غیرخطی بهتر هستند.

۲-۳- نوسان ها (لرزه های) حاصل از باد در کابل ها و دکل های مهار شده

راسل، مورگان و هنگولد (۱۹۷۸) به شرح توسعه جزء محدود و برای کابل تحت جریان ثابت هوا پرداخته اند. آنها از آئرو دینامیکهایی نیمه ثابت استفاده کردند که اجزاء نرمال و مماسی را در بر می گرفت. سپس به نیروهایی پرداختند که سرعت و ارتباط موقعیتی، ماتریس های میرایی و سختی را شامل می شد و این نیروها را به عنوان کارکرد شکل عمومی نشان دادند و کار خود را با یک مثال عنوان کردند و در نهایت نتایج را براساس پارامترهای غیرابعدی نشان دادند.

ناکاماتو و چپو (۱۹۸۵) به آنالیز داده هایی پاسخ سازه و سرعت باد در مقیاس کابل برای یک و کل مهار شده مرتفع پرداختند تا اطلاعاتی را در مورد مشخصه های باد و پاسخ دینامیکی بدست آوردند. اجزاء متعامد برای سرعتهای باد و شتاب در دکل با استفاده از بادسنج و شتاب نگاشت ثبت گردید. منحنی با روش حداقل مجذور و با اطلاعات بدست آمده از میانگین سرعت باد وبا استفاده از رابطه قانون نیرو بدست آوردند. ارتباط عددی اعمال شده و آنالیز طیفی مربوط به داده های شتاب در دکل در محاسبات فرکانس های هم نوا و میرایی بحرانی سازه ها استفاده شد [3].

داونپورت و اسپارلینگ (۱۹۹۲) روش ساده شده ایی برای محاسبه پاسخ دینامیکی دکل مهار شده ارائه کردند روش آنها یک سری از الگوهای بار استاتیکی (بارهای Patch) را برای بررسی اثرات تندبادها به کار می گرفت. آنها از فاکتورهایی استفاده کردند که بستگی به خواص فیزیکی دکل و مشخصه های باد برای تعیین پاسخ سازه به بادهای استاتیکی داشت. سپس به مقایسه میان روش پیشنهادی خود و روشهای به کار رفته دیگر از جمله روش فاکتور تند باد و روش آماری دقیق پرداختند.

۲-۴- آنالیز دینامیکی و استاتیکی دکل های مهار شده

کوهن و پرین (۱۹۵۷) با بررسی فشارهای باد بر اجزاء دکل، تغییرات ضریب پسا و ضرایب خیزش و تأثیر حفاظت و انحراف، به طراحی دکل های مهار شده پرداختند. به علاوه آنها دکل را به صورت تیر-ستون با تکیه گاه الاستیک مدل‌سازی کردند. این کار در دو مرحله انجام شد. اولاً آنها دکل را به عنوان تیر ستون پیوسته با تکیه گاه سخت در نظر گرفتند. ثانیاً از تخمین سهمی برای کابل های مهاری استفاده کردند و سختی فنری خطی معادل را برای کابل های مهاری محاسبه کردند.

دیان (۱۹۶۱) معادلات زنجیره هایی را برای کابل مهاری استاتیکی ارائه کردند. در ریشه گیری از قدر مطلق مهار دینامیکی، کشش الاستیکی کابل نادیده گرفته شده است.

داونپورت و استیلز (۱۹۶۵) مطالعات تئوریک و تجربی روی رفتار کابل های مهاری فشرده تحت میرایی گران رو در زمانی که جابجایی های هارمونیک جزئی در انتهای کابل ایجاد می شود انجام دادند تا شرایط مربوط به نوسان دکل مهاری براساس بادهای سنگین مدل‌سازی شوند. توجه این افراد بیشتر به ثابت فنری مؤثر در مهار و دافنه نوسان آن بود. نتایج آزمایشی نشان داده که مدل تئوریک می تواند به خوبی به شرح مدول مهاری برای حرکت های ملایم و شرح کیفیتی جابجایی های بزرگ تر بپردازد. تحقیق نشان داد که در موقعیت های خطرناک، فرکانس های خاص در زمانی که مدول مهار منفی بود، وجود دارند. (مانند کشیده شدن مهار به جای کشش های برگشتی).

گولد برگ و میریس (۱۹۶۵) به اهمیت توجه به اثرات باد بر دکل ها پرداختند. روش تحلیلی آنها برای تغییرات سختی خمشی دکل با توجه به تغییر بادهای محوری، اثرات جابجایی دکل و اثرات بارهای باد بر مهارها استفاده شد. آنها مهارها را به عنوان زنجیره ای غیرالاستیکی مدل‌سازی کردند و سپس از نظر الاستیکی بودن آنها را بررسی کردند. آنها گزارش کردند که این اثرات از نظر پاسخهای دکل بویژه جابجایی های انتهایی، برش ها، کشش های مهار و جابجایی های جانبی با هم متفاوت اند. اودلی (۱۹۶۶) روشی را ارائه کرده که در کامپیوترها هم قابل استفاده است. او از اعداد برای محاسبه نیروهای باد بر مهارها استفاده کرد و از آن در بررسی اثرات پسا و بالا آمدن استفاده نمود. او مقطع مهارها را به صورت سهمی شکل در نظر گرفت و اثرات یخبندان و عایق ها را در نظر گرفت.

میکلوسکی و آبگ (۱۹۶۶) طرح دکل های مهار شده را با نمودارهای اندرکنش ارائه کردند. در ابتدا دکل به عنوان یک تیر پیوسته با تکیه گاههای الاستیکی در نظر گرفته شد. سپس اثرات در نظر گرفته شدند و آنالیز مجدد با توجه به دامنه فشارهای ناشی از بارهای محوری انجام شد. نمودارهای اندرکنش شامل حداکثر نگهدارندگی و فشارهای دهانه و تغییر شکل های دهانه می باشند.

ویلیامسون و مارگولین (۱۹۸۶) اهمیت اثرات نیروی برشی را در آنالیز دکل های مهار شده نشان دادند. محور توسط سیستم شبکه ای فرضی با سختی برشی معادل جایگزین شد و ثابت های اصلاح شده توزیع جابجایی در تغییر شکل های برشی استفاده گردیدند.

مک کافری و هارتمن (۱۹۷۲) تحقیقی روی توسعه مدل ریاضیاتی برای دکل مهار شده انجام دادند. آنها از فرضیه های ساده برای نوسان دکل و مشخصات دینامیکی مهارها در سطح مورد نظر استفاده کردند. در این تحقیق، رفتار ارتعاش آزاد و اثرات نوسانی خمش استاتیکی مهار، تعداد درجه آزادی دکل، دمای نهفته و مودهای بالاتر مهاری در نظر گرفته شد.

اسکاپ (۱۹۷۹) فرمولهایی را برای ارزیابی پیش بارگذاریهای مهار و رایت های فنری ارائه کرد. این فرمول ها مربوط به مهارهای تحت بکر اختیاری بودند که دارای هر تعداد جرم های مجزا و معادلات اختیاری جایگزین بود. فرمول ها به گونه ای بودند که با روشهای متوالی در ارتباط با آنالیز سازه ای دکل های مهاری سازگار بودند.

ایروین (۱۹۸۱) به شرح روش تحلیلی خطی شده برای تعیین فرکانس های طبیعی دکلهای مهار شده چند سطحی پرداخت.

کارنا (۱۹۸۴) مدل فنر-جرم را که قبلاً توسط هارتمن و داوینپورت (۱۹۶۶) ارائه شده بود اصلاح کرد. تا میرانه برای هر مدل فنر-جرم محاسبه شود و ماهیت سه بعدی سازه در نظر گرفته شود.

رامان، کومار و رائو (۱۹۸۸) روش جزء محدود را با استفاده از روش زیر سازه برای آنالیز جابجایی زیاد دکل های مهاری ارائه کردند. مدل جزء محدود آنها از اجزاء سه بعدی تیر-ستون باد و گه (12dof) و اجزاء خرپای سه بعدی باد و گره (6dof) به ترتیب برای دکل و کابل های جدا شده استفاده می کرد. آنها روش خاصی را ارائه کردند که شامل در نظر گرفتن دکل و مهارها به صورت جداگانه و تطابق جابجایی ها در تکیه گاههای مهار تا زمان رسیدن به تعادل نهایی می شد. به علاوه بارهای خارجی در یک مرحله استفاده شد. نتایج نشان داد که اثرات جابجایی وسیع می تواند رفتار تغییر شکل بار را در سیستم دکل مهار شده که توسط بارهای بحرانی کمتر ایجاد شده، تغییر دهد [3].

ایخانند و مادوگولا (۱۹۸۸) به آنالیز خطی هندسی سه بعدی روی دکل های مهار شده با استفاده از فرمول بندی خطی ایزوپارامتریک در شبکه مختصات **largrangian** پرداختند. آنها رفتار پیچیده غیرخطی کابل های مهاری را با استفاده از روش مدول هم ارز ساده کردند و برای برش عرضی از حالت تبدیل شده یکپارچگی و ضرایب تغییر یافته الاستیکی با در نظر گرفتن جزء تیرک دو گره ایی استفاده کردند. فرمول بندی آنها با توجه به اثرات برش عرضی، برون محوری محورهای مرکزی از مرکز برش تیرک و ایجاد از نیرسی سطح مقطع تیرک بود.

رامان و کومار (۱۹۸۹) نتایج آنالیز دینامیکی غیرخطی را نشان دادند که از یکپارچگی زمانی و عددی مستقیم در معادلات جابجایی در دکل مهار شده استفاده می شد.

عیسی و آونت (۱۹۹۱) راه حلی را برای آنالیز دکل های مهار شده با استفاده از آنالیزهای جداگانه ارائه کردند. آنها سه شکل دکل (دکل مهار شده x ، warren و vierendeel) را در نظر گرفتند و از فرضیه های متداول برای رفتار خطی الاستیکی استفاده کردند و با ترکیب مدلسازی دکل با الگوریتم اثرات اندرکش غیرخطی کابل/دکل را بدست آوردند. تحقیق مقایسه ای نشان داد که براساس مصالح لازم، ترکیب warren نسبت به دکل مهار شده x ، بهتر است.

بن کاهلا (۱۹۹۵) یک روش عددی را برای آنالیزهای دینامیکی کابل های مهاری تکی ارائه کرد (رو به باد و محفوظ از وزش باد). او با مقایسه نتایج خود با نتایج بدست آمده که از فرمول های تحلیلی، ارزش روش خود را نشان داد و فرکانس های طبیعی و شکل های مود را برای مهارهای رو به باد و مصون از وزش باد مشخص کرد. او از روش باد ساده برای بررسی انعطاف پذیری نوسان در دافیه های وسیع استفاده نمود. برای آنالیزهای دینامیکی انتخابی کابل تکی، او نشان داد که حرکت تحت وزش باد قابل رؤیت است. برای مهارهای رو به باد، گفته شده که گرچه فاکتورهای مربوط به دافئه دینامیکی کوچک هستند، کشش در انتهای کابل زیاد است. این موضوع برای کابل هایی که در معرض باد نیستند فرق می کند.

اسپارلینگ (۱۹۹۵) به بررسی پاسخ دکلهای مهار شده تحت وزش باد پرداخت. کار او منجر به روش آنالیز ساده شده دینامیکی برای دکل های مهاری و تعیین مشخصات پاسخ غیرخطی کابل های مهاری و دکل ها گردید. او روش ساده ای را به عنوان روش استاتیکی هم ارز برای تکرار اثرات دینامیکی باد ارائه کرد و به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی در بعد زمانی با استفاده از روش یکپارچگی گام به گام پرداخت.

وایا، مادوگولا و مونفورتون (۱۹۹۸) دو مدل مختلف جزء محدود را در آنالیز دکل های مهاری آنتن دار ارائه کردند. در اولین روش، آنها از اجزاء خرپای سه بعدی در دکل شبکه ای و اجزاء غیرخطی کابل برای مهارها استفاده کردند. در دومین روش، آنها به مدلسازی دکل با استفاده از اجزاء تیرک-ستون و اجزاء غیرخطی کابل برای دکل ها پرداختند و دو مدل را در چند دکل که تحت بارهای مختلف قرار داشتند (از جمله بار مدره، باد و یخ) مقایسه نمودند و سپس مدل های ساده و پرمصرف را در حالت کشش های مهار، نیروهای محوری عضو سازه، برشهای سطحی، جابجایی های دکل و چرخش ها با هم مقایسه کردند.

کائول (۱۹۹۹) به مطالعه رفتار دینامیکی دکل های مهار شده تحت تأثیر بادهای متلاطم پرداخت. در این کار او از روش جزء محدود برای مدل سازی دکل و کابل ها استفاده کرد. او به تکمیل فرضیه ساده شده کاربرد سختی کابل استاتیکی برای محاسبه سختی دینامیکی واقعی پرداخت و ا بارگذاری نیمه استاتیکی با دو بارگذاری باد برای محاسبه بارگذاری استفاده کرد.

در آمریکا، استاندارد بارگذاری برای طراحی دکل های مهاری و آنتن ها براساس دستورالعمل انجمن صنایع الکترونیک D ۲۲۲ (۱۹۸۶) است. این کد برای اثرات پاسخ دکل مهار شده با استفاده از بار استاتیکی افزایش یافته در نظر گرفته می شود. این استاندارد با استفاده از فاکتور پاسخ مهار کامل می شود که با طراحی سرعت باد برای بررسی ماهیت نوسان باد افزایش می یابد.

بر طبق نظر انجمن بین المللی برای سازه های فضایی و پوسته ایی سازه ایی (۱۹۸۱) توصیه های ارائه شده برای دکل های مهار شده، آنالیز جامع دینامیکی و غیرخطی نمی تواند انعطاف پذیر باشد. به جزء برای مواردی که جابجایی های جزئی در مهارهای دور از وزش باد و جابجایی های زیاد در نقاط اتصالی در طول ، این نظریه، کاربرد فرضیه های ساده شده را پیشنهاد می کند.

فصل ۳

آنالیز استاتیکیں کا ایلھا

سازه های نگهداشته شده با کابل در میان سازه های مهندسی عمران برجسته اند زیرا وزن آنها کم بوده و انعطاف پذیری کلی آنها زیاد نیست. کابل های سازه ایی برای نگهداشتن دکل های بلند تلویزیونی، پل ها، سازه های دریایی و سقف استادیوم ها استفاده می شوند. در این سازه ها، کابل های پیش کشیده برای نگهداشتن و پایداری در سیستم استفاده می شوند.

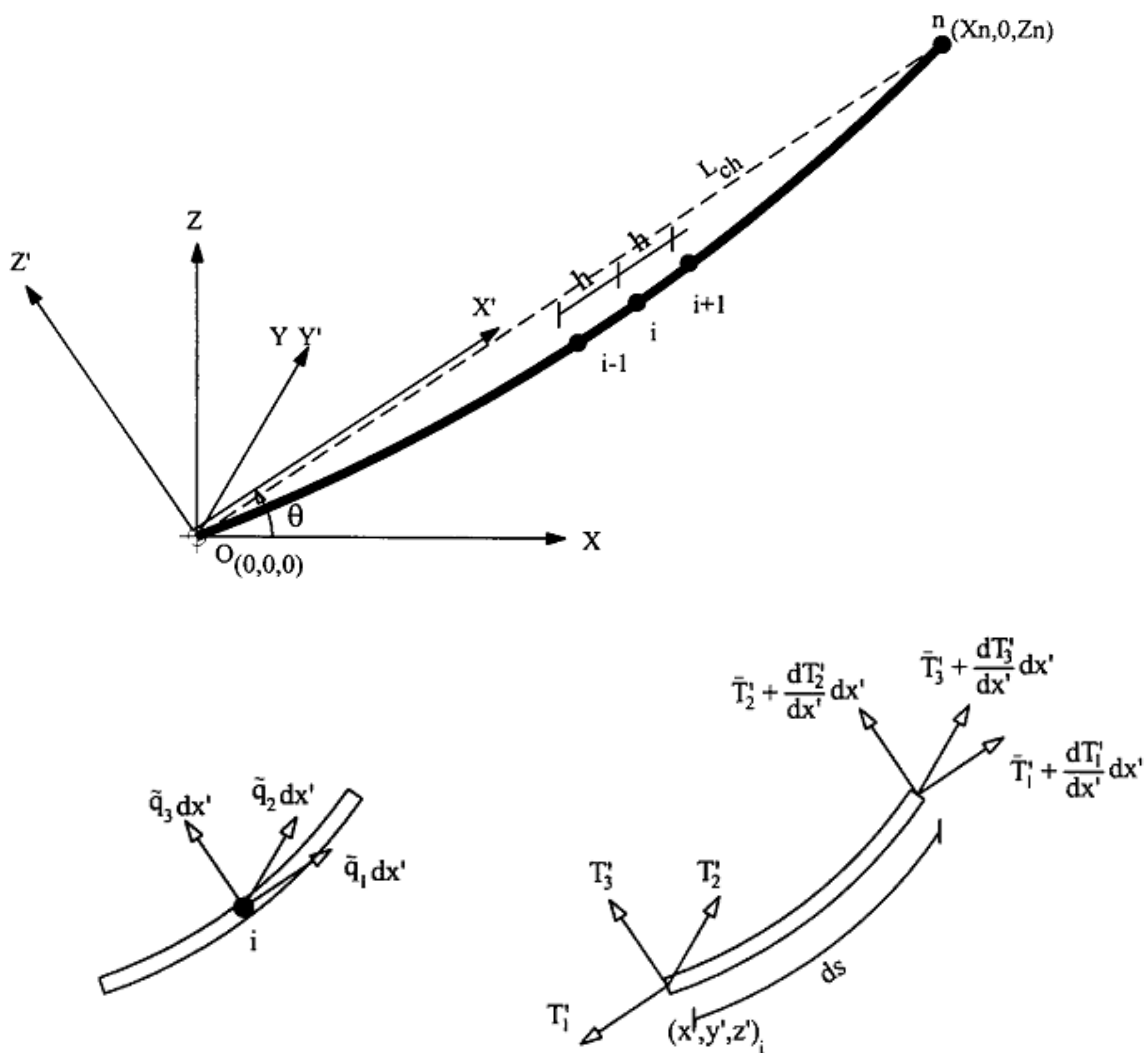
اغلب این کابل ها تحت تأثیر ترکیبی از نیروهای سه بعدی، با توجه به عملکرد تکیه گاهی (نگهدارنده) آنهاست. این نیروها می توانند حاصل ترافیک، جابجایی تکیه گاه و باد برای پل های ترکه ایی (کابل نگهداشته)، حاصل نیروهای باد برای دکل های مهاری و حاصل جابجایی انتها و نیروهای حاصل از جریان آب در کابل های مهاربند زیر دریا باشند.

آنالیز استاتیک کابل های نگهدارنده بسیار پیچیده است زیرا به دلیل باریکی و انعطاف پذیری، آنها درجه غیرخطی بودن بالایی دارند. حتی گرچه سازه های نگهداشته شده با کابل تحت تأثیر نیروهایی هستند که ماهیت دینامیکی دارند، آنالیز شبه استاتیکی با توجه به سهولت، تطبیق پذیری و قابلیت اجرا در جریان طراحی برای آنها اجرا می شود.

در این تحقیق، آنالیز غیرخطی کابل ها تحت بارهای استاتیکی سه بعدی با استفاده از مدل جدید تفاوت محدود انجام شده که مطابق با روش ارائه شده توسط والابام (۲۰۰۰) می باشد. این مدل برای تعیین پاسخ کابل سه بعدی، یک روش متوالی را کامل می سازد. این مدل می تواند به آنالیز کابل های پیش کشیده، طویل و شیب دارد و هر دو سر پردازد. فقط سختی محوری کابل مورد نظر است در حالیکه سختی خمشی و پیچشی نادیده گرفته شده است [17].

۲-۳- پیشرفت در تنظیم معادلات موازنه

کابلی را با شکم دهی تخت، تک دهانه و شیب دار در نظر بگیرید که بارگذاری سه بعدی بر آن اعمال می شود. شکل ۱-۳ نشانگر طرحی از مدل کابل استاتیکی است. همانطور که می بینیم، انتهای سمت چپ کابل، O ، مبدأ سیستم مختصات محسوب می شود و کابل در صفحه $X-Z$ قرار می گیرد.



شکل ۱-۳: طرح مدل ۳ بعدی کابل در آنالیز استاتیکی

کابل در هر واحد طول وتر دارای وزن q_d ، مدول الاستیسته E ، سطح مقطع یکسان A است و طول وتر L_q با زاویه شیب θ با توجه به محور X برای آن در نظر گرفته می شود. شکل هندسی تغییر یافته در هر نقطه از کابل با بردار فضای مختصات دکارت (x, y, z) یا (x_1, x_2, x_3) با استفاده از علامت گذاریهای شاخص نمایش داده می شود. بردار بارگذاری یکنواخت 3 بعدی $\vec{q} = \{q_x, \vec{q}_y, \vec{q}_z\}$ و بردار بارگذاریهای متمرکز $\vec{P} = \{\vec{P}_x, \vec{P}_y, \vec{P}_z\}$ بر کابل تغییر شکل داده توسط وزن خود سازه در طول وتر نشان داده می شود. با توجه به بارگذاری سه بعدی، کشش داخلی کابل $T = \{T_x, T_y, T_z\}$ در هر نقطه (x, y, z) در طول کابل از یک نقطه به نقطه دیگر متفاوت خواهد بود [9].

۳-۲-۱- فرضیه ای اصلی

برای تسهیل مشتق گیری معادلات تعادلی کابل، موارد زیر در نظر گرفته می شوند:

- ۱- مصالح کابل الاستیکی با تغییرات محدود (تغییر غیرخطی *lagrangian*)
- ۲- کابل های بلند و پیش کشیده شده که دارای سختی محوری متداول هستند (خمش قابل اغماض و سختی پیچشی)
- ۳- کشش کابل در طول محور X متفاوت است. (X یک متغیر مستقل در نظر گرفته می شود).

۳-۲-۲- معادلات تعادل استاتیک [13]

شرایط تعادلی را برای جزء نامحدود طول ds در کابل تغییر یافته توسط وزن همان کابل در صفحه $(X-Z)$ را در نظر بگیرید. حالت تعادل نیروها در مسیر X (شکل ۳-۱) به اینصورت است:

$$\left(\frac{\partial T'_x}{\partial x'}\right)dx' + (\vec{q}_{x'})dx' = 0 \quad i.e. \quad \frac{\partial T'_x}{\partial x'} = -\vec{q}_{x'} \quad (1-3)$$

با تعریف مسیرهای x' , y' , z' به صورت ۱، ۲ و ۳، معادله قبل برای مسیرهای سه بعدی به اینصورت در می آید:

$$\frac{\partial T'_i}{\partial x'} = -\tilde{q}'_i \quad (2-3)$$

با استفاده از عبارات جبری برداری، می توان رابطه زیر را برای کشش کابل سه بعدی بدست آورد.

$$T'_i = n'_i T = \frac{\partial x'_i}{\partial s} \cdot T \quad \text{for } i = 1, 2, 3 \quad (3-3)$$

با استفاده از جابجایی رابطه قبل، می توان تعداد اجزاء کشش مجهول را به یک رساند و نوشت:

$$T'_2 = T'_1 \cdot \frac{\partial y'}{\partial x'} \quad (a4-3)$$

$$T'_2 = T'_1 \cdot \frac{\partial y'}{\partial x'} \quad (b4-3)$$

با استفاده از تعریف معادله (۴-۳) حالت تعادل در مسیر y' به اینصورت است:

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(T'_1 \cdot \frac{\partial y'}{\partial x'} \right) = -\tilde{q}'_2 ; \quad (5-3)$$

$$T'_1 \cdot \frac{\partial^2 y'}{\partial x'^2} + \frac{\partial T'_1}{\partial x'} \cdot \frac{\partial y'}{\partial x'} = -\tilde{q}'_2$$

به همین نحو، تعادل نیروها در مسیر z' به اینصورت عنوان می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(T'_1 \cdot \frac{\partial z'}{\partial x'} \right) = -\tilde{q}'_3 ; \quad (6-3)$$

$$T'_1 \cdot \frac{\partial^2 z'}{\partial x'^2} + \frac{\partial T'_1}{\partial x'} \cdot \frac{\partial z'}{\partial x'} = -\tilde{q}'_3$$

در نهایت پس از مرتب سازی، سه معادله متفاوتی که به شرح تعادل کابل می پردازد اینها هستند:

$$\frac{\partial T_1'}{\partial x'} = -\tilde{q}_1' \quad (\text{av-3})$$

$$T_1' \cdot \left(\frac{\partial^2 y'}{\partial x'^2} \right) = \left(\tilde{q}_1' \cdot \frac{\partial y'}{\partial x'} - \tilde{q}_2' \right) \quad (\text{bv-3})$$

$$T_1' \cdot \left(\frac{\partial^2 z'}{\partial x'^2} \right) = \left(\tilde{q}_1' \cdot \frac{\partial z'}{\partial x'} - \tilde{q}_3' \right) \quad (\text{cv-3})$$

در اینجا T_1' , T_2' , T_3' اجزاء کششی کابل در مسیرهای x' , y' , z' هستند.

$$T_1 = +T_1' \cdot \text{Cos}(\theta) - T_3' \cdot \text{Sin}(\theta) \quad (\text{a8-3})$$

$$T_2 = +T_2' \quad (\text{b8-3})$$

$$T_3 = +T_1' \cdot \text{Sin}(\theta) + T_3' \cdot \text{Cos}(\theta) \quad (\text{c8-3})$$

\tilde{q}_1' , \tilde{q}_2' , \tilde{q}_3' از اجزاء نیروی استاتیکی معادل در هر واحد از طول وتر در مسیرهای x' , z' , y' هستند.

$$\tilde{q}_1' = + \left(\tilde{q}_1 + \frac{\tilde{P}_1}{h} \right) \cdot \text{Cos}(\theta) + \left(\tilde{q}_d + \tilde{q}_3 + \frac{\tilde{P}_3}{h} \right) \cdot \text{Sin}(\theta) \quad (\text{a9-3})$$

$$\tilde{q}_2' = + \left(\tilde{q}_2 + \frac{\tilde{P}_2}{h} \right) \quad (\text{b9-3})$$

$$\tilde{q}_3' = - \left(\tilde{q}_1 + \frac{\tilde{P}_1}{h} \right) \cdot \text{Sin}(\theta) + \left(\tilde{q}_d + \tilde{q}_3 + \frac{\tilde{P}_3}{h} \right) \cdot \text{Cos}(\theta) \quad (\text{c9-3})$$

$\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \tilde{P}_3$ بارهای نقطه ایی در مسیرهای Z, Y, X هستند که در گره های خاص عمل می کند و h هم طول یک بخش از کابل است:

$$h = \left(\frac{L_{ch}}{n-1} \right) \quad (d9-3)$$

($n-1$) تعداد تقابلهای کابل است.

پس آنالیز استاتیکی غیرخطی کابل مشکل یافتن مقادیر مجهول جزء کششی T_1' و مختصات (y', z') در یک نقطه توسط محور (x') و برای یک بردار خاص $\{\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, \tilde{q}_3\}$ را حل می کند. این کار با استفاده از S_0 به عنوان غیر متغیر کابل برای تغییرات لازم در دسترسی به کشش صحیح کابل در بارگذاری های بعدی انجام می شود. پس محاسبه دیگر مجهولات براساس این مقادیر تعیین شده انجام می شود.

۳-۳- معدل تفاوت محدود برای معادلات غیرخطی تعادلی [13]

یک روش مؤثر برای حل معادلات تعادلی غیرخطی متفاوت، استفاده از مدل تفاوت محدود برای جداسازی نهایی (فضایی) معادلات سیستم می باشد. با استفاده از این روش، معادله (۷-۳) را در نظر گرفته و پس از مرتب سازی داریم.

$$\left(\frac{\partial^2 y'}{\partial x'^2} \right) = \frac{\tilde{q}_1}{T_1'} \cdot \left(\frac{\partial y'}{\partial x'} \right) - \frac{\tilde{q}_2}{T_1'} \quad (10-3)$$

با استفاده از محاسبات درجه اول و دوم تفاوت محدود برای مشتقات فضایی (نمایی)، می توان معادله قبل را در ماتریس معلوم برای حل معادلات مدل سازی شده بعد n نوشت که برای کل گره های داخلی به صورت زیر است:

۳-۴- روش محاسباتی برای حل معادلات تعادلی

۳-۴-۱- مقطع اولیه وزن خود کابل [19]

اولین کار در آنالیز غیرخطی کامل، تعیین مقطع اولیه کابل فقط با توجه به وزن کابل است که معادل با کاربرد بردار بار $\vec{q}' = \{q'_{d_x} \cdot \tilde{q}'_{d_x}\}$ برای سطح مقطع اولیه کابل به عنوان لنگر است. می توان تعیین مقطع کابل را با استفاده از روشی که در مراحل بعدی استفاده شده در مدل تفاوت محدود همراه با طرح متوالی به کار رفته کامل کرد. در پایان کار، ما مقدار وزن خالص سازه را به صورت توابع گره ایی (X, Y, Z) همراه با طول بدون کش آمدگی آن بدست آورده ایم. طول کش نیامده کابل، S_0 ، در آنالیز کابل به عنوان پارامتر **crucial** محسوب می شود به طوریکه فقط **invariant** کابل برای تعیین یک معادله و حالت تعادلی صحیح کابل تحت بارگذاری عمومی استفاده شود.

۳-۴-۲- پاسخ کابل با توجه به بارگذاری استاتیکی کلی [19]

برای تعیین پاسخ کابل (مثلاً تغییرات در سطح مقطع کابل و نیروهای داخلی از نظر اجزاء کششی) با توجه به بارگذاری سه بعدی، راه حل عددی معادلات تعادلی نسبی را با استفاده از طرحهای متوالی ارائه کردیم. روش محاسباتی مورد نیاز می تواند با مراحل زیر کامل شود:

مرحله ۱:

براساس معادله (۳-av) در فرم مجزا، می توان به صورت زیر آن را برای T'_i حل کرد:

$$F'_{1,i+1} = F'_{1,i} - \tilde{q}'_{1,i} \times \Delta x'_i \quad (13-3)$$

در اینجا $F'_{1,i}$, $F'_{1,i+1}$ نیروهای گره ایی در $x' - dir$ برای جزء i ام کابل است. برای شروع ما فرض می کنیم مقدار $F'_{1,1}$ در یک سر کابل معادل با مقدار قبل باشد و از آن به بعد جریان محاسبه را تا وقتی ادامه می دهیم تا به سر دیگر کابل برکابل. میانگین مقدار نیروهای گره ایی برای هر جزء نشانگر کشش جداگانه کابل برای آن جزء است مثلاً:

$$T'_{1,i} = \frac{1}{2}(F'_{1,i} + F'_{1,i+1}) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (14-3)$$

مرحله ۲-ا:

استفاده از روش تفاوت محدود که در معادلات (۱۱-۳) و (۱۲-۳) آمده و با کاربرد اجزاء کششی که قبلاً تعیین شده است $T'_{1,i}$ برای $n-1$ و ... و ۲ و ۱ و با حل جزء سازی در معادله (۳-۷b) نشانگر تعادل استاتیک کابل در مسیر y' است که در کابل، توابع y' مجهول وجود دارد.

مرحله ۲-ب:

مرحله قبل را برای حل فرم منقطع معادله (۳-۷c) تکرار کنید که نشانگر تعادل استاتیک کابل در مسیر z' است و برای تابع های z' مجهول کابل به کار می رود.

مرحله ۳:

برای هر جزء، با استفاده از معادلات (۳-۷a و ۳-۷b) برای جزء i ام، T'_p, T'_r اجزاء کشش در محور y', z'

را محاسبه کنید و $\left(\frac{\partial z'}{\partial x'}\right), \left(\frac{\partial y'}{\partial x'}\right)$ را بصورت زیر تعریف نمائید.

$$\left(\frac{\partial y'}{\partial x'}\right)_i = \frac{(\Delta y')_i}{(\Delta x')_i} = \frac{y'_{i+1} - y'_i}{x'_{i+1} - x'_i} = \frac{y'_{i+1} - y'_i}{h} \quad (\text{a15-3})$$

$$\left(\frac{\partial z'}{\partial x'}\right)_i = \frac{(\Delta z')_i}{(\Delta x')_i} = \frac{z'_{i+1} - z'_i}{x'_{i+1} - x'_i} = \frac{z'_{i+1} - z'_i}{h} \quad (\text{b15-3})$$

سپس T'_i را کد کل مقادیر کشش است را به صورت زیر محاسبه نمائید:

$$T'_i = \sqrt{T_{1_i}'^2 + T_{2_i}'^2 + T_{3_i}'^2} \quad (\text{16-3})$$

مرحله ۴-ا:

طول کابل تغییر یافته S را با استفاده از شکل هندسی تغییر یافته کابل که قبلاً عنوان شده را با استفاده از معادله زیر محاسبه کنید:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta S)_i \quad \text{for } i = 1, \dots, n-1 \quad (\text{17-3})$$

در اینجا:

$$\Delta S_i = \sqrt{(\Delta x')_i^2 + (\Delta y')_i^2 + (\Delta z')_i^2} \quad (\text{a18-3})$$

$$(\Delta x')_i = x'_{i+1} - x'_i = h, \quad (\Delta y')_i = y'_{i+1} - y'_i, \quad (\Delta z')_i = z'_{i+1} - z'_i \quad (\text{b18-3})$$

مرحله ۴-ب:

با استفاده از مدول الاستیسیته مواد سازنده کابل E ، و سطح مقطع A ، همراه با طول تغییر یافته جزء، (ΔS) و کشش کل T_i ، می توانیم طول بدون کشش جدید، S_o^* را از معادله زیر بدست آورد:

$$S_o^* = \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta S_o^*)_i \quad \text{for } i = 1, \dots, n-1 \quad (19-3)$$

در اینجا:

$$(\Delta S_o^*)_i = \frac{(\Delta S)_i}{1 + 2 \times (T/EA)_i} \quad (20-3)$$

مرحله ۵:

مقدار واقعی کشش در انتهای کابل، که کابل را تحت $F'_{1,1}$ بارگذاری در حالت تعادل نگه می دارد را پیدا کنید، در حالیکه طول بدون کشش کابل که نشانگر وزن خالص S_0 می S_o^* باشد حفظ شود. این کار بر اساس اصول زیر انجام می شود:

با ایجاد مرزهای فوقانی و پایینی، میانگین گیری به اینصورت است:

$$\frac{\|S_o^* - S_o\|}{S_o} \leq \varepsilon \quad (21-3)$$

کاربرد روش محاسباتی فوق منجر به ارائه راه حل های دقیق برای حل مسئله مربوط به کابل منفرد تحت بار استاتیکی سه بعدی می گردد. با اطمینان از تعادل نیروها و سازگاری تغییرات در سیستم کابل می توان این کار را انجام داد.

۳-۵- ظرفیت جابجایی تجویزی (تعیین شده) در انتهای کابل

پیوستگی جابجایی در انتهای پایینی کابل و انتهای فوقانی کابل را می توان با استفاده از توابع جدید در انتهای پایین کابل و انتهای فوقانی کابل بدست آورد. این حالت روی تغییرات کششی کابل، H ، اثر دارد. هر چند تنها پارامتر مطلق کابل، طول بدون کشش یعنی S_0 است. این روش برای بررسی اندرکنش غیر خطی کابل - سازه کاربرد مهمی دارد (مثلا در دکل های مهاری). در این دکل ها جابجایی در انتهای کابل مربوط به اندرکنش کابل و سازه نگهداشته شده بدون جابجایی است. اندرکنش تاثیر زیادی بر نیروهای داخلی کابل های نگهدارنده و سازه نگهداشته شده دارد.

فصل ۴

آنالیز دینامیکس کابل ها

سیستم های غیر خطی سازه ای با چند درجه آزادی، متضمن معادلات ماتریسی تعادلی و دینامیکی است. در این معادلات، غیر خطی بودن بستگی به متغیرهای زمانی دارد. فرکانس، پاسخ و مشتقات پاسخ- زمان در این سیستم ها دیده می شود. غیر خطی بودن را می توان برای پدیده های ترکیبی یا فیزیکی در نظر گرفت. در حقیقت بسیاری از سازه های مهندسی با زمان در ارتباط هستند.

ارزیابی پاسخ ارتعاش اجباری برای سازه های غیر خطی n -DOF نیاز به حل معادلات دیفرانسیل درجه ۲ دارد. توابع سمت چپ نه تنها به زمان و مشتقات زمانی مختصات مرتبط است، بلکه به فرکانس هم وابسته می باشد. حل معادله با روشهای یکپارچگی زمانی امکان پذیر است.

یکپارچگی زمانی بر اساس ایجاد تعادل دینامیکی در فواصل زمانی انتخابی می باشد. Δt تحقیق روی پایداری این راه حل ها ضروری است (لئوندوس، ۱۹۹۹).

دینامیک های کابل هایی با شکم دهی کوچک و دارای یک دهانه مورد مطالعه قرار گرفته است زیرا تابع روشهای تحلیلی می باشد. محققان از روش جزء محدود (FEM)، روش تفاوت محدود (FDM) و روشهای انحرافی (variational) برای آنالیز کابل ها استفاده کرده اند. در این فصل فرمول بندی جدیدی معرفی شده که کل پارامترهای مهم. موثر بر مشخصات لرزه ایی کابل ها را در نظر دارد.

والابان (۲۰۰۰) فرمول بندی جدید را انجام داده است. او از جدید ترین فرضیه ها برای رسیدن به معادلات غیر خطی و سه بعدی استفاده کرده و دینامیک های کابل را در نظر گرفته است. فرمول بندی عمومی برای کابل های بلند و پیش تنیده ارائه شده است. در تحقیقات پارامتریک، فرمول بندی عمومی به صورت غیر ابعادی بیان می شود [14].

۴-۲- گسترش معادلات حرکت

۴-۲-۱- فرضیه های اصلی

از فرضیه های زیر برای ساده کردن مشتقات معادلات جابجایی کابل استفاده می شود:

- ماده سازنده کابل الاستیکی بوده و کشش محدودی دارد (کشش غیر خطی lagrangian).
- کابل ها بلند و پیش تنیده بوده و ختی محوری دارند (ختی خکشی و پیچشی قابل چشم پوشی است).
- کشش د کابل د طول محور X متفاوت است (X تنها متغیر مستقل است).

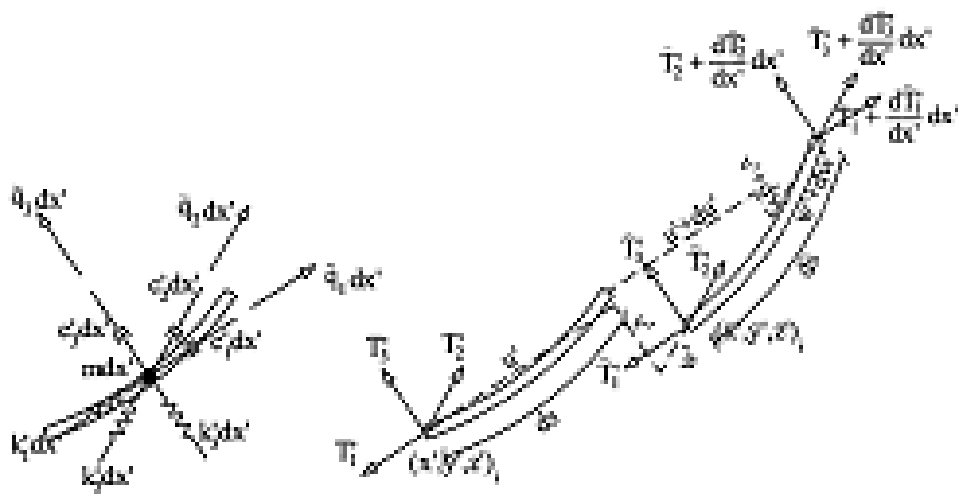
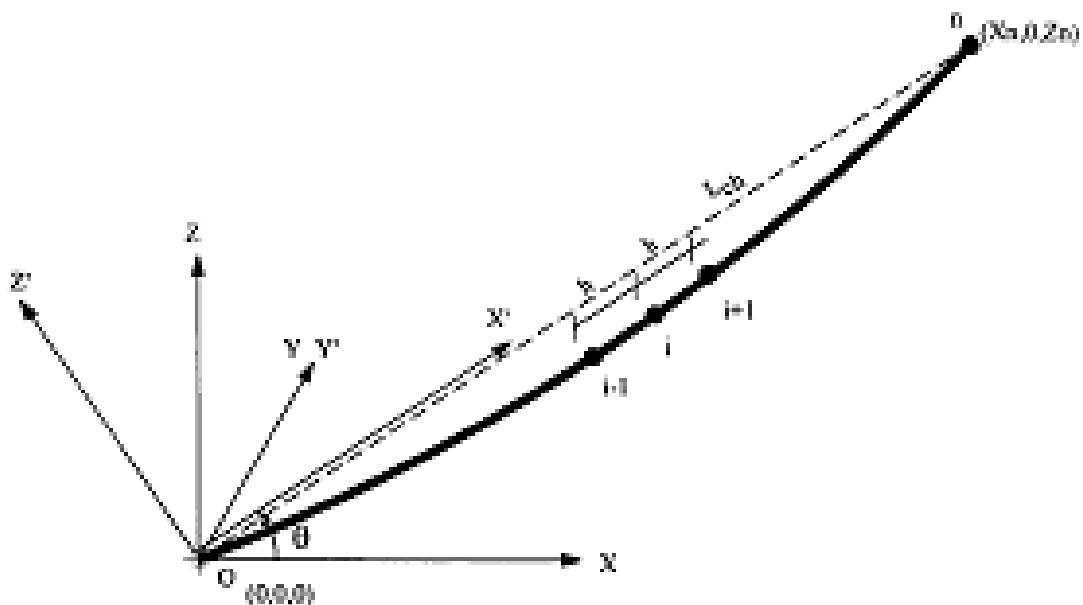
۴-۲-۲- معادلات جنبش (جابجایی)

کابل شیب داری را با یک دهانه تحت آشفنگی جزئی سه بعدی در شکل خمیده شده استانیکی در نظر بگیرید. شکل ۴-۱ نشانگر کابل دینامیکی مورب و مختصات آن است. همانطور که در شکل می بینیم، انتهای کابل در سمت چپ، O ، به عنوان مبدأ سیستم مختصات محسوب شده و کابل در صفحه $X-Z$ قرار می گیرد. کابل دارای طول و متری L_{ch} با زاویه انحراف θ با توجه به محور X است. حالت تعادل نیروها در مسیر x' منجر به این معادله می شود.

$$\frac{\partial}{\partial \bar{s}} \left(\bar{T} \frac{\partial \bar{x}'}{\partial \bar{s}} \right) + (\bar{q}_{x'} + \bar{q}_{dx'}) dx' = m \cdot dx' \frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} + c_{x'} \cdot dx' \frac{\partial u'}{\partial t} + k_{x'} \cdot dx' u' \quad (1-4)$$

با استفاده از قانون زنجیره $\frac{\partial}{\partial \bar{s}} = \frac{\partial}{\partial x'} \cdot \frac{\partial x'}{\partial \bar{s}}$ و جایگزینی $\bar{x}' = x' + u'$ داریم:

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(\bar{T} \frac{\partial}{\partial x'} (x' + u') \frac{\partial x'}{\partial \bar{s}} \right) dx' + (\bar{q}_{x'} + \bar{q}_{dx'}) dx' = m \cdot dx' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_{x'} \cdot dx' \frac{\partial u}{\partial t} + k_{x'} \cdot dx' u \quad (2-4)$$



شکل ۴-۱: طرح کابل سه بعدی برای آنالیز دینامیکی

حال فرض کنید $\bar{H}' = \left(\bar{T} \frac{\partial x'}{\partial s}\right)$ معادله (۴-۲) به اینصورت نوشته می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(\bar{H}' \left(1 + \frac{\partial u'}{\partial x'} \right) \right) dx' + (\tilde{q}_{x'} + \tilde{q}_{dx'}) dx' = m \cdot dx' \frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} + c_{x'} \cdot dx' \frac{\partial u'}{\partial t} + k_{x'} \cdot dx' u' \quad (۴-۳)$$

با ساده کردن این معادله داریم:

$$\bar{H}' \left(0 + \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \right) + \frac{\partial \bar{H}'}{\partial x'} \left(1 + \frac{\partial u'}{\partial x'} \right) + (\tilde{q}_{x'} + \tilde{q}_{dx'}) = m \cdot \left(\frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} \right) + c_{x'} \cdot \left(\frac{\partial u'}{\partial t} \right) + k_{x'} \cdot (u') \quad (4-4)$$

به همین نحو، می توان عبارات زیر را بدست آورد و شرایط تعادل نیروها را در مسیرهای y' , z' به ترتیب به صورت زیر نشان داد:

$$\bar{H}' \left(0 + \frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2} \right) + \frac{\partial \bar{H}'}{\partial x'} \left(0 + \frac{\partial v'}{\partial x'} \right) + (\tilde{q}_{y'} + 0) = m \cdot \left(\frac{\partial^2 v'}{\partial t^2} \right) + c_{y'} \cdot \left(\frac{\partial v'}{\partial t} \right) + k_{y'} \cdot (v') \quad (5-4)$$

$$\bar{H}' \left(\frac{\partial^2 z'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial x'^2} \right) + \frac{\partial \bar{H}'}{\partial x'} \left(\frac{\partial z'}{\partial x'} + \frac{\partial w'}{\partial x'} \right) + (\tilde{q}_{z'} + \tilde{q}_{dx'}) = m \cdot \left(\frac{\partial^2 w'}{\partial t^2} \right) + c_{z'} \cdot \left(\frac{\partial w'}{\partial t} \right) + k_{z'} \cdot (w') \quad (6-4)$$

در اینجا:

T' : کل کشش کابل (استاتیک + دینامیک)

$\bar{H}' = H'_0 + h'_{(t)}$: کشش کابل در مسیر X' (استاتیک + دینامیک)

m : جرم کابل در هر واحد از طول کابل

$\tilde{q}_{x'}$, $\tilde{q}_{y'}$, $\tilde{q}_{z'}$: جزء نیروی دینامیکی اعمال شده در هر واحد از طول کابل در مسیرهای x' , y' , z'

$C_{x'}$, $C_{y'}$, $C_{z'}$: اجزاء میرایی کابل در هر واحد از طول کابل در مسیرهای x' , y' , z' .

$K_{z'}$, $K_{y'}$, $K_{x'}$: سختی فنری (خارجی) کابل در هر واحد از طول کابل در مسیرهای z' , y' , x' .

اجزاء جابجایی با توجه به ارتعاش ها در مسیرهای z' , y' , x' $u' = u'_{(x',t)}$, $v' = v'_{(x',t)}$, $w' = w'_{(x',t)}$

۴-۲-۳- نرمال کردن معادلات

هر کدام از مسائل مدل سازی دارای راه حل مخصوص به خود برای متغیرهای وابسته و مستقل است. تفاوت در مقیاس متغیر برای آنالیز تخیلی و محاسباتی مدل ها به کار می رود. راه منطقی برای این کار، نرمال سازی مقیاس ها و غیر ابعادی کردن مسئله است. روش تغییر نرمال سازی، مقدار درجه بندی خطی را برای هر کدام از متغیرهای وابسته و مستقل ایجاد می کند و معادلات را براساس روابط تغییر می دهد. در اینجا کل اصطلاحات غیر ابعادی اند. هر کدام از توابع ایجاد نیرو برای مسئله در حالت مشابهی درجه بندی می شود.

۴-۲-۳-۱- نکات مورد نیاز در نرمال سازی

اهمیت روش نرمال سازی درست همانند اهمیت آن برای سیستم های خطی است و اغلب راه حل هایی را ارائه می دهد که مستقل از پارامتر می باشد، در صورتیکه گروهی از اصطلاحات دارای اهمیت فیزیکی است. با این روش می توان احتمال گرد کردن خطاها را در حل عددی معادلات کم کرد. اهمیت نرمال سازی وقتی مشخص می شود که بخواهیم مجموعه ایی از معادلات دیفرانسیل را حل کنیم. در این موارد، متغیرها از نظر مقدار عددی با هم فرق دارند که باعث ایجاد مسائلی می شوند. در برخی موارد، این مسائل منحصرأ مربوط به انتخاب واحدهای متغیرهاست [15].

نرمال سازی معادلات، روی ایجاد متغیرها و مشتقات آنها اثر دارد و در زمان استفاده از روشهای حل عددی معادلات، می تواند مقادیر متفاوتی را نشان دهد. نرمال سازی اطلاعات مهمی را در مورد مسئله فراهم می کند و می تواند باعث کاهش پیچیدگی مسئله شود زیرا اهمیت هر کدام از بخشهای معادلات را مشخص می سازد.

(تامپسون، ۱۹۹۹)

۲-۳-۲-۴- غیر ابعادی کردن

استفاده از روش نرمال سازی توسط معرفی مجموعه جدیدی از متغیرهای غیرابعادی می تواند منجر به بازنویسی معادلات (۴-۴)، (۴-۵) و (۴-۶) شده و معادلات غیرابعادی برای جابجایی کابل شیب دار منفرد فراهم می شود:

$$\hat{H}\left(\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2} + 0\right) + \frac{\partial \hat{H}}{\partial \hat{x}} \cdot \left(1 + \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}}\right) + (\hat{q}_x + \hat{q}_{dx}) = \hat{m} \cdot \left(\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{t}^2}\right) + \hat{c}_x \cdot \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}}\right) + \hat{k}_x \cdot \hat{u}; \quad (۷-۴)$$

$$\hat{H}\left(\frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial \hat{x}^2} + 0\right) + \frac{\partial \hat{H}}{\partial \hat{x}} \cdot \left(0 + \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{x}}\right) + \hat{q}_y = \hat{m} \cdot \left(\frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial \hat{t}^2}\right) + \hat{c}_y \cdot \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{t}}\right) + \hat{k}_y \cdot \hat{v} \quad (۸-۴)$$

$$\hat{H}\left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial \hat{x}^2}\right) + \frac{\partial \hat{H}}{\partial \hat{x}} \cdot \left(\frac{\partial \hat{z}}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{x}}\right) + (\hat{q}_z + \hat{q}_{dz}) = \hat{m} \cdot \left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \hat{t}^2}\right) + \hat{c}_z \cdot \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{t}}\right) + \hat{k}_z \cdot \hat{w} \quad (۹-۴)$$

در اینجا:

$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ توابع نرمال شده و در مسیرهای X', y', z' می باشند.

$$\hat{x} = \left(\frac{1}{L_{ch}}\right) x' \quad \hat{y} = \left(\frac{1}{L_{ch}}\right) y' \quad \hat{z} = \left(\frac{1}{L_{ch}}\right) z' \quad (a۱۰-۴)$$

\hat{t} زمان نرمال شده است:

$$\hat{t} = \left(\sqrt{\frac{EA}{mL_{ch}^2}}\right) t \quad (b۱۰-۴)$$

\hat{m} جرم نرمال شده کابل در هر واحد طول است:

$$\hat{m} = 1 \quad (c۱۰-۴)$$

$\hat{u} = \hat{u}_{(x',t)}$, $\hat{V} = \hat{V}_{(x',t)}$, $\hat{w} = \hat{w}_{(x',t)}$ اجزاء جابجایی نرمال شده با توجه به متغیر در مسیرهای x' , y' , z' است:

$$\hat{u} = \left(\frac{1}{L_{ch}} \right) u' \quad \hat{v} = \left(\frac{1}{L_{ch}} \right) v' \quad \hat{w} = \left(\frac{1}{L_{ch}} \right) w' \quad (d)10-4$$

\hat{H} جزء کشش کابل در مسیر نرمال شده X' است (استاتیک-دینامیک):

$$\hat{H} = \left(\frac{H'_o + h'_{(t)}}{EA} \right) \quad (e)10-4$$

$h'_{(t)}$ جز کشش دینامیکی در مسیر X' است.

جزء نرمال شده وزن خالص در هر واحد طول است. \hat{q}_x , \hat{q}_{dz}

$$\hat{q}_{dx} = \left(\frac{L_{ch}}{EA} \right) \tilde{q}_{dx}; \quad \hat{q}_{dz} = \left(\frac{L_{ch}}{EA} \right) \tilde{q}_{dz} \quad (f)10-4$$

اجزاء نرمال شده میرایی در هر واحد طول کابل است. \hat{q}_x , \hat{q}_y , \hat{q}_z

$$\hat{q}_x = \left(\frac{L_{ch}}{EA} \right) \tilde{q}_x; \quad \hat{q}_y = \left(\frac{L_{ch}}{EA} \right) \tilde{q}_y; \quad \hat{q}_z = \left(\frac{L_{ch}}{EA} \right) \tilde{q}_z \quad (g)10-4$$

اعضای میرایی نرمال شده در هر واحد از طول کابل است: \hat{c}_x , \hat{c}_y , \hat{c}_z

$$\hat{c}_x = \left(\frac{L_{ch} \sqrt{EA/m}}{EA} \right) c_{x'}; \quad \hat{c}_y = \left(\frac{L_{ch} \sqrt{EA/m}}{EA} \right) c_{y'}; \quad \hat{c}_z = \left(\frac{L_{ch} \sqrt{EA/m}}{EA} \right) c_{z'} \quad (h)10-4$$

$\hat{k}_x, \hat{k}_y, \hat{k}_z$ اجزاء نرمال شده سختی در هر واحد طول است [14].

$$\hat{k}_x = \left(\frac{L_{ch}^2}{EA} \right) k_{x'}; \quad \hat{k}_y = \left(\frac{L_{ch}^2}{EA} \right) k_{y'}; \quad \hat{k}_z = \left(\frac{L_{ch}^2}{EA} \right) k_{z'} \quad (i10-4)$$

از $\left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} \right), \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{t}} \right), \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{t}} \right)$ اجزاء نرمال شده سرعت با توجه به ارتعاش و $\left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{t}^2} \right), \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}^2} \right), \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{t}^2} \right)$ از

اجزاء نرمال شده شتاب با توجه به ارتعاش است.

۴-۳- یکپارچگی زمانی مستقیم

برخلاف روشهای بر هم نهی (تداخل)، روشهای یکپارچگی زمانی مستقیم محدود به سیستم های خطی است ولی می تواند به آسانی در سیستم های غیرخطی توسعه یابد. می توان از این روش برای اجزایی با فرکانس بالا در یک حالت قابل فهم استفاده کرد. هر چند یکپارچگی زمانی در معادلات جابجایی نمی تواند به عنوان جعبه سیاه استفاده شود. در حقیقت، پارامترهای این روش باید بر طبق دقت و پایداری لازم و با توجه به کنترل میرایی عددی به خوبی تعدیل شود. (گرادین و ریکسن، ۱۹۹۶).

در چند دهه گذشته، روشهای مختلف یکپارچگی زمانی در آنالیز گذاری سیستم های سازه ایی استفاده شده اند. هر کدام از این روشها دارای سطوح دقت، پایداری و هزینه های محاسباتی مختلف هستند و هر کدام با توجه به جابجایی، سرعت و شتاب در الگوریتم مرحله به مرحله دارای روابط مختلفی هستند و می توان پاسخ دینامیکی سازه را بدست آورد. (لئون، ۱۹۹۹).

۴-۳-۱- طبقه بندی روشهای مختلف یکپارچگی زمانی

الگوریتم های یکپارچگی زمانی به کار رفته در دینامیک های سازه ممکن است در ۴ مقوله گسترده طبقه بندی شود: روشهای چند مقدار تک مرحله ای، روشهای چند مرحله ای، روشهای چند پله ایی و روشهای پیش بینی کننده، اصلاح کننده. هر روش می تواند به صورت ضمنی یا ساده باشد. بیشتر روشهای ضمنی (مطلق) می تواند به صورت مطلق، پایدار باشد و باعث ایجاد مراحل زمانی وسیع می شود. هر چند ارزش هر مرحله زمانی و نیازهای نگهداری در روشهای ضمنی (مطلق) در مقایسه با روش های ساده، زیادتر است. بنابراین لازم است سیستم معادلات چند مجهولی حل شود تا راه حل مناسبی ارائه گردد. (مثلاً محاسبات بیشتر در هر مرحله زمانی).

از طرف دیگر، بیشتر روشهای ساده پایدارند و نیاز به مراحل زمانی کوتاه برای پایداری عددی دارند. این جریان براساس این حقیقت موازنه می شود که ارزش هر مرحله زمانی و نیازهای نگهداری کم است و حل سیستم معادلات چند مجهولی لازم نمی باشد. (مثلاً محاسبه کمتر در هر مرحله زمانی).

البته، مهمترین انتخاب، انتخاب روش یکپارچگی زمانی است که ترکیبی از دقت و راندمان است. در مورد انتخاب روش، راهنمایی ارائه شده و حد کاربرد مشخص گردیده است. معمولاً روشهای ساده برای حل مسائل گسترش موج مناسب هستند. (لئوندس ۱۹۹۹).

در یک حالت عمومی، روشهای یکپارچگی چند مرحله ایی برای سیستم های درجه اول در فرم زیر بیان می شود: [15]

$$u_{n+1} = \sum_{j=1}^m \alpha_j u_{n+1-j} - \Delta t \sum_{j=0}^m \beta_j \dot{u}_{n+1-j} \quad (11-4)$$

در اینجا $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ نشانگر مرحله زمانی و $\begin{bmatrix} \bullet T & T \\ q_{n+1} & q_{n+1} \end{bmatrix} - u_{n+1}^T$ بردار حالت در زمان t_{n+1} است که از

برداری های حالت در زمان های n و براساس مشتقات آنها و مشتق u_{n+1} محاسبه شده است.

برای $\beta \neq 0/0$ ، طرح یکپارچگی (۴-۱۱) به صورت مطلق (ضمنی) است زیرا بردار کیفیت در زمان t_{n+1}

نشانگر مشتق زمانی آن است. بنابراین روابط یکپارچگی قبل از حل معادلات دوباره شکل گیری می شوند.

روش حل در حالت غیرخطی تکرار می شود. برای $\beta = 0/0$ ، بردار حالت در زمان t_{n+1} می تواند مستقیماً

براساس نتایج بدست آمده در مراحل زمانی قبلی بدست آید. گفته شده این روش، صریح است.

به علاوه، وقتی $\alpha_j = 0/0$ ، $\beta_j = 0/0$ برای $j > 1$ در نظر گرفته می شود، رابطه (۴-۱۱) مطابق با روش تک

مرحله ایی است و سیستم در زمان t_{n+1} منحصراً حالت قبل را در زمان t_n نشان می دهد.

(گرادین و ریکسن، ۱۹۹۶).

۴-۳-۲ - یکپارچگی زمانی با استفاده از روش $Newmark - \beta$

الگوریتم عددی مؤثر باید مشخصات زیر را دنبال کند.

* پایداری غیر شرطی.

* میرایی الگوریتمی قابل کنترل.

* پایداری محرک سازه.

* بالا بودن دقت.

* عدم وابستگی تاریخی.

بنابراین دقت بالا، پایداری غیرشرطی، روش چند ارزشی تک مرحله ایی که باعث ایجاد تعادل میان پراکنده سازی مؤثر عددی و از بین رفتن دقت، الگوریتم مناسبی برای کاربردهای دینامیکی سازه است. روش **Newmark** برای یکپارچگی زمانی دارای مشخصات لازم برای روش یکپارچگی مؤثر و پایداری عددی و دقت است. (لئوندس، ۱۹۹۹) [11].

روش **Newmark**، یک فرمول یکپارچگی تک مرحله ایی است. بردار حالات سیستم $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ برگرفته از بردار حالت در زمان t است که در آن توسعه مجموعه های **Taylor** برای جابجایی ها و سرعت ها دیده می شود:

$$f(t_n + \Delta t) = f(t_n) + \Delta t \cdot f'(t_n) + \frac{\Delta t^2}{2} f''(t_n) + \dots + \frac{\Delta t^s}{s!} f^{(s)}(t_n) + R_s \quad (a12-4)$$

در اینجا: R_s باقیمانده توسعه فرمول **S** است:

$$R_s = \frac{1}{s!} \int_{t_n}^{t_n + \Delta t} f^{(s+1)}(\tau) [t_n + \Delta t - \tau]^s d\tau \quad (b12-4)$$

رابطه (a12-4) به ما امکان محاسبه سرعت ها و جابجایی های سیستم در زمان t_{n+1} را می دهد:

$$\dot{q}_{n+1} = \dot{q}_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \ddot{q}(\tau) d\tau \quad (a13-4)$$

$$q_{n+1} = q_n + \Delta t \cdot \dot{q}_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} (t_{n+1} - \tau) \ddot{q}(\tau) d\tau \quad (b13-4)$$

محاسبه این معادلات همراه با ارزیابی اجزاء اصلی معادله (۴-۱۳) در مورد شتاب است. پس ما $\mathbf{q}(t)$ را در فاصله زمانی (t_n, t_{n+1}) به عنوان عملکرد q_n, q_{n+1} در حد فاصله ایی و پس از قرار دادن مواردی چون β, γ و جایگزینی در معادله (۴-۱۲) نشان می دهیم و فرمولهای زیر را بدست می آوریم:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \ddot{q}(\tau) d\tau = (1-\gamma) \cdot \Delta t \cdot \ddot{q}_n + \gamma \cdot \Delta t \cdot \ddot{q}_{n+1} + r_n \quad (\text{a}14-4)$$

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} (t_{n+1} - \tau) \ddot{q}(\tau) d\tau = \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{q}_n + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{q}_{n+1} + r'_n \quad (\text{b}14-4)$$

و خط براساس این فرمول ها محاسبه می شود:

$$r_n = \left(\gamma - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta t^2 \cdot q^{(3)}(\tilde{\tau}) + O(\Delta t^3 \cdot q^{(4)}) \quad t_n \langle \tilde{\tau} \langle t_{n+1} \quad (\text{c}14-4)$$

$$r'_n = \left(\beta - \frac{1}{6}\right) \cdot \Delta t^3 \cdot q^{(3)}(\tilde{\tau}) + O(\Delta t^4 \cdot q^{(4)}) \quad t_n \langle \tilde{\tau} \langle t_{n+1} \quad (\text{d}14-4)$$

با جایگزینی رابطه (۴-۱۴) در (۴-۱۳)، فرمولهای تقریبی زیر برای روش **Newmark** بدست می آید:

$$\dot{q}_{n+1} = \dot{q}_n + (1-\gamma) \cdot \Delta t \cdot \ddot{q}_n + \gamma \cdot \Delta t \cdot \ddot{q}_{n+1} \quad (\text{a}15-4)$$

$$q_{n+1} = q_n + \Delta t \cdot \dot{q}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{q}_n + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \ddot{q}_{n+1} \quad (\text{b}15-4)$$

در اینجا ثابت های β, γ پارامترهای مربوط به طرح ربع دایره می باشند.

با انتخاب $\beta = \frac{1}{6}, \gamma = \frac{1}{4}$ به یک درون یابی خطی برای سرعت (شتاب) در سیستم در فاصله $\ddot{q}(\tau) = \ddot{q}_n + (\tau - t_n) \cdot \frac{\ddot{q}_{n+1} - \ddot{q}_n}{\Delta t}$ زمانی (t_n, t_{n+1}) می رکابل و روابط (۴-۱۵) به اینصورت در می آید:

$$\dot{q}_{n+1} = \dot{q}_n + \frac{\Delta t}{2}(\ddot{q}_n + \ddot{q}_{n+1}) \quad (\text{a}16-4)$$

$$q_{n+1} = q_n + \Delta t \cdot \dot{q}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \left(\frac{2\ddot{q}_n + \ddot{q}_{n+1}}{3} \right) \quad (\text{b}16-4)$$

در برخی از روشها، انتخاب $\beta = \frac{1}{4}, \gamma = \frac{1}{4}$ با در نظر گرفتن میانگین شتاب در فاصله $\ddot{q}(\tau) = \frac{\ddot{q}_{n+1} + \ddot{q}_n}{2}$ زمانی (t_n, t_{n+1}) حاصل می شود و روابط (۴-۱۵) به اینصورت در می آید:

$$\dot{q}_{n+1} = \dot{q}_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot (\ddot{q}_n + \ddot{q}_{n+1}) \quad (\text{a}17-4)$$

$$q_{n+1} = q_n + \Delta t \cdot \dot{q}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \left(\frac{\ddot{q}_n + \ddot{q}_{n+1}}{2} \right) \quad (\text{b}17-4)$$

(گرادین و ریکسین، ۱۹۹۶).

۴-۴- مدل تفاوت محدود برای معادلات دیفرانسیل غیرخطی حرکت

مسائل مهندسی در سیستم های سازه ایی اغلب توسط معادلات دیفرانسیل جزئی شرح داده می شوند که ممکن است به صورت خطی یا غیرخطی باشند. در بیشتر موارد، تعیین راه حل های بسته برای آنها مشکل است. در نتیجه، روشهای عددی برای حل این مسائل استفاده می شوند. متداول ترین روشهای عددی به کار رفته، روش جزء محدود (FEM)، روش تفاوت محدود (FDM) و روش جزء مرزی (BEM) است.

این روشها با استفاده از تعداد زیادی نقاط شبکه ای، نتایج بسیار دقیقی را ارائه می کنند و باعث می شوند که هزینه محاسبه نسبتاً بالا برود. هر چند در بسیاری از آنالیزهای انجام شده، راه حل ها در تعدادی از نقاط یا تعداد محدودی از فرکانس ها و شکل ها لازم هستند. برای رسیدن به یک دقت معقول (قابل قبول)، روشهای عددی قدیمی هنوز همراه با استفاده از تعداد زیادی نقاط شبکه ایی لازم می باشند.

یکی از راههای مؤثر برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی حرکت استفاده از مدل تفاوت محدود برای جداسازی نمایی معادلات سیستم است که با روش و با در نظر گرفتن معادله (۴-۹)، آخرین معادلات حرکت و با منظم کردن مجدد آنها داریم:

$$\hat{H} \cdot \left(\frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial \hat{x}^2} \right) + \frac{\partial \hat{H}}{\partial \hat{x}} \cdot \left(\frac{\partial \hat{z}}{\partial \hat{x}} \right) + (\hat{q}_z + \hat{q}_{dt}) = -\hat{H} \cdot \left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \hat{x}^2} \right) - \hat{H} \cdot \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{x}} \right) + \hat{m} \cdot \left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \hat{t}^2} \right) + \hat{c}_z \cdot \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{t}} \right) + \hat{k}_z \cdot (\hat{w}) \quad (18-4)$$

با در نظر گرفتن β - Newmark و محاسبه میانگین سرعت (شتاب) $(\beta = \frac{1}{4} \quad \gamma = \frac{1}{4})$ به عنوان روش کامل شده یکپارچگی زمانی، معادلات زیر را می توان بدست آورد:

$$\left(\frac{\partial^2 \hat{w}_i}{\partial \hat{t}^2}\right)_{t+dt} = (\hat{\dot{w}}_i)_{t+dt} \quad (\text{a}19-4)$$

$$\left(\frac{\partial \hat{w}_i}{\partial \hat{t}}\right)_{t+dt} = (\hat{\dot{w}}_i)_{t+dt} = (\hat{\dot{w}}_i)_t + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2}\right) \left[(\hat{\dot{w}}_i)_t + (\hat{\dot{w}}_i)_{t+dt} \right] \quad (\text{b}19-4)$$

$$(\hat{w}_i)_{t+dt} = (\hat{w}_i)_t + (\hat{\dot{w}}_i)_t (\Delta \hat{t}) + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2}\right)^2 \left[(\hat{\ddot{w}}_i)_t + (\hat{\ddot{w}}_i)_{t+dt} \right] \quad (\text{c}19-4)$$

با استفاده از محاسبات درجه اول و دوم برای تفاوت محدود برای مشتقات نمایی همراه با محاسبات **Newmark** برای مشتقات موقت (زودگذر)، معادلات زیر برای هر کدام از ارکان معادله (4-18) در فرم ماتریس بُعد n معرفی می شود که برای همه گره های داخلی کابل معرفی می شود [16]:

$$-\left\{ \hat{H} \left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \hat{x}^2} \right) \right\}_{i+\Delta i} = \left(\frac{1}{\hat{h}^2} \right) [A]_i \left\{ \hat{w}_i + (\Delta \hat{t}) \hat{\dot{w}}_i + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2} \right)^2 (\hat{\ddot{w}}_i + \hat{\ddot{w}}_{t+dt}) \right\} \quad (\text{a}20-4)$$

$$-\left\{ \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial \hat{x}} \right) \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{x}} \right) \right\}_{i+\Delta i} = \left(\frac{1}{4\hat{h}^2} \right) [B]_i \left\{ \hat{w}_i + (\Delta \hat{t}) \hat{\dot{w}}_i + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2} \right)^2 (\hat{\ddot{w}}_i + \hat{\ddot{w}}_{t+dt}) \right\} \quad (\text{b}20-4)$$

$$\left\{ \hat{m} \cdot \left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \hat{t}^2} \right) \right\}_{i+\Delta i} = [C] \cdot \left\{ (\hat{\dot{w}}_{t+dt}) \right\} \quad (\text{c}20-4)$$

$$\left\{ \hat{c}_{z'} \cdot \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{t}} \right) \right\}_{i+\Delta i} = [D] \cdot \left\{ \hat{w}_i + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2} \right) (\hat{\dot{w}}_i + \hat{\dot{w}}_{t+dt}) \right\} \quad (\text{d}20-4)$$

$$\left\{ \hat{k}_{z'} \cdot (\hat{w}) \right\}_{i+\Delta i} = [E] \cdot \left\{ \hat{w}_i + (\Delta \hat{t}) \hat{\dot{w}}_i + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2} \right)^2 (\hat{\ddot{w}}_i + \hat{\ddot{w}}_{t+dt}) \right\} \quad (\text{e}20-4)$$

$$\{\hat{q}_{x'} + \hat{q}_{dx'}\}_{i+\Delta i} = [G]_{i+\Delta i} \quad (\text{f}20-4)$$

$$\{\hat{q}_{y'}\}_{i+\Delta i} = [H]_{i+\Delta i} \quad (\text{g}20-4)$$

$$\{\hat{q}_{z'} + \hat{q}_{dz'}\}_{i+\Delta i} = [J]_{i+\Delta i} \quad (\text{h}20-4)$$

$$-\left\{\hat{H}\left(\frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial \hat{x}^2}\right)\right\}_{i+\Delta i} = \left(\frac{1}{\hat{h}^2}\right)[A]_i\{(\hat{z}_i)\} \quad (\text{i}20-4)$$

$$-\left\{\left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial \hat{x}}\right)\left(\frac{\partial \hat{z}}{\partial \hat{x}}\right)\right\}_{i+\Delta i} = \left(\frac{1}{4\hat{h}^2}\right)[B]_i\{(\hat{z}_i)\} \quad (\text{j}20-4)$$

در اینجا:

\hat{h} طول بخشی از کابل است که نرمال شده است.

$$\hat{h} = \left(\frac{h}{L_{ch}}\right) = \left(\frac{L_{ch}/n-1}{L_{ch}}\right) = \left(\frac{1}{n-1}\right) \quad (\text{a}21-4)$$

$n-1$ تعداد قسمت‌های کابل است.

$\Delta \hat{t}$ مرحله زمانی نرمال شده است.

$$\Delta \hat{t} = \left(\sqrt{\frac{EA}{mL_{ch}^2}}\right) \cdot \Delta t \quad (\text{b}21-4)$$

$$[E] = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \hat{k}_2 & & \\ & & & \\ & & & \hat{k}_{n-1} \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \quad \text{where: } \hat{k} = \hat{k}_x, \text{ or } \hat{k}_y, \text{ or } \hat{k}_z \quad (g_{21}-\text{f})$$

$$\{G\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ (\hat{q}_{x'2} + \hat{q}_{dx'}) \\ \\ (\hat{q}_{x'n-1} + \hat{q}_{dx'}) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (h_{21}-\text{f})$$

$$\{H\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ (\hat{q}_{y'2}) \\ \\ (\hat{q}_{y'n-1}) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (i_{21}-\text{f})$$

$$\{J\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ (\hat{q}_{x'2} + \hat{q}_{dx'}) \\ \\ (\hat{q}_{x'n-1} + \hat{q}_{dx'}) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (j_{21}-\text{f})$$

با استفاده از معادلات فوق برای بازنویسی معادله (۱۸-۴) به عنوان معادلات حرکت در سیستم منقطع در مسیر

z' در زمان $\hat{t}_{i+1} = \hat{t}_i + \Delta \hat{t}$ داریم.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{-1}{\hat{h}^2}\right)[A]_i \{(\hat{z}_i)\} + \left(\frac{-1}{4\hat{h}^2}\right)[B]_i \{(\hat{z}_i)\} + \{J\}_i = \\ & \left(\frac{1}{\hat{h}^2}\right)[A]_i \left\{ \hat{w}_i + (\Delta \hat{t})\hat{w}_i + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2}\right)^2 (\hat{w}_i + \hat{w}_{i+\Delta t}) \right\} + \left(\frac{1}{4\hat{h}^2}\right)[B]_i \left\{ \hat{w}_i + (\Delta \hat{t})\hat{w}_i + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2}\right)^2 (\hat{w}_i + \hat{w}_{i+\Delta t}) \right\} + \\ & [C] \cdot \{(\hat{w}_{i+\Delta t})\} + [D] \cdot \left\{ \hat{w}_i + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2}\right)(\hat{w}_i + \hat{w}_{i+\Delta t}) \right\} + [E] \cdot \left\{ \hat{w}_i + (\Delta \hat{t})\hat{w}_i + \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2}\right)^2 (\hat{w}_i + \hat{w}_{i+\Delta t}) \right\}. \end{aligned} \quad (22-4)$$

با مرتب کردن معادله فوق در فرم معروف $[A] \{X\} = \{b\}$ برای حل مجموعه ایی از معادلات چند مجهولی داریم:

$$\begin{aligned} & \left\{ \Delta \hat{t}^2 (4[A]_i + [B]_i) + 16\hat{h}^2 [C]_i + 8\hat{h}^2 \Delta \hat{t} [D]_i + 4\hat{h}^2 \Delta \hat{t}^2 [E]_i \right\} \{ \hat{w}_{i+\Delta t} \} = \\ & \left\{ -16[A]_i - 4[B]_i - 16\hat{h}^2 [E]_i \right\} \left\{ \hat{w}_i + \hat{w}_i \Delta \hat{t} + (\hat{w}_i) \left(\frac{\Delta \hat{t}^2}{4} \right) \right\} + \\ & \left\{ -16\hat{h}^2 [D]_i \right\} \left\{ \hat{w}_i + (\hat{w}_i) \left(\frac{\Delta \hat{t}}{2} \right) \right\} + \\ & \left\{ -16[A]_i - 4[B]_i \right\} \{ \hat{z}_i \} + 16\hat{h}^2 [J]_i. \end{aligned} \quad (23-4)$$

با استفاده از معادلات قبل، به بازنویسی معادلات مشابه با سیستم منقطع در مسیرهای x' ، y' در زمان

$t_{i+1} = \hat{t}_i + \Delta \hat{t}$ می پردازیم.

۴-۵- روش محاسبه برای حل معادلات حرکت

۴-۵-۱- مقطع وزن اولیه کابل

همانند آنالیز استاتیک، اولین کار در آنالیز دینامیکی و غیرخطی کابل، تعیین مقطع اولیه کابل فقط با توجه به وزن آن است. این کار معادل با استفاده از بردار بار $\hat{q} = \{\hat{q}_{dx} \circ \hat{q}_{dz}\}$ در مقطع اولیه کابل است که به صورت وتر (خرپا) محاسبه می شود. این کار با استفاده از مدل تفاوت محدود با طرح تکراری کامل می شود. روش محاسبه قبلاً در بخش ۲ شرح داده شده است. در پایان، مقطع وزن کابل در محورهای مختصات (X, Y, Z) و طول آن (بدون کشش آمدگی) یعنی S_0 بدست می آید.

۴-۵-۲- پاسخ کابل با توجه به بارگذاری دینامیکی عمومی

برای تعیین پاسخ کابل (مثلاً جابجایی دینامیکی سه بعدی و اجزاء کشش داخلی) با توجه به بارگذاری دینامیکی سه بعدی، حل عددی معادلات دیفرانسیل غیرخطی حرکت (تعداد دینامیکی) با استفاده از طرحهای متوالی بدست می آید. روش محاسباتی مورد نیاز در پارگرافهای زیر شرح داده شده است.

در هر مرحله زمانی، تعدادی از تکرارها تا زمان رسیدن به راه حل مناسب لازم است. برای هر کدام از این تکرارها، مراحل زیر انجام می شود [15].

مرحله ۱:

معادله غیر ابعادی حرکت در مسیر X' برای شتاب نرمال شده مجهول $\{\hat{u}\}_{t+\Delta t}$ حل کنید. این کار با استفاده از مدلی که قبلاً شرح داده شد و ترکیبی از روش تفاوت محدود برای چند پارچه سازی (جداسازی) نمایی و روش β - Newmark برای یکپارچگی زمانی بود بدست آمد. معادله حرکت از طریق معادله ای مانند ۴-۲۳

شرح داده شده که فرم مشخص $\{X\} = [A] \{b\}$ را دارد. ماتریس ضریب $[A]$ چیزی است که قبلاً توسط ماتریس های $[A]_t, [B]_t, [C], [D], [E]$ شرح داده شده است. آنها با استفاده از خواص سیستم در مرحله زمانی قبلی t محاسبه شده اند. بردار نامعین $\{X\}$ نشانگر شتاب نرمال شده و مجهول $\{\hat{u}\}_{t+\Delta t}$ است. بردار نیروی $\{b\}$ تابعی از خواص سیستم و پاسخهای جابجایی، سرعت و شتاب در مرحله زمانی قبلی t همراه با بارگذاری دینامیکی $\{j\}_{t+\Delta t}$ در مرحله زمانی جاری $t + \Delta t$ است. چون ماتریس های سیستم و از اینرو ماتریس ضریب $[A]$ یک ماتریس مثلثی است، برای حل مجهول ها از یک راه حل خاص استفاده می شود.

مرحله ۲:

برای حل معادلات غیر ابعادی حرکت در مسیرهای y', z' برای شتاب های نرمال شده مجهول $\{\hat{V}\}_{t+\Delta t}$ و $\{\hat{w}\}_{t+\Delta t}$ با استفاده از مدل تفاوت محدود مشابهی که توسط معادله ۴-۲۳ آمده، مرحله ۱ را تکرار کنید. این کار با استفاده از روشی که در مرحله ۱ آمده انجام می شود به جز برای پاسخهای مربوط در سیستم و بارگذاری دینامیکی.

مرحله ۳:

با استفاده از روش یکپارچگی زمانی β - Newmark با میانگین محاسبه شتاب، سرعتهای نرمال شده بعدی $\{\hat{u}\}_{t+\Delta t}, \{\hat{V}\}_{t+\Delta t}, \{\hat{w}\}_{t+\Delta t}$ و جابجایی های $\{\hat{u}\}_{t+\Delta t}, \{\hat{V}\}_{t+\Delta t}, \{\hat{w}\}_{t+\Delta t}$ را به عنوان تابعی از شتابهایی که تازه معین شده اند و به عنوان بردارهای پاسخ در مرحله زمانی قبل مشخص کنید.

مرحله ۴ - a:

برای هر جزء طول تغییر یافته جدید $\Delta \bar{S}_i$ را با استفاده از وزنی که قبلاً از روی شکل هندسی تغییر یافته در کابل تعیین شده بود محاسبه کنید و تغییرات محاسبه شده را از روی معادلات زیر حساب نمایید.

$$\Delta \hat{S}_i = \sqrt{(\Delta \hat{x})_i^2 + (\Delta \hat{y})_i^2 + (\Delta \hat{z})_i^2} \quad (\text{a}24-4)$$

در اینجا:

$$(\Delta \hat{x})_i = (\hat{x}_{i+1} + \hat{u}_{i+1}) - (\hat{x}_i + \hat{u}_i) = \hat{h} + \hat{u}_{i+1} - \hat{u}_i; \quad (\Delta \hat{y})_i = \hat{v}_{i+1} - \hat{v}_i \quad (\text{b}24-4)$$

$$(\Delta \hat{z})_i = (\hat{z}_{i+1} + \hat{w}_{i+1}) - (\hat{z}_i + \hat{w}_i).$$

مرحله ۴- b:

برای هر جزء و با شناخت طول تغییر یافته جدید $\Delta \bar{S}_i$ ، کرنش tagrangian در مسیر کابل به اینصورت

محاسبه می شود.

$$\varepsilon_i = \frac{(\Delta \hat{S})_i^2 - (\Delta \hat{S}_0)_i^2}{2 \times (\Delta \hat{S}_0)_i^2} \quad (\text{c}25-4)$$

مرحله ۵:

رفتار کابل معمولاً حالت غیرخطی الاستیکی دارد و این خطر خطی بودن توسط نسبت کشش $\nu = S/S_0$

مشخص می شود. با استفاده از نسبت کشش، می توان کشش واقعی در کابل را محاسبه کرد. (لئونارد ۱۹۸۸).

از طرف دیگر، برای هر جزء کل کشش داخلی \hat{T}_i می تواند با استفاده از مدول الاستیسته E در کابل، سطح

مقطع A همراه با کشش طولی غیرخطی تعیین شده محاسبه شود [18]:

$$\hat{T}_i = E \cdot A \cdot \varepsilon_i \quad \text{for } i = 1, \dots, n-1 \quad (\text{a}26-4)$$

چون معادلات دیفرانسیل در سیستم در گروه ها مطرح می شوند، مقدار کشش نرمال شده در مسیر x' در هر

کدام از گره های داخلی به این صورت محاسبه می شوند:

$$\hat{T}_{1i} = \hat{T}_i \cdot \frac{(\Delta \hat{x})_i}{(\Delta \hat{S})_i}; \quad \hat{T}_{2i} = \hat{T}_i \cdot \frac{(\Delta \hat{y})_i}{(\Delta \hat{S})_i}; \quad \hat{T}_{3i} = \hat{T}_i \cdot \frac{(\Delta \hat{z})_i}{(\Delta \hat{S})_i} \quad (\text{b}26-4)$$

$$\hat{H}_1 = (\hat{T}_1)_1; \quad \hat{H}_i = \frac{1}{2} \times [(\hat{T}_i)_{i-1} + (\hat{T}_i)_i]; \quad \hat{H}_n = (\hat{T}_1)_{n-1}; \quad \text{for } i = 2, \dots, n-1 \quad (\text{C}26-4)$$

مرحله ۶ :

در پایان تکرار (توالی) همگرایی راه حل ها در بردارهای جابجایی گره ایی در کابل $\{\hat{u}\}, \{\hat{v}\}, \{\hat{w}\}$ را بررسی کنید این چک کردن با استفاده از معیارهای توقف تکرار توسط پایداری دقت از پیش فرض شده توسط تحلیل گرانجام می شود معیار توقف از نظر ریاضیات به این صورت زیر نشان داده می شود:

$$\frac{\|Sum_{(\varepsilon_u)}\| + \|Sum_{(\varepsilon_v)}\| + \|Sum_{(\varepsilon_w)}\|}{S_o} \leq \varepsilon \quad (\text{a}27-4)$$

در اینجا:

$$\|Sum_{(\varepsilon_u)}\| = \sum_{i=1}^n \|u_{i,k+1} - u_{i,k}\| \quad (\text{b}27-4)$$

$$\|Sum_{(\varepsilon_v)}\| = \sum_{i=1}^n \|v_{i,k+1} - v_{i,k}\| \quad (\text{C}27-4)$$

$$\|Sum_{(\varepsilon_w)}\| = \sum_{i=1}^n \|w_{i,k+1} - w_{i,k}\| \quad (\text{d}27-4)$$

جریان توالی که در مرحله ۱ تا ۶ آمده تا وقتی قابل ترکیب است که معیارهایی برای توقف توالی وجود داشته باشد.

مرحله ۷-a:

بردارهای قبل و افزایش زمان t_i را با استفاده از مرحله زمانی Δt به صورت جدید در آورید.

مرحله ۷-b:

یکپارچگی زمانی را در مراحل زمانی متوالی و با تکرار مرحله ۱ تا ۷a ادامه دهید تا پاسخ کابل در حد زمانی لازم به دست آید.

با استفاده از روش محاسباتی فوق برای کابل ها، می توان راه حل عددی دقیقی را برای کابل که تحت بارگذاری دینامیکی سه بعدی است به دست آورد این کار با ایجاد تعادل دینامیکی نیروها و سازگاری تغییر شکل هایی که توسط معادلات دیفرانسیلی در مورد حرکت سیستم کابلی شرح داده شد، انجام می پذیرد.

۴-۶- تحقیق عددی

این تحقیق به بررسی ارتباط پاسخهای دینامیکی کابل بر اساس تغییر پارامترهای در حال نوسان می پردازد که از این دسته می توان به موارد زیر اشاره کرد: جزء افقی کشش اولیه H ، سختی محوری کابل EA ، جرم کابل در هر واحد طول m ، بارگذاری دینامیکی q_1, q_2, q_3 ، وزن کابل در هر واحد طول q_d و شیب وتر کابل θ .

۴-۶-۱- اطلاعاتی در مورد مسئله

شکل ۴-۲ نشانگر طرح مسئله در مورد کابلی است که تحت بارگذاری دینامیکی است اطلاعات زیر مربوط به یک تحقیق موردی است که مقادیر زیر برای آن در نظر گرفته شده است:

اطلاعات کابل : $N_{d/v} = 120$, $H = 10400 \text{ IB}$, $E = 20000000 \text{ psi}$

$A = 0.065 \text{ in}^2$, $(x_c, y_c, z_c)_i = (0/0, 0/0, 0/0) \text{ ft}$,

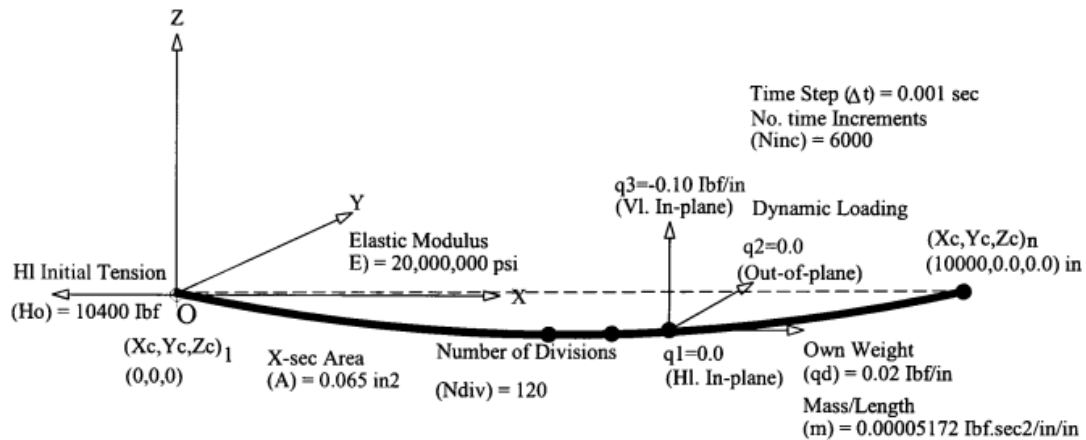
$(x_c, y_c, z_c) = (10000, 0/0, 0/0) \text{ ft}$, $\theta = 0/0 \text{ deg}$,

$q_d = 0/02 \text{ lbf/in}$, $m = 0/00005172 \text{ lbf} \cdot \text{sec}^2/\text{in/in}$.

اطلاعات بارگذاری: بارگذاری استفاده شده برای یکپارچگی:

زمان $t_{lead} = 6$ ثانیه $q_1 = 0/01$, $q_2 = 0/01$, $q_3 = 0/0 \text{ lbf/in}$

اطلاعات یکپارچگی زمانی : $\Delta t = 0/001$ ثانیه $N_{inc} = 6000$



شکل ۴-۲: اطلاعات واقعی در مورد دینامیک های کابل

۴-۶-۲- اطلاعات پارامتریکی تحقیق

در تحقیق، مقادیر مختلفی از پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده تا کل مقادیر احتمالی را در حد عملی (واقعی) نشان دهد این تغییرات در جدول ۴-۱ آمد است.

H_o (lbf)	5200	10400	20800	52000	10400		
EA (lbf)	6.5×10^5	13.0×10^5	26.0×10^5	65.0×10^5	13.0×10^6		
m (lbf · sec ² / in) / in	2.586×10^{-5}	5.172×10^{-5}	1.034×10^{-4}	2.586×10^{-4}	5.172×10^{-4}		
q_d (lbf / in)	0.01	0.02	0.04	0.10	0.20		
q_1 (lbf / in)	0.00	+0.05	+0.10	+0.20	+0.50	+1.00	
q_2 (lbf / in)	0.00	+0.05	+0.10	+0.20	+0.50	+1.00	
q_3 (lbf / in)	0.00	- 0.05	- 0.10	- 0.20	- 0.50	1.00	
θ (deg)	0	15	30	45	60	75	90

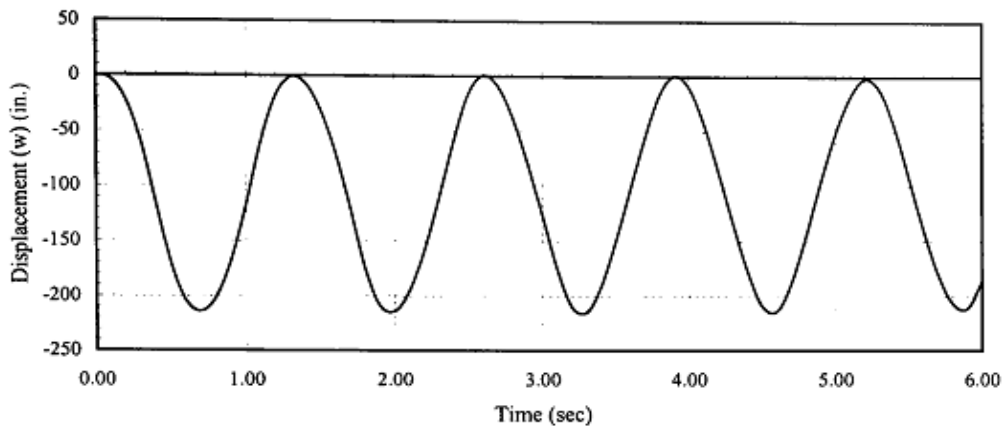
جدول ۴-۱: مقادیر عددی برای پارامترهای آنالیز دینامیکی

۴-۶-۳- بحث در مورد نتایج مسئله

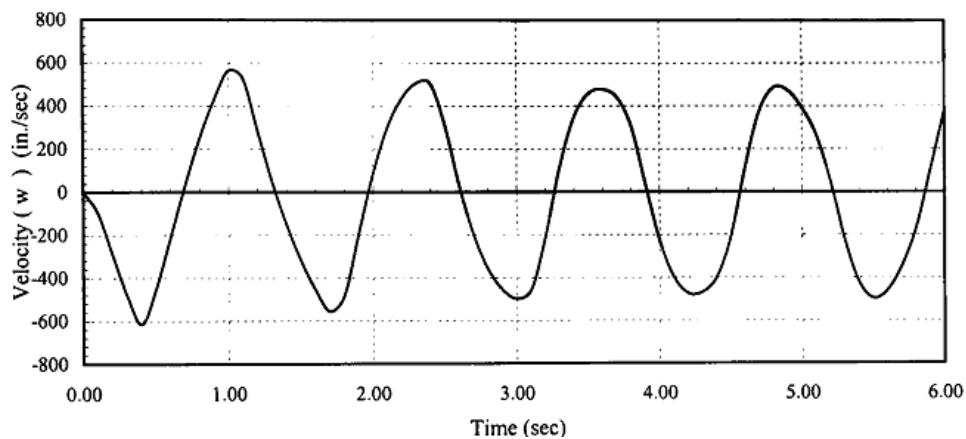
۴-۶-۳-۱- تاریخچه زمانی پاسخ کابل

شکل ۴-۳ نشانگر تاریخچه زمانی پاسخ وسط کابل در یک مسئله است. شکل ۴-۳a نشانگر جزء جابجایی در صفحه عمودی ω است ($u=0, v=0$) در حالی که شکل ۴-۳b نشانگر جزء سرعت $\dot{\omega}$ است ($\dot{u}=0, \dot{v}=0$) و شکل ۴-۳c نشانگر جزء شتاب w ($u=0, v=0$) می باشد. در این شکلها می بینیم که پاسخهای کابل به این نوع بارگذاری (با استفاده از بارگذاری ثابت) را می توان در یک دوره خاص $t_f = 1/3$ ثانیه ای به صورت هارمونیک در نظر گرفت. پاسخ شتاب نشانگر برخی از بی نظمی های حاصل از راه حل های عددی است. این تأثیر مهم نیست زیرا با توجه به جریان یکپارچگی به صورت اتوماتیک اصلاح می شود.

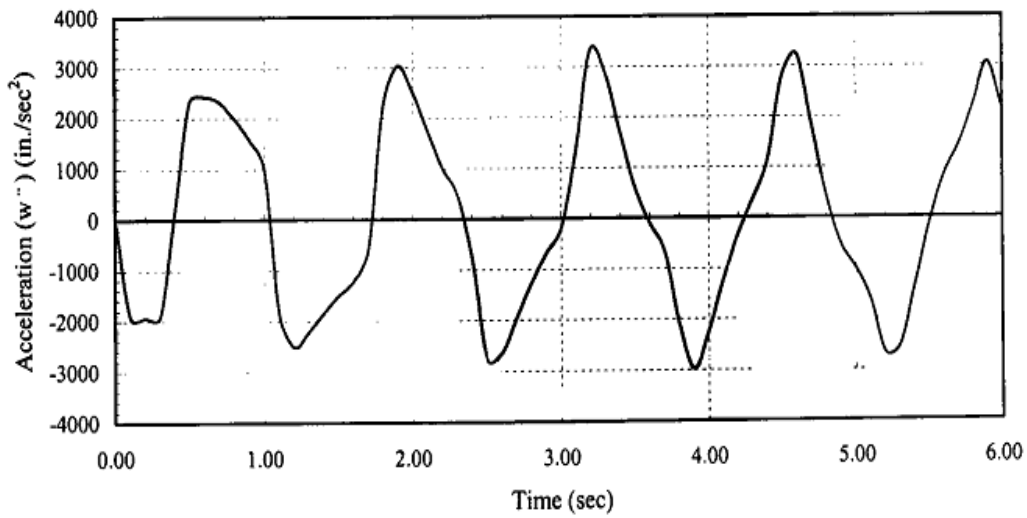
شکل ۴-۴ نشانگر تاریخچه های زمانی برای کشش در انتهای کابل است. شکل ۴-۴a نشانگر T_x در صفحه افقی و T در صفحه عمودی و اجزاء کشش $(T_y=0/0)$ است. شکل ۴-۴b نشانگر کشش کل T است. در این شکلها مشخص است که پاسخ نیرو هارمونیک است. (در یک دوره زمانی). تأثیر بارگذاری، افزایش کل اجزاء کشش داخلی است. در این حالت، در جایی که هیچ بارگذاری وجود ندارد، ۳۰ درصد افزایش کشش دیده می شود. تغییر در جزء افقی کشش روی افزایش کشش حتی در بارگذاری در صفحه عمودی اثر دارد [14].



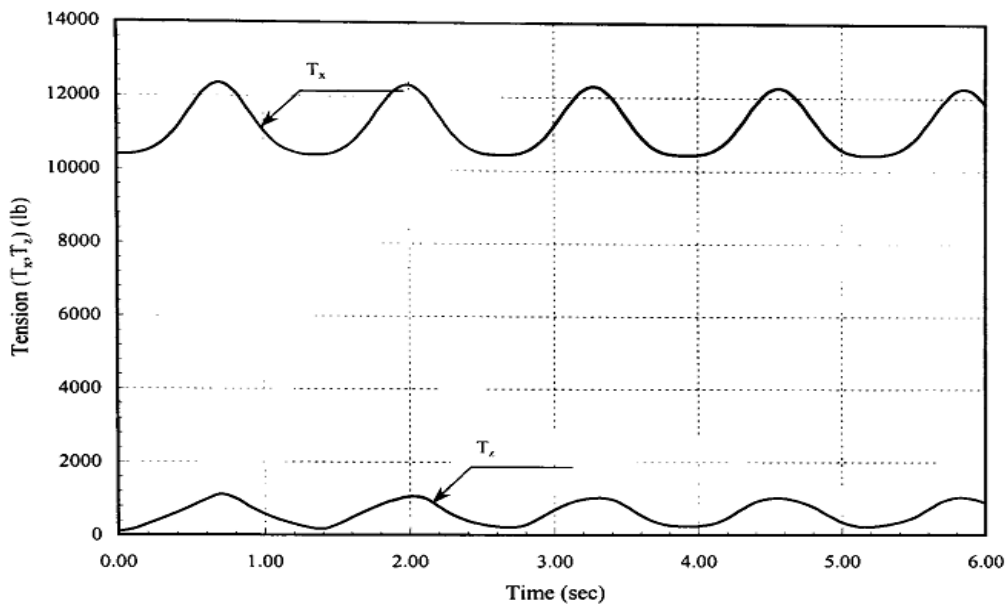
شکل ۴-۴a: تاریخچه زمانی پاسخ در بخش میانی کابل (جابجایی)



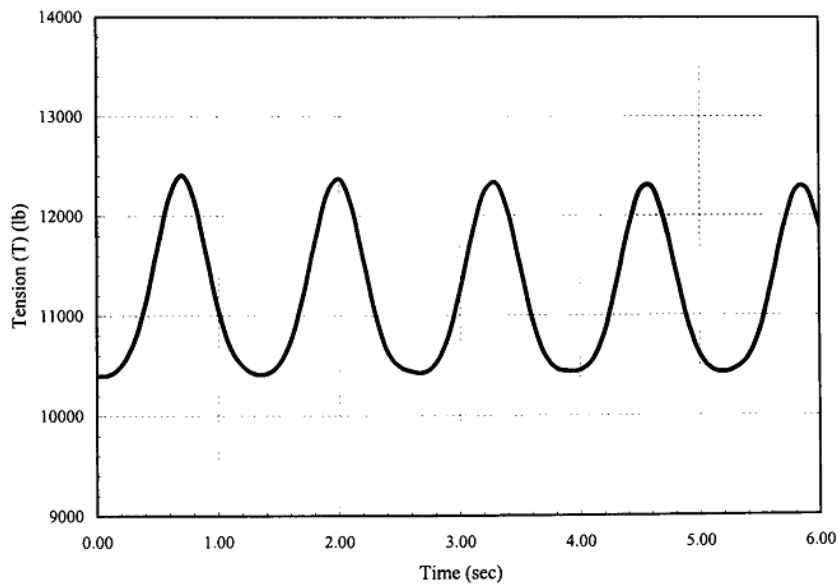
شکل ۴-۴b: تاریخچه زمانی پاسخ در بخش میانی کابل (سرعت)



شکل ۴-۳: تاریخچه زمانی پاسخ در بخش میانی کابل (شتاب)



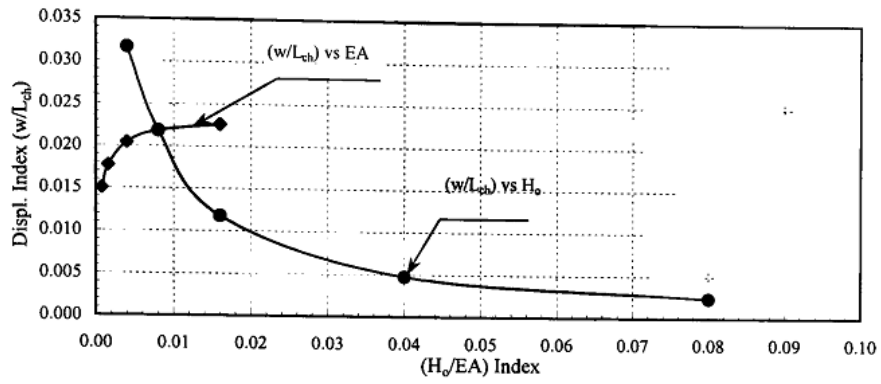
شکل ۴-۳: تاریخچه زمانی اجزاء کششی (T_x , T_z) در انتهای کابل



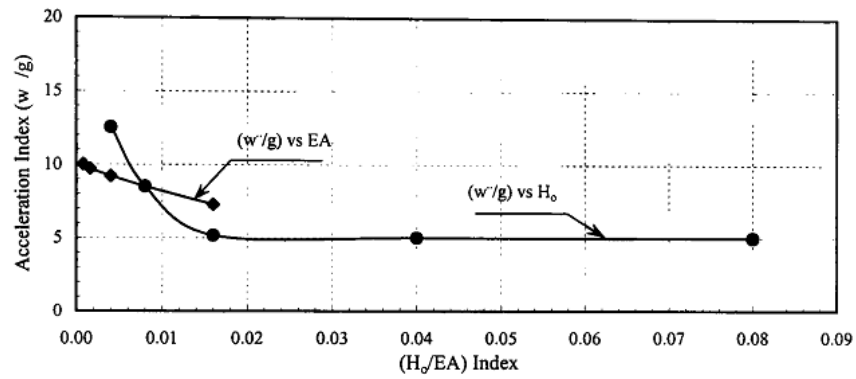
شکل ۴-۵: تاریخچه زمانی کشش کل (T) در انتهای کابل

۴-۶-۳-۲- تأثیر سختی محوری متغیر EA

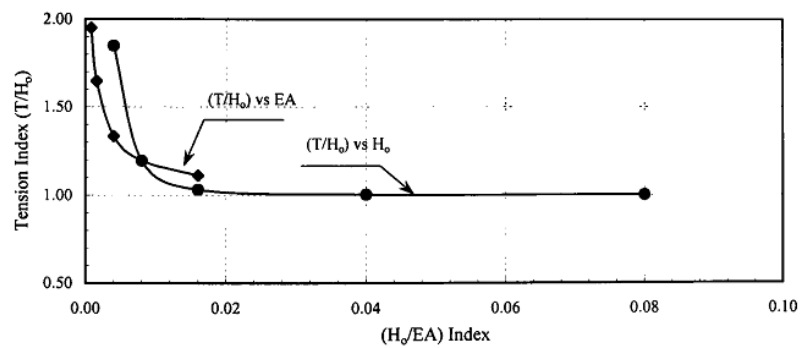
شکل ۴-۵ نشانگر تأثیر سختی محوری متغیر EA در شاخص غیرابعادی H_0/EA در حداکثر پاسخ جابجایی در وسط کابل براساس شاخص جابجایی غیر ابعادی w/l_{ch} است. شکل ۴-۵ نشانگر تأثیر بر حداکثر پاسخ شتاب در وسط کابل در شاخص شتاب غیر ابعادی T/H_0 است. سختی محوری کابل با استفاده از سطح مقطع بزرگتر یا مدول الاستیکی بیشتر در کابل (مصالح کابل) افزایش می یابد که در این شکلها، باید توجه کرد افزایش سختی محوری کابل مربوط به کمترین جابجایی و بیشترین شتاب است. از طرف دیگر، گرچه جابجایی ها و کشش های بعدی کاهش می یابد، کشش های کابل افزایش می یابد.



شکل ۴-ا: حد اکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (H_0, EA) (جابجایی در وسط کابل)



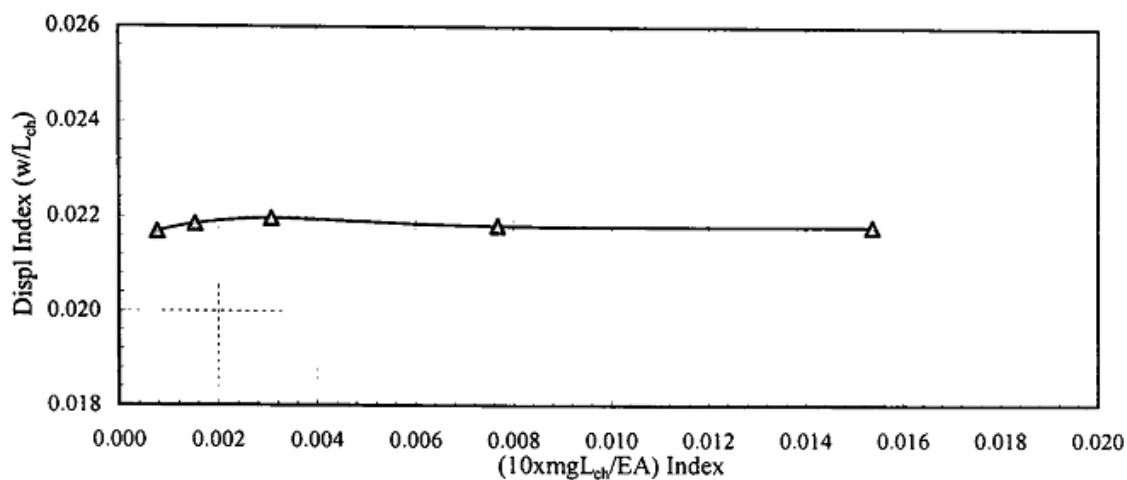
شکل ۴-ب: حد اکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (H_0, EA) (شتاب در وسط کابل)



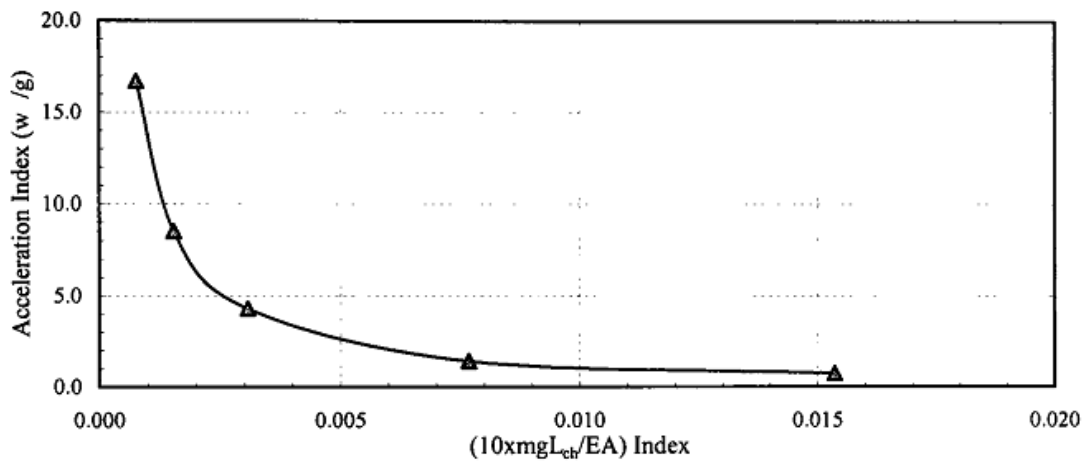
شکل ۴-ج: حد اکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (H_0, EA) (کشش در انتهای کابل)

۴-۶-۳-۳- تأثیر جرم متغیر / طول واحد m

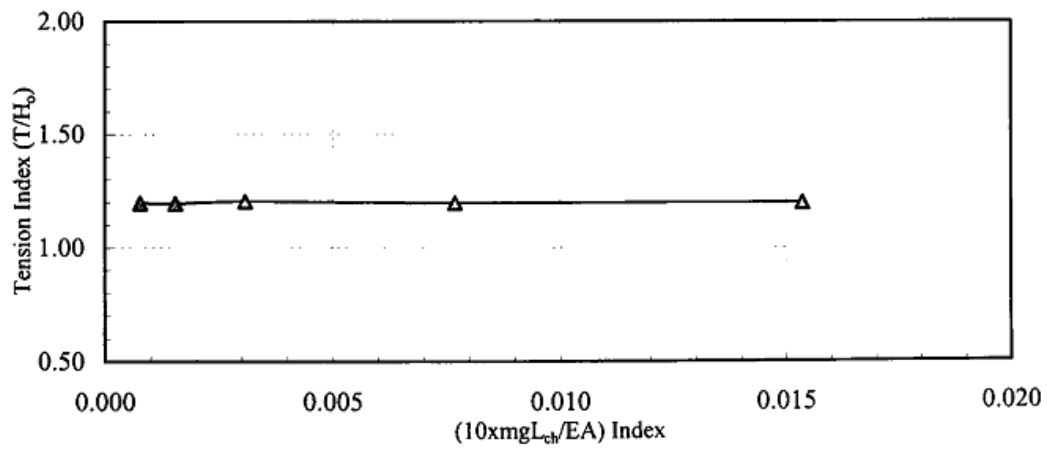
شکل ۴-۶a نشانگر تأثیر تغییر جرم کابل / طول واحد m در شاخص غیرابعادی mgL_{ch}/EA بر حداکثر پاسخ جابجایی در وسط کابل در شاخص جابجایی غیرابعادی w/l_{ch} است. شکل ۴-۶b نشانگر تأثیر حداکثر شتاب وسط کابل در شاخص شتاب غیرابعادی w/g است و شکل ۴-۶c نشانگر تأثیر حداکثر پاسخ کشش انتهای کابل در شاخص کشش T/H است. جرم کابل روی پاسخ شتاب اثر دارد در صورتیکه تأثیر چندانی بر جابجایی ها و کشش انتهای کابل ندارد. بالاتر بودن جرم باعث کاهش میزان شتاب می شود.



شکل ۴-۶a: حداکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف m (جابجایی در وسط کابل)



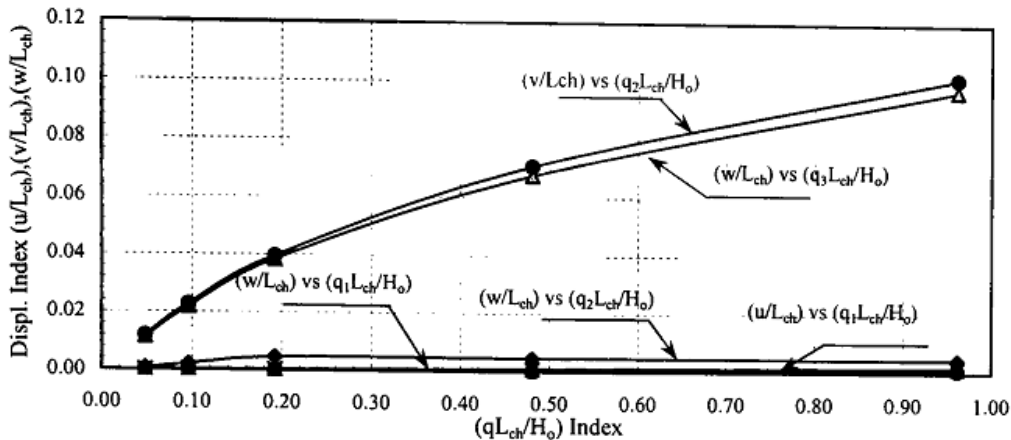
شکل ۴-۶: حداکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (m) (شتاب در وسط کابل)



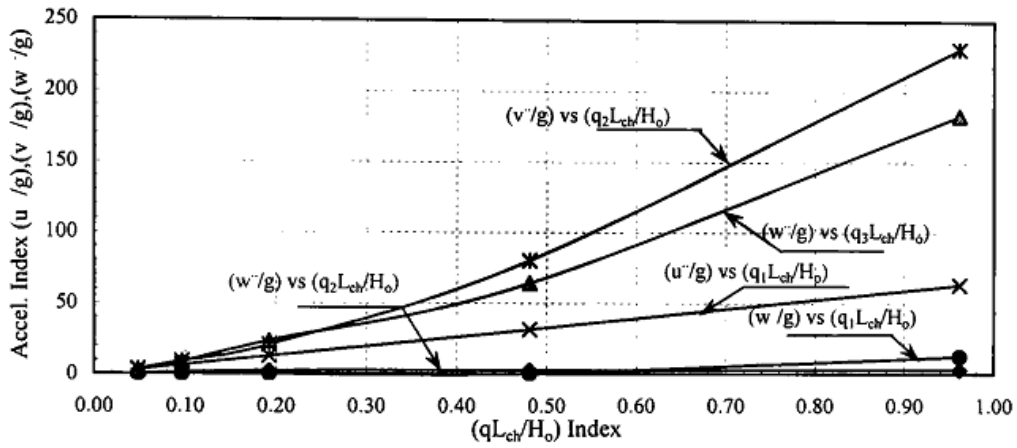
شکل ۴-۶: حداکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (m) (کشش در انتهای کابل)

۴-۳-۶-۴: تأثیر بارگذاری دینامیکی متغیر q_1, q_2, q_3 :

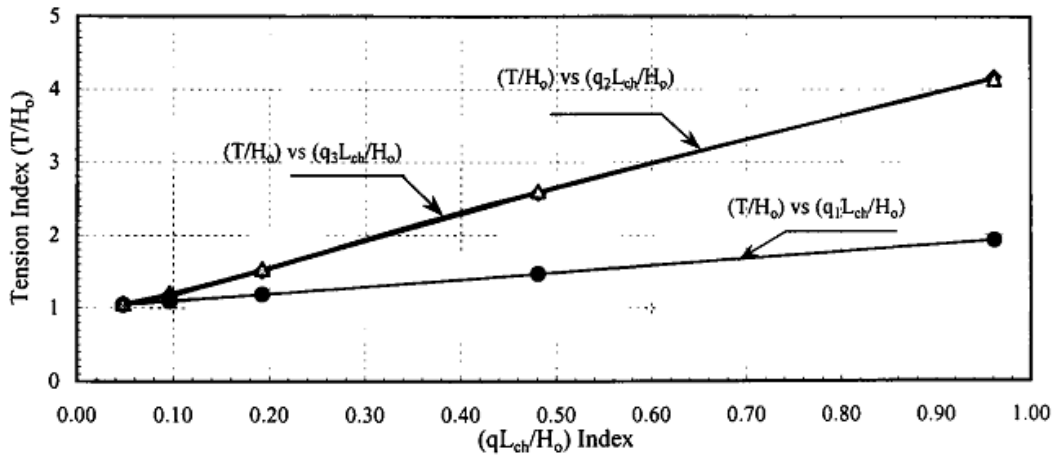
شکل ۴-۷a نشانگر تأثیر اجزاء بارگذاری دینامیکی متغیر q_1, q_2, q_3 در شاخص غیرابعادی ql_{ch}/H_0 در حداکثر جابجایی وسط کابل در شاخص های جابجایی غیرابعادی $w/l_{ch}, V/l_{ch}, u/l_{ch}$ است. شکل ۴-۷b نشانگر تأثیر بعدی بر حداکثر پاسخ شتاب در وسط کابل در شاخص غیرابعادی $w/g, v/g, u/g$ است و شکل ۴-۷c نشانگر تأثیر بعدی بر حداکثر پاسخ کشش انتهایی کابل در شاخص کشش غیر ابعادی T/H_0 است. همانطور که انتظار می رفت، سطح بارگذاری دینامیکی روی پاسخ کابل اثر دارد. شکلها نشان می دهند که زیاد بودن بارگذاری درون صفحه ای (۱ به وتر) q_2 باعث افزایش جابجایی صفحه ای می شود در حالیکه بارگذاری صفحه ای (۱۱ به وتر) q_1 تأثیر کمی بر جابجایی های برون صفحه ای دارد و باعث افزایش سطوح بارگذاری می شود. پاسخهای جزء شتاب متناسب با بارگذاری های بعدی افزایش می یابد در حالیکه اجزاء دیگر بارگذاری اثر کمی دارند. بارگذاری درون صفحه ای بیشتر q_2 (۱ به وتر) و بارگذاری خارج صفحه ای q_1 (۱۱ به وتر) باعث افزایش کشش کل می شود ولی نسبت آن کمتر است [15].



شکل ۴-۷a: حداکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (q_1, q_2, q_3) جابجایی در وسط کابل



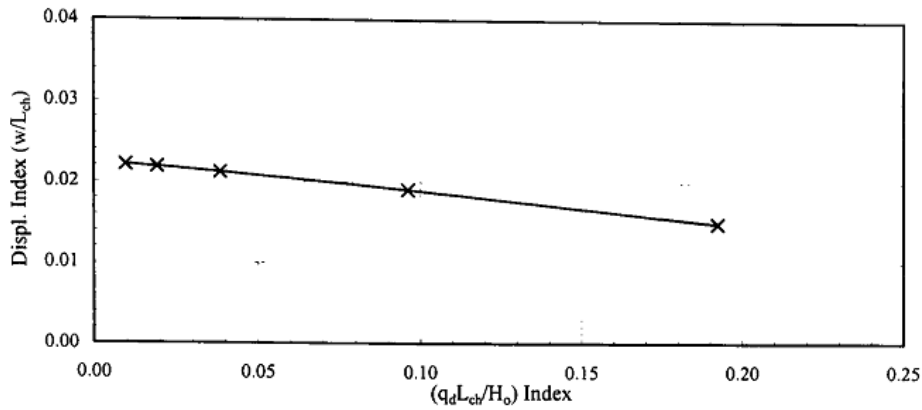
شکل ۴-ب: حد اکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (q_1, q_2, q_3) (شتاب در وسط کابل)



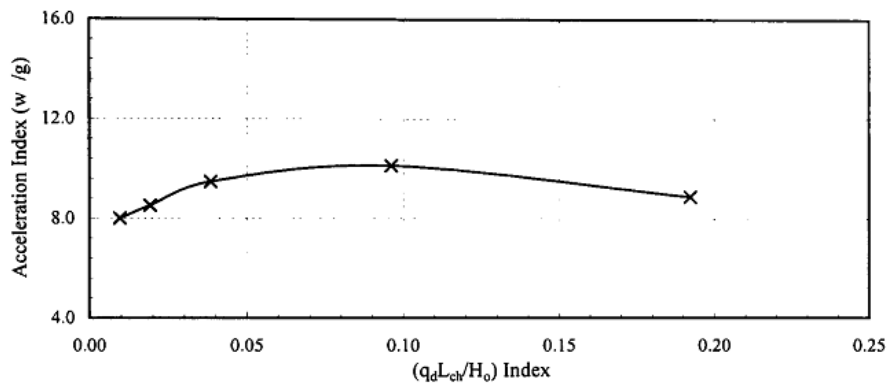
شکل ۴-ج: حد اکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (q_1, q_2, q_3) (کشش در انتهای کابل)

۴-۶-۳-۵- تأثیر وزن متغیرها/ طول واحد q_d

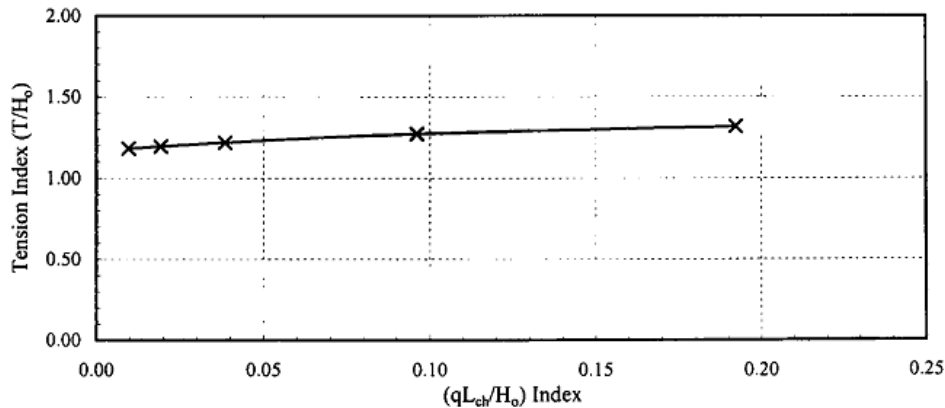
شکل ۴-۸ا نشانگر تأثیر وزن متغیر/ طول واحد q_d در شاخص غیر ابعادی $q_d l_{ch} / H_0$ با حداکثر پاسخ جابجایی وسط کابل در شاخص جابجایی غیر ابعادی w/l_{ch} است. شکل ۴-۸ب نشانگر تأثیر بعدی بر حداکثر پاسخ شتاب در وسط کابل در شاخص شتاب غیر ابعادی w/g و شکل ۴-۸c نشانگر تأثیر دیگری بر حداکثر پاسخ کشش انتهای کابل در شاخص کشش غیر ابعادی T/H_0 است. شکلها نشانگر تأثیر وزن کابل در مقایسه با سطوح عملی بارگذاری کاربردی با دسترسی به جابجایی کابل و پاسخ نیروهاست.



۴-۸ا: حداکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (q_d) (جابجایی در وسط کابل)



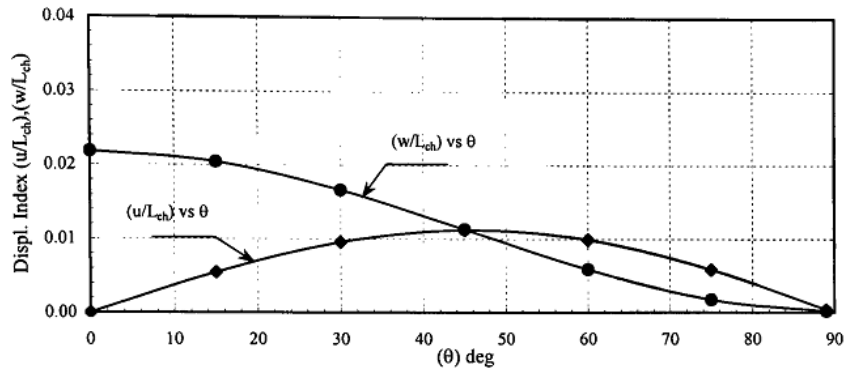
۴-۸ب: حداکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (q_d) (شتاب در وسط کابل)



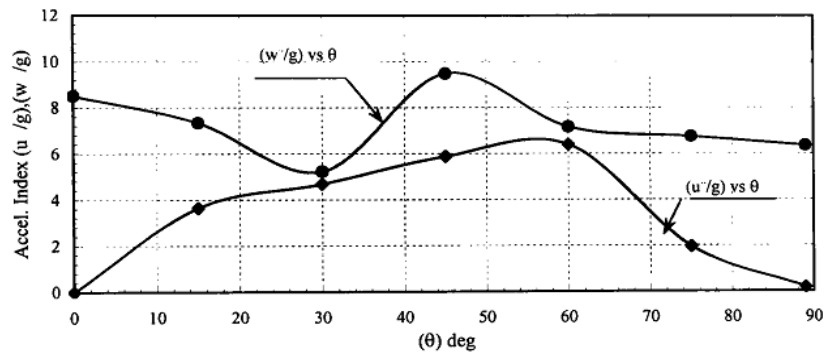
۸-۴ حداکثر پاسخهای کابل برای مقادیر مختلف (q_d) (کشش در انتهای کابل)

۶-۴-۳-۶- تأثیر شیب وتر متغیر θ

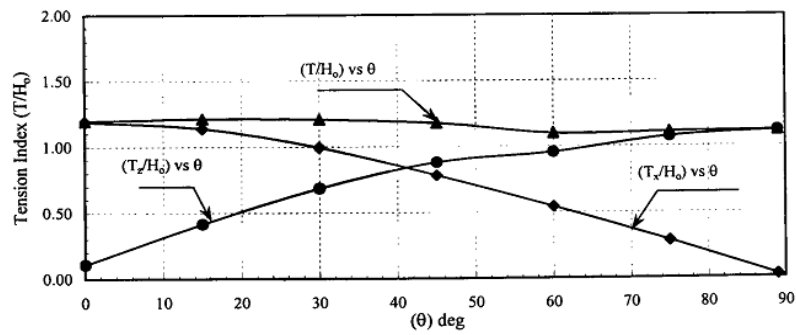
شکل ۴-۹۹ نشانگر تأثیر شیب متغیر وتر θ بر حداکثر پاسخ جابجایی وسط کابل به صورت شاخص های جابجایی غیرابعادی w/l_{ch} , u/l_{ch} است. شکل ۴-۹۹ نشانگر تأثیر دیگری بر حداکثر پاسخ شتاب وسط کابل در شاخص های شتاب غیرابعادی $w/g = u/g$ است و شکل ۴-۹۹ هم نشانگر اثر دیگری بر حداکثر پاسخ کشش انتهای کابل در شاخص کشش غیر ابعادی T/H_0 است. شکل ها نشان می دهند که شیب وتر روش منحصر به فردی برای بررسی پاسخ کابل در بارگذاری دینامیکی است. در حالیکه شیب های بیشتر در کابل باعث کاهش جابجایی عمودی می شود، این تأثیر نسبت به حالت افقی متفاوت است و در یک شیب خاص به حداکثر رسیده و با افزایش شیب، کم می شود. در مورد پاسخ های شتاب، این متغیر متفاوت است. شیب های بیشتر دارای شتاب افقی و عمودی کمتر هستند. به زبان ساده تر می توان گفت برای کشش اولیه یکسان در کابل T_0 ، شیب بیشتر دارای کشش عمودی بیشتر و کشش افقی کمتر در انتهای فوقانی است. هر چند برای الگوی بارگذاری مورد نظر، (بارگذاری عمودی درون صفحه ایی)، شیب کابل اثر چندانی بر مقدار کشش انتهای فوقانی کابل ندارد.



شکل ۴-۸۹: حداکثر پاسخ های کابل برای مقادیر مختلف زاویه (جابجایی در وسط کابل)



شکل ۴-۸۹b: حداکثر پاسخ های کابل برای مقادیر مختلف زاویه (شتاب در وسط کابل)



شکل ۴-۸۹c: حداکثر پاسخ های کابل برای مقادیر مختلف زاویه (کشش در انتهای کابل)

فصل پنجم

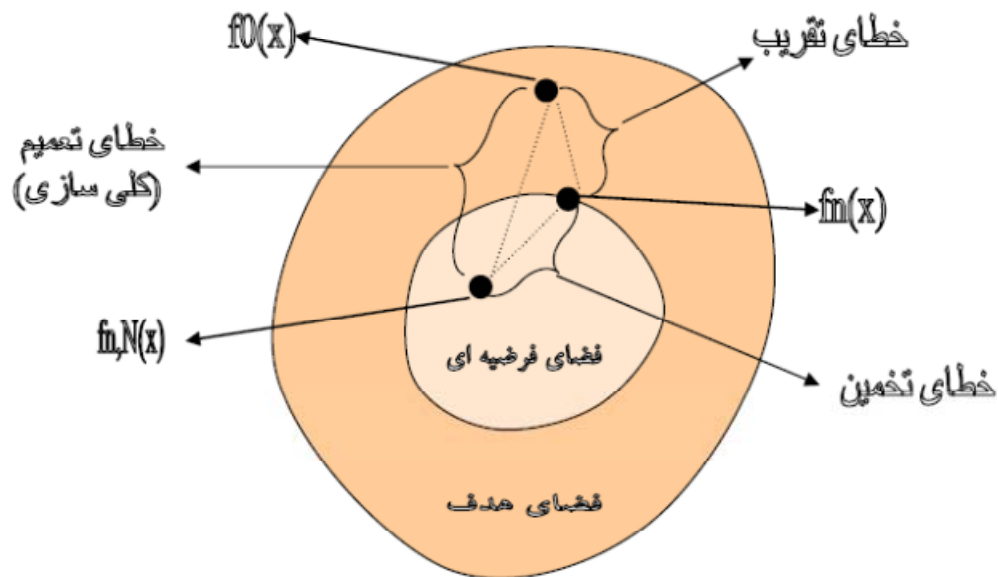
ماشین بردار پشتیبان

SVM

در امور مهندسی گاهی با مسائلی روبرو می شویم که به ناچار باید یک سری داده های تجربی پراکنده (داده هایی که از نتایج آزمایشات گوناگون بدست آمده‌اند) سر و کار داریم. در مدل کردن و استفاده از این داده های تجربی، یک فرآیند مقایسه ای بین داده‌ها انجام می گیرد و آنها را نسبت به تعداد کلاس‌هایی که در آنها قرار دارند جدا کرده (که در این پروژه بین دو کلاس داده می باشد نقاط امن و ناامن) سرانجام، کیفیت و کمیت مشاهدات ببر اجرای این مدل تجربی نظارت می‌کنند. تجربه ثابت کرده داده های بدست آمده محدود و نمونه وار می باشند و به طور کلی داده های بدست آمده، دارای الگویی غیر یکنواخت و تعداد ابعاد بالا می باشند و فقط درون فضای ورودی با توزیع پراکنده شکل می گیرند. دست یابی شبکه عصبی سنتی به تولید مدل هایی که بتوانند روی داده ها منطبق شود مشکلات زیادی را تحمل کرده است. ماشینهای بردار پشتیبان SVM روش موثری برای مدلسازی داده ها می باشد. با افزایش ابعاد مسئله و با استفاده از نگاشت کرنل یک چهارچوب کاری یکپارچه را برای اکثر مدلها فراهم می کنند و امکان مقایسه را بوجود می آورند.

۵-۲- تئوری یادگیری آماری

در این بخش به صورت اجمالی تئوری یادگیری آماری مورد بحث قرار می‌گیرد. شکل ۵-۱ را در نظر بگیرید.



شکل ۵-۱: خطای مدل سازی

خطای مدل سازی در مدل سازی هدف ما انتخاب صحیح مدلی است که در چارچوب فضای فرضیه ای باشد و رابطه نزدیکی با تابع در بر دارنده فضای هدف داشته باشد. خطایهای موجود ناشی از دو عامل اصلی می باشد.

خطای ناشی از تقریب زدن که پیامد کوچکتر بودن فضای فرضیه ای نسبت به فضای هدف می باشد به این صورت که تابع مربوطه ممکن است در خارج از فضای فرضیه تعریف شود. انتخاب نامناسب

فضای مدل می تواند موجب بروز یک خطای بزرگ تقریب شود و عدم تطابق در مدل را موجب شود که به این مدل مدل نامطابق گویند [۲۰].

خطای تخمین: خطایی است که در طول پروسه یادگیری رخ می دهد و در انتخاب تکنیک مناسب ما را دچار اشکال می کند و مدل متوجه از فضای فرضیه را غیر بهینه خواهد کرد. ولی می توان با انتخاب روش های بهینه از میزان این خطا کاست.

این خطاها (خطای ناشی از تقریب و تخمین) در ترکیب با یکدیگر خطای تعمیم (کلی سازی) را بوجود می آورند که در نهایت قصد ما بدست آوردن تابع F می باشد که میزان خطا را به حداقل برساند.

$$R[f] = \int_{x \times y} L(y, f(x)) P(x, y) dx dy \quad (1-5)$$

در این رابطه $p(x,y)$ برای ما شناخته شده نیست با توجه به اصل حداقل سازی خطای تجربی، یک میزان تقریبی را بدست می آوریم.

$$R_{emp}[f] = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l L(y^i, f(x^i)) \quad (2-5)$$

که این رابطه خطای تجربی را به حداقل می رساند و از طرفی:

$$\hat{f}_{n,l}(x) = \arg \min_{f \in H_n} R_{emp}[f] \quad (3-5)$$

حداقل سازی خطای تجربی به حد زیر مرتبط می شود:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} R_{emp}[f] = R[f] \quad (4-5)$$

که رابطه مذکور با توجه به قانون اعداد بزرگ معتبر است، با این حال رابطه زیر نیز باید برقرار باشد.

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \min_{f \in H_n} R_{emp}[f] = \min_{f \in H_n} R[f] \quad (5-5)$$

که در این رابطه زمانی صحیح و درست می باشد که H_n به قدر کافی کوچک باشد. این شرایط به

صورت شهودی و عینی وجود ندارد و نیازمند آن است مقدار مینیمم به صورت همگرا در آید.

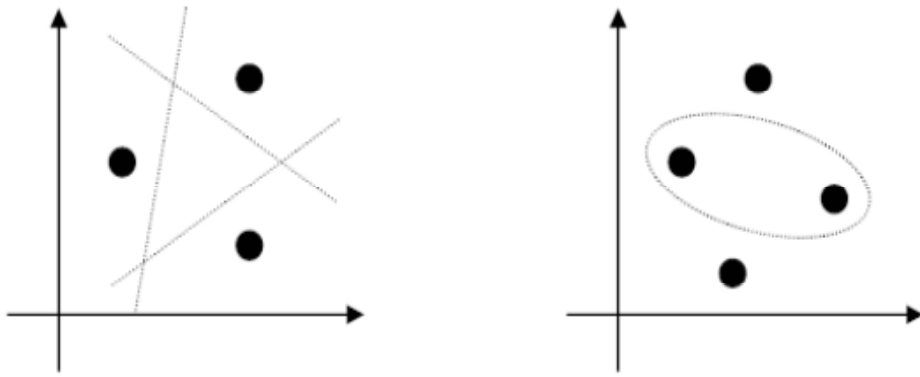
شرایط مرزی با احتمال $1-\delta$ برقرار می باشد.

$$R[f] \leq R_{emp}[f] + \sqrt{\frac{h \ln\left(\frac{2l}{h} + 1\right) - \ln\left(\frac{\delta}{4}\right)}{l}} \quad (6-5)$$

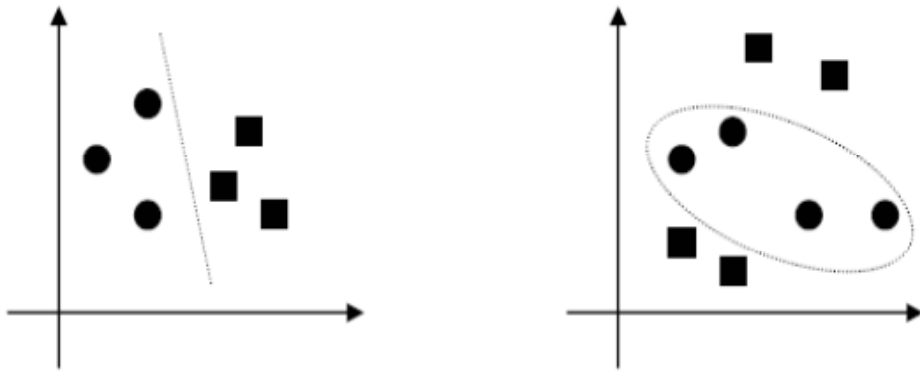
این رابطه برای خطا قابل پیش بینی، و مستقل از توزیع احتمالی خواهد بود.

۳-۵- بعد VC

بعد VC یک کمیت اسکالر است که ظرفیت مجموعه توابع را اندازه گیری می کند. (شکل ۲-۵)



(الف)



(ب)

شکل ۲-۵: بعد VC

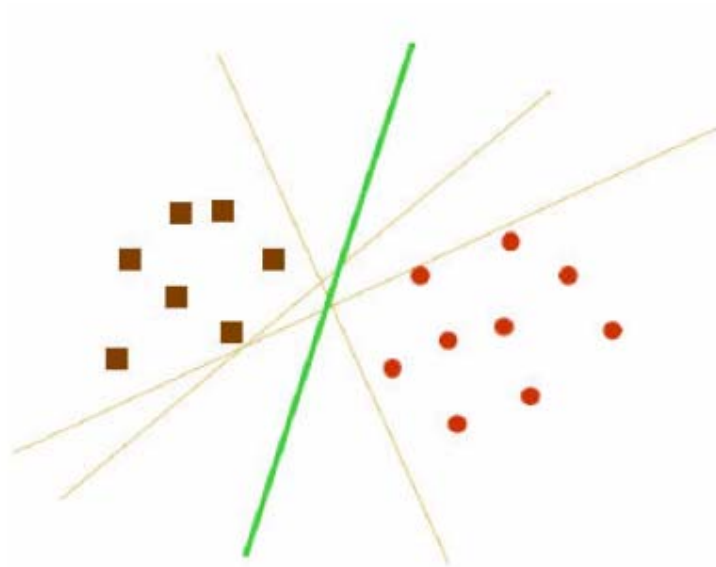
بعد VC مجموعه نقاط برابر p خواهد بود اگر و فقط اگر مجموعه ای از نقاطی مثل $\{x^i\}_{i=1}^q$ وجود داشته باشد چنان که این نقاط در کل آرایش های ممکن 2^p قابل جداسازی باشد و در حالتی که $q > p$ می باشد و خاصیت مورد نظر ارضا می گردد مجموعه $\{x^i\}_{i=1}^q$ وجود نداشته باشد.

شکل (۵-۲) الف نشان می دهد که چگونه سه نقطه در صفحه توسط مجموعه ای از توابع خطی قابل جداسازی می باشند (همواره می توان با یک خط یکی یا دو نقطه را از سایرین جدا کرد) ولی برای چهارنقطه این امکان وجود ندارد و با تابعی غیر خطی جدا شده اند. دو نقطه ای انتخابی را نمی توان توسط یک خط از سایرین جدا کرد. و در شکل (۵-۲) ب نیز مشاهده می کنید که در طرف راست این امکان نبوده و جداسازی توسط یک منحنی (تابع غیرخطی) انجام شده است [۲۱].

۵-۴- ابر صفحه جداساز

مسئله طبقه بندی (SCV) را می توان به مسئله طبقه بندی داده هایی که در دو کلاس مختلف قرار دارند (two class) محدود نماییم (از داده هایی که در سه کلاس یا بیشتر قرار دارند صرف نظر می کنیم) در این مسئله هدف جداسازی دو کلاس داده از یکدیگر می باشد که برای نیل به این هدف از تابعی استفاده می کنیم که از مثال های موجود بدست آمده است. هدف ما ایجاد یک معیار طبقه بندی می باشد که برای مثال های نامشهود به خوبی قابل استفاده باشد. و در عین حال به خوبی قابل تعمیم باشد. مثال شکل (۵-۳) را در نظر بگیرید. در این جا تعداد زیادی معیار طبقه بندی خطی وجود دارد که می تواند داده ها را جداسازی نماید ولی فقط یکی از آنها حاشیه را ماکزیمم می کند (فاصله بین

آن و نزدیکترین نقطه داده هر رده را ماکزیمم می کند) این طبقه بندی کننده خطی ابر صفحه (hyperplane) جداساز بهینه در نظر گرفته می شود. به صورت شهودی انتظار داریم مرز بدست آمده را بتوانیم به کل محدوده های ممکن تعمیم دهیم.



شکل ۵-۳: ابر صفحه جداساز

۵-۵- ابر صفحه جداساز بهینه

مسئله جداسازی مجموعه بردارهای آموزش دهنده را که متعلق به دو کلاس جداگانه هستند را در نظر بگیرید.

$$D = \{(x^1, y^1), \dots, (x^l, y^l)\}, x \in R^n, y \in \{-1, 1\} \quad (۷-۵)$$

که داریم:

$$\langle w, x \rangle + b = 0 \quad (8-5)$$

که در رابطه $\langle \rangle$ نشان دهنده ضرب داخلی است.

مجموعه بردارهایی که به صورت بهینه باید توسط ابر صفحه جداسازی شوند باید دارای کمترین میزان خطا باشند و از سویی فاصله بین نزدیکترین نقطه به ابر صفحه باید ماکزیمم شود. معادله (8-5) چندان مناسب به نظر نمی رسد، بدون اینکه بخواهیم کلیت مسئله را دستخوش تغییر نماییم بهتر است ابر صفحه ای مجاز را به کار ببریم که در آن w, b باید در رابطه زیر صدق کنند [22].

$$\min_i | \langle w, x^i \rangle + b | = 1 \quad (9-5)$$

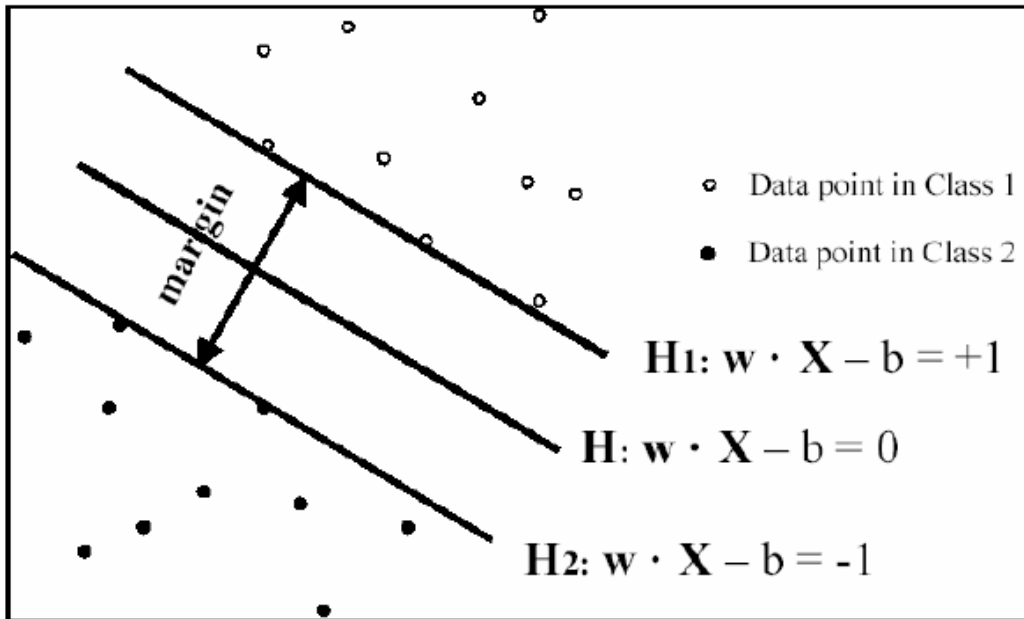
شرط ذکر شده بر روی پارامترها برای ساده سازی فرمولاسیون مسئله ضروری می باشد، در واقع به عبارت دیگر می توان گفت: فرم بردار وزنی باید برابر با معکوس فاصله وزنی بین نزدیکترین نقطه مجموعه داده ها نسبت به ابر صفحه باشد.

زمانی که گفته می شود یک مجموعه از نقاط به صورت بهینه بوسیله یک صفحه جدا کننده، جداسازی شده اند که:

۱- بدون اشتباه در گروههای مربوطه قرار بگیرند.

۲- فاصله بین نزدیکترین نقاط تا صفحه جداکننده بیشینه باشد.

پس پارامترهای w, b را طوری میابیم که شرط ۹-۵ ارضا شود. در شکل ۴-۵ مفهوم این رابطه نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: کمترین فاصله نقاط تا خط جدا کننده

که به w بردار وزن و به b بردار بایاس گویند.

یک ایر صفحه جداساز در حالت مجاز خود باید شرط زیر را محقق کند.

$$y^i [\langle w, x^i \rangle + b] \geq 1, \Rightarrow i = 1, \dots, l \quad (10-5)$$

فاصله $d(w, b, x)$ بین نقطه $(w, b), x$ برابر است با:

$$d(w, b; x) = \frac{|\langle w, x^i \rangle + b|}{\|w\|} \quad (11-5)$$

این صفحه توسط ماکزیمم حاشیه ρ داده می شود و در عین حال شروط معادله ۵-۱۰ باید رعایت

شود مرز مذکور توسط رابطه زیر محاسبه می شود: (۵-۱۲)

$$\begin{aligned} \rho(w, b) &= \min_{x^i: y^i = -1} d(w, b; x^i) + \min_{x^i: y^i = 1} d(w, b; x^i) \\ &= \min_{x^i: y^i = -1} \frac{|\langle w, x^i \rangle + b|}{\|w\|} + \min_{x^i: y^i = 1} \frac{|\langle w, x^i \rangle + b|}{\|w\|} \\ &= \frac{1}{\|w\|} \left(\min_{x^i: y^i = -1} |\langle w, x^i \rangle + b| + \min_{x^i: y^i = 1} |\langle w, x^i \rangle + b| \right) \\ &= \frac{2}{\|w\|}. \end{aligned}$$

بنابراین صفحه ابر صفحه که به صورت بهینه داده ها را از یکدیگر جدا می سازد باید مینیمم سازی زیر را انجام دهد.

$$\Phi(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (۵-۱۳)$$

این رابطه مستقل از b است چرا که معادله (۵-۱۰) (به صورت یک ابر صفحه جداساز) تحقق پیدا می کند و تغییر b باعث حرکت آن در جهت طبیعی به سوی خود می گردد. بنابراین مرز بدون تغییر باقی می ماند ولی ابر صفحه دیگر بهینه نخواهد بود و به یکی از دو رده نزدیکتر از دیگری خواهد بود. برای ملاحظه چگونگی حداقل سازی معادله (۵-۱۳) به صورتی که معادل با به کارگیری اصل

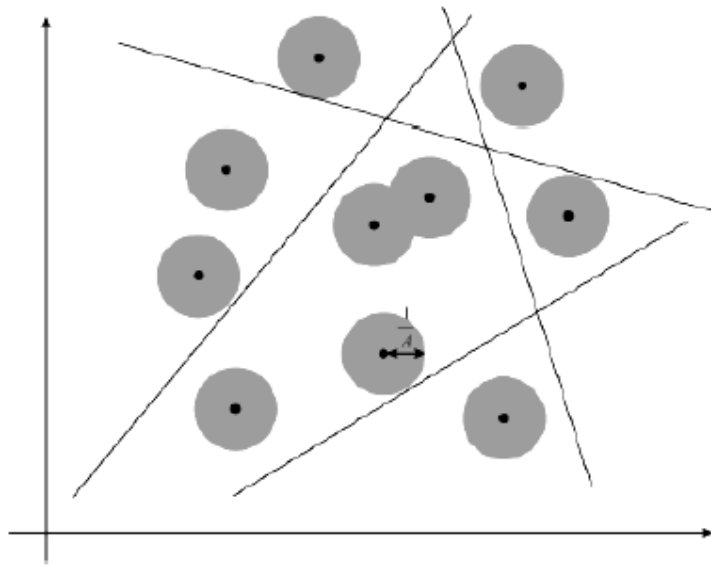
SRM باشد فرض کنید رابطه کراندار زیر برقرار است:

$$\|w\| < A \quad (14-5)$$

از معادله ۱۰-۵ و ۱۱-۵ داریم:

$$d(w, b; x) \geq \frac{1}{A} \quad (15-5)$$

بنابراین ابر صفحه‌ها نمی‌توانند نزدیکتر از فاصله $1/A$ به هر یک از نقاط داده باشند و در شکل (۵-۵) نیز می‌توان مشاهده نمود که در این صورت تعداد ابر صفحه‌های موجود کاهش می‌یابد و از این رو ظرفیت نیز کمتر خواهد شد [۲۶].



شکل ۵-۵: شرط برای صفحه‌های جداکننده

بعد VC برابر با n مجموعه ابر صفحه های مجاز، در فضای n بعدی به صورت زیر محدود می شود.

$$h \leq \min[R^2 A^2, n] + 1 \quad (۱۶-۵)$$

که در این رابطه R شعاع ابر صفحه شامل کل نقاط داده می باشد. از این رو می توان چنین استنباط نمود که به صورت مینم در آوردن معادله ۵-۱۳ معادل با مینم کردن کران بالای بعد VC می باشد. حل مسئله بهینه سازی معادله ۵-۱۳ با توجه به شروط معادله ۵-۱۰ با استفاده از نقاطه زینی تابع لاگرانژ به دست می آید.

$$\Phi(w, b; \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i (y^i [\langle w, x^i \rangle + b] - 1) \quad (۱۷-۵)$$

در رابطه فوق α ضرب کننده لاگرانژی می باشد. عامل لاگرانژی باید نسبت به متغیرهای w, b و صورت مینم و نسبت به $\alpha \geq 0$ به صورت ماکزیمم در آید. با استفاده از عامل لاگرانژ کلاسیک می توانیم مسئله اولیه مربوط به معادله ۵-۱۷ را به مسئله دوگانه آن تبدیل نماییم که حل آن آسانتر خواهد بود.

$$\max_{\alpha} W(\alpha) = \max_{\alpha} (\min_{w, b} \Phi(w, b, \alpha)) \quad (۱۸-۵)$$

مینم نسبت به w, b برای عامل لاگرانژی Φ به صورت روابط زیر خواهد بود.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \quad (19-5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial w} = 0 \Rightarrow w = \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i x_i \quad (20-5)$$

در این صورت معادله (17-5) و (18-5) و (19-5) ما را به مسئله دوگانه زیر رهنمون می سازد.

$$\max_{\alpha} W(\alpha) = \max_{\alpha} -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle + \sum_{k=1}^l \alpha_k \quad (21-5)$$

و حل این مسئله به صورت زیر خواهد بود.

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle - \sum_{k=1}^l \alpha_k \quad (22-5)$$

و در این راستا شروط زیر باید در نظر گرفته شود.

$$\alpha_i \geq 0 \Rightarrow i = 1, \dots, l \quad (23-5)$$

$$\sum_{j=1}^l \alpha_j y_j = 0$$

حل معادله (۲۲-۵) رعایت شروط معادله (۲۳-۵) ضرب کننده لاگرانژی را تعیین می کند و بار صفحه جداساز بهینه توسط رابطه زیر داده می شود:

$$w^* = \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i x_i \quad (24-5)$$

$$b^* = -\frac{1}{2} \langle w^*, x_r + x_s \rangle \quad (25-5)$$

در رابطه مذکور X_r, X_s بردارهای پشتیبان (support vector) مربوط به هر کلاس داده می باشند و:

$$\alpha_r, \alpha_s > 0 \Rightarrow y_r = -1, y_s = 1 \quad (26-5)$$

عامل طبقه بندی کننده سخت (hard classifier) به صورت زیر خواهد بود.

$$f(x) = \text{sgn}(\langle w^*, x \rangle + b) \quad (27-5)$$

به طور کلی یک عامل طبقه کننده نرم (soft classifier) میتواند برای درون یابی خطی مرزی مورد استفاده قرار گیرد.

$$f(x) = h(\langle w^*, x \rangle + b) \xrightarrow{\text{where}} h(z) = \begin{cases} -1 & z < -1 \\ z & -1 \leq z \leq 1 \\ +1 & z > 1 \end{cases} \quad (28-5)$$

این روش می تواند مناسب تر از طبقه بندی سخت باشد چرا که خروجی هایی با مقادیر حقیقی بین ۱- و ۱ ایجاد می کند.

$$\alpha_i (y^i [\langle w, x^i \rangle + b] - 1) = 0 \Rightarrow i = 1, \dots, l \quad (29-5)$$

و در نظر گرفتن این امر که فقط مقادیر X^i می توانند رابطه زیر با تحقق بخشند.

$$y^i [\langle w, x^i \rangle + b] = 1 \quad (30-5)$$

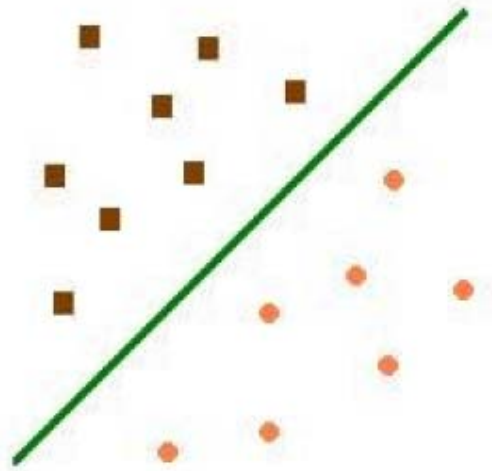
بردارهای پشتیبان (SVها) به نقاطی اطلاق می شوند که ضرائب لاگرانژ برای آنها غیر صفر است. اگر داده ها به صورت خطی قابل جداسازی باشند کل SV بر مبنای مرز خواهد بود و تعداد SV ها بسیار کم خواهد بود در نتیجه ابر صفحه توسط یک زیر مجموعه کوچک از مجموعه آموزشی (st trining) تعیین می شود. نقاط دیگر را می توان از مجموعه آموزشی خارج نمود و در صورتیکه ابر صفحه ها مجدداً محاسبه شوند باز هم جواب های یکسانی بدست خواهد آمد. از این رو می توان از svm برای خلاصه نمودن اطلاعاتی که در یک مجموعه داده دارد و توسط SV تولید شده است استفاده نمود. اگر داده ها به صورتی خطی تفکیک پذیر باشند تساوی زیر برقرار خواهد بود [۲۳].

$$\|w\|^2 = \sum_{i=1}^l \alpha_i = \sum_{i \in SVs} \alpha_i = \sum_{i \in SVs} \sum_{j \in SVs} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle \quad (31-5)$$

با توجه به معادله (۱۶-۵) بعد VC طبقه بندی کننده به صورت زیر کراندار خواهد بود.

$$h \leq \min[R^2 \sum_{i \in SVs}, n] + 1 \quad (32-5)$$

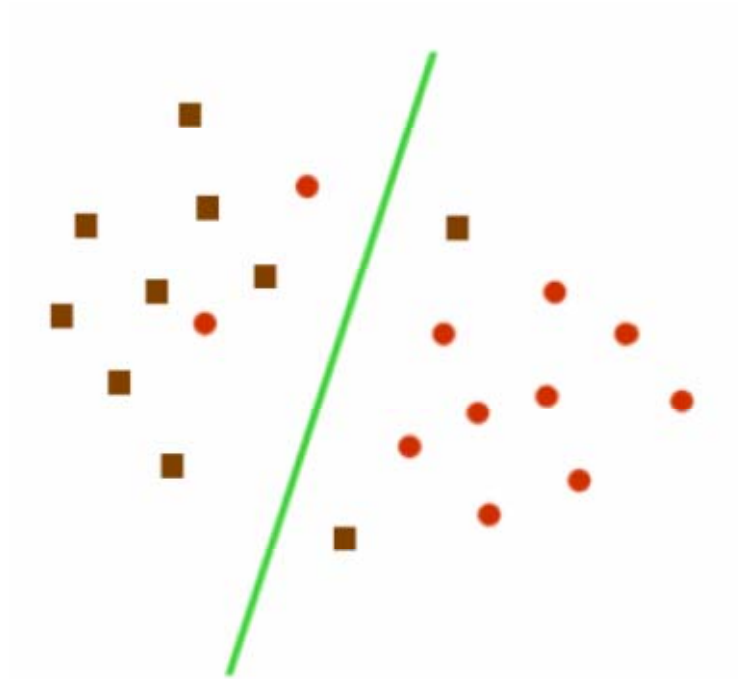
به یک سری نقاط اطلاعات در دو کلاس مختلف که توسط یک خط قابل جداسازی باشند تفکیک پذیر خطی گویند که ساده ترین حالت می باشد. در شکل ۳-۶ نمونه ای از این گونه نقاط را مشاهده می نمایید.



شکل ۵-۶: تفکیک پذیری خطی

۵-۶- ابر صفحه جداساز بهینه تعمیم یافته

تا کنون بحث ما به مواردی محدود شده است که داده های آموزشی به صورت خطی تفکیک پذیر و جداسازی می باشند، ولی این مسئله همیشه صادق نیست و ممکن است ما با داده هایی روبرو شویم که به صورت خطی قابل جداسازی نباشند که در مورد عمده‌ای از یک تابع پیچیده تر استفاده می شود تا کران موجود توصیف شود.



شکل ۵-۷: داده های تفکیک ناپذیر خطی

برای اینکه قادر باشیم از متد ابر صفحه جداساز بهینه استفاده کنیم و آنرا تعمیم دهیم متغیرهای غیر

منفی $\xi_i \geq 0$ و تابع جریمه را معرفی می کنیم.

$$F_{\sigma}(\xi) = \sum_i \xi_i^{\sigma} \Rightarrow \sigma > 0 \quad (5-33)$$

در این رابطه ξ_i میزان خطای طبقه بندی را نشان می دهد. مسئله بهینه سازی هم اکنون برای مینیمم

سازی خطای طبقه بندی به کار می رود و مینیمم سازی بعد VC معیار طبقه بندی کننده نیز درکنار آن

مورد توجه و اهمیت قرار دارد. شروط معادله (۵-۱۰) برای مورد جدا ناپذیر خطی به صورت زیر

اصلاح شده است:

$$y^i [\langle w, x^i \rangle + b] \geq 1 - \xi_i \Rightarrow i = 1, \dots, l \quad (34-5)$$

در رابطه فوق $\xi_i \geq 0$ برقرار می باشد.

ابر صفحه جداساز بهینه تعمیم یافته توسط بردار w تعیین می شود که تابع زیر را مینم می کند.

$$\Phi(w, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_i \xi_i \quad (35-5)$$

در رابطه فوق C مقدار داده شده و معین می باشد که با توجه به شروط معادله (34-5) تعیین می شود. حل مسئله بهینه سازی معادله (35-5) تحت شرایط معادله (34-5) توسط نقطه رزینی لاگرانژی داده می شود.

$$\Phi(w, b, \alpha, \xi, \beta) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_i \xi_i - \sum_{i=1}^l \alpha_i (y^i [w^T x^i + b] - 1 + \xi_i) - \sum_{j=1}^l \beta_j \xi_j \quad (36-5)$$

β, α ضرب کننده های لاگرانژی می باشند. عامل لاگرانژی باید نسبت به w, b و x مینم شود از سوی نسبت به متغیرهای β, α باید ماکزیم شود لاگرانژ کلاسیک دوگانه قادر است مسئله اولیه مربوط به معادله (36-5) را به مسئله دوگانه آن تبدیل کند. مسئله دوگانه آن توسط رابطه زیر داده می شود:

$$\max_{\alpha} W(\alpha, \beta) = \max_{\alpha, \beta} (\min_{w, b, \xi} \Phi(w, b, \alpha, \xi, \beta)) \quad (37-5)$$

مینم نسبت به w, b, ξ برای لاگرانژها Φ توسط روابط زیر داده می شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial b} = 0 &\Rightarrow \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial w} = 0 &\Rightarrow w = \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i x_i \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} = 0 &\Rightarrow \alpha_i + \beta_i = C \end{aligned} \quad (38-5)$$

با استفاده از معادلات (36-5) و (37-5) مسئله دوگانه به صورت زیر خواهد بود.

$$\max_{\alpha} W(\alpha) = \max_{\alpha} -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle + \sum_{k=1}^l \alpha_k \quad (39-5)$$

و از این رو حل مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle - \sum_{k=1}^l \alpha_k \quad (40-5)$$

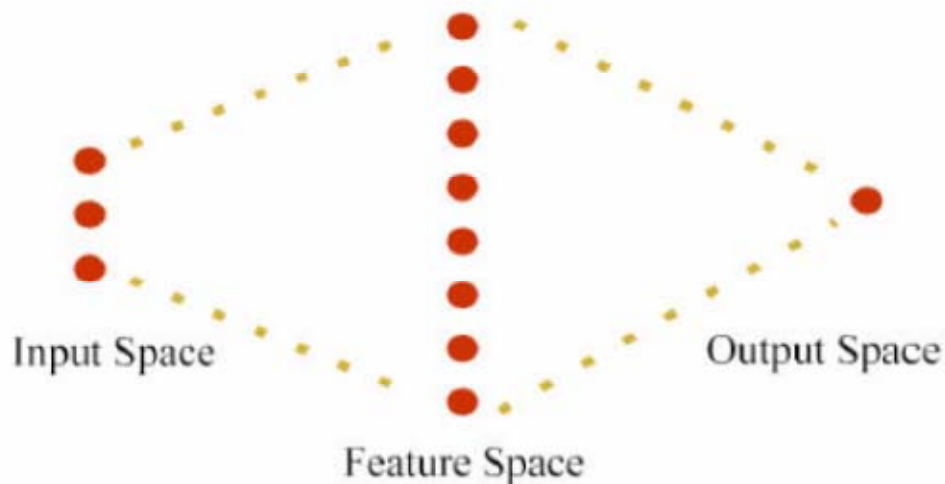
همچنین شروط زیر باید در نظر گرفته شود:

$$\begin{aligned} 0 \leq \alpha_i \leq C &\Rightarrow i = 1, \dots, l \\ \sum_{j=1}^l \alpha_j y_j &= 0 \end{aligned} \quad (41-5)$$

حل مسئله مینم سازی با مورد تفکیک پذیر کاملاً یکسان خواهد بود و تنها تفاوت این دو در اصلاح کرانهای ضرب کننده لاگرانژی می باشد. پارامتر C باید تعیین شود. این پارامتر قابلیت کنترل ظرفیت اضافی در طبقه بندی کننده را فراهم می کند که می تواند مستقیماً به پارامتر رگولاسیون مرتبط گردد.

۵-۷- تعمیم به فضای دارای ویژگی ابعادی بالا

در مواردی که کران خطی نامناسب باشد SVM می تواند بردار ورودی X را به فضای ویژگی ابعاد بالای Z مرتبط نماید. با انتخاب یک نگاشت غیرخطی اولیه، SVM یک ابر صفحه جداساز بهینه را در فضای دارای ابعاد بالاتر ایجاد می کند. (شکل ۵-۸)



شکل ۵-۸: نگاشت فضای ورودی به یک فضای مجازی با ابعاد بالاتر

تعدادی محدودیت برای نگاشت غیرخطی وجود دارد ولی خوشبختانه اکثر توابع را می توان مورد استفاده قرار داد.

از میان نگاشت های قابل قبول می توان به چند جمله ایها توابع پایه ای شعاعی و توابع حلقوی اشاره کرد مسئله مدل سازی معادله ۴۰-۵ به صورت زیر در می آید:

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j K \langle x_i, x_j \rangle - \sum_{k=1}^l \alpha_k \quad (42-5)$$

که در این رابطه $k(x, x')$ تابع کرنل می باشد که نگاشت غیر خطی به فضای ویژگی را انجام می دهد و شروط تغییر نمی کنند. یعنی:

$$\begin{aligned} 0 \leq \alpha_i \leq C &\Rightarrow i = 1, \dots, l \\ \sum_{j=1}^l \alpha_j y_j &= 0 \end{aligned} \quad (43-5)$$

حل معادله (۴۲-۵) با استفاده از محدودیت های معادله (۴۳-۵) ضرب کننده های لاگرانژی را تعیین می کند و عامل طبقه بندی کننده سخت از ابر صفحه جداساز بهینه در فضای ویژگی استفاده می کند که توسط رابطه زیر تحقق پیدا می کند.

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i \in SVs} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b\right) \quad (44-5)$$

و داریم:

$$\langle w^*, x \rangle = \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i K(x_i, x) \quad (45-5)$$

$$b^* = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i [K(x_i, x_r) + K(x_i, x_r)]$$

در اینجا بایاس با استفاده از دوبردار پشتیبان انجام می شود ولی می تواند از تمام SV های روی کناره استفاده کند تا پایداری مناسبی را بدست آورد.

اگر کرنل شامل یک عبارت بایاس باشد، بایاس می تواند با کرنل مطابق داده شود و عامل طبقه بندی کننده به صورت زیر در می آید:

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i \in SVs} \alpha_i K(x_i, x)\right) \quad (46-5)$$

تعدادی از کرنل های به کار رفته دارای عبارت بایاس می باشند و هر کرنل محدودی، می تواند طوری ساخته شود که دارای یک عبارت باشد. این امر باعث می شود با حذف شرایط معادله ۴۳-۵ مسئله بهینه سازی ساده تر شود.

۵-۸- بررسی اجمالی

توعاً داده‌ها در فضای ویژگی دارای ابعاد بالا، به صورت تفکیک پذیر خطی می‌باشند. شاید آزمودن و جداسازی داده‌ها چندان معقول نباشند، خصوصاً در وضعیتی که تعداد محدودی از داده‌ها در دسترس باشد و احتمال آسیب آنها توسط نویز نیز مصور باشد، از اینرو در عمل نیاز است تا از روش تفکیک ناپذیری استفاده شود که از کران بالای ضرب کننده‌های لاکرانژی در آن استفاده می‌شود. در اینجا این سؤال پیش می‌آید که پارامتر C را چگونه باید تعیین کرد. مشابه با مسئله رگولاسیون که باید ضرب رگولاسیون انجام شود، مقدار پارامتر C می‌تواند مستقیماًض برای کرنال‌های خاصی به پارامتر رگولاسیون مرتبط شود. یک پروسه بررسی اعتبار را می‌توان برای تعیین این پارامتر مورد استفاده قرار داد. البته متدهای کارآمدتر و بهتری نیز در این راستا ابداع شده است. در رفع الگوهای آموزشی که به صورت بردارهای پشتیبان نمی‌باشند، حل بدون تغییر می‌ماند و متد سریعی برای بررسی حالتی که بردارهای پشتیبان پراکنده می‌باشند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴].

۵-۹- توابع کرنل

موضوع این قسمت مربوط به روش‌های نگاشت از فضای اصلی به حوزه‌ای با ابعاد بالاتر به وسیله توابع کرنل گوناگون می‌باشد. استفاده از توابع کرنل باعث می‌شود به جای آنکه در حوزه ورودی‌ها کار کنیم به فضای دیگر منتقل شده و در آن فضای مجازی داده‌ها را دسته‌بندی کنیم. استفاده از تابع کرنل در حوزه ورودی معادل با ضرب داخلی در فضای مجازی است [۲۱].

$$K(x, x') = \langle \phi(x), \phi(x') \rangle \quad (47-5)$$

اگر K تابعی باشد که در شرایط Mercer صادق باشد یعنی شرایط زیر را برآورده کند:

$$K(x, x') = \sum_m^{\infty} a_m \phi_m(x) \phi_m(x') \Rightarrow a_m \geq 0 \quad (48-5)$$

$$\iint K(x, x') g(x) g(x') dx dx' > 0 \Rightarrow g \in L_2 \quad (49-5)$$

آنگاه کرنل، یک ضرب داخلی درست را در فضای مجازی نشان می دهد. توابعی که شرایط Mercer را ارضا می کنند در زیر آمده اند.

۵-۹-۱- کرنل خطی (liner)

ساده ترین نوع تابع کرنل می باشد که به صورت زیر نمایش داده می شود.

$$K(x, x') = \langle x, x' \rangle \quad (50-5)$$

۵-۹-۲- Polynomial

کرنل غیرخطی polynomial یک کرنل مورد توجه برای مدل های غیرخطی می باشد.

$$K(x, x') = \langle x, x' \rangle^d \quad (51-5)$$

$$K(x, x') = (\gamma \langle x, x' \rangle + b)^d \quad (52-5)$$

که کرنل دوم (۵۲-۵) پر استفاده تر می باشند.

۵-۹-۳ (rbf) Gaussian Radial Basis Function

توابع radial basis اکنون اهمیت زیادی پیدا کرده اند و بیشتر به صورت گاوسی بکار می روند:

$$K(x, x') = \exp\left(-\frac{\|x - x'\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (۵۳-۵)$$

۵-۹-۴ Exponential Radial Basis Function

این تابع به صورت روبرو در نظر بگیرید:

$$K(x, x') = \exp\left(-\frac{\|x - x'\|}{2\sigma^2}\right) \quad (۵۴-۵)$$

این تابع یک خط خطی تکه‌ای را به دست می آورد که در زمانی که میزان ناپیوستگی‌ها قابل قبول باشد، می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۵-۹-۵ Multi – Layer Perception

MLP شناخته شده دارای یک تک لایه مخفی دارای یک نمایش کرنل معتبر می باشد که به صورت

زیر می باشد:

$$K(x, x') = \tanh(\rho \langle x, x' \rangle + \delta) \quad (۵۵-۵)$$

۵-۹-۶- سریهای فوریه

یک سری فوریه را می توان برای بسط فضای ویژگی $2m+1$ بعدی بکار برد. کرنل در بازه

تعریف می شود. $\left[\frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$

$$K(x, x') = \frac{\sin(N + \frac{1}{2})(x - x')}{\sin(\frac{1}{2}(x - x'))} \quad (56-5)$$

با این وجود کرنل نمی تواند انتخاب خوبی باشد چرا که ظرفیت رگولاسیون آن ضعیف است و این مسئله از تبدیل فوریه مربوط به آن نیز قابل تشخیص است.

۵-۹-۷- چند جمله ایها (SPLINE)

چند جمله ایها بدلیل انعطاف پذیری خاصی که دارند از گزینه های مورد توجه می باشند. یک چند جمله متناهی دارای مرتبه k قرار گرفته و در مکان τ_s توسط این رابطه داده می شود:

$$K(x, x') = \sum_{r=0}^k x^r x'^r + \sum_{s=1}^N (x - \tau_s)^k + (x' - \tau_s)^k \quad (57-5)$$

یک چند جمله ای نامتناهی در بازه $[0, \infty)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$K(x, x') = \sum_{r=0}^k x^r x'^r + \int_0^1 (x - \tau_s)^k + (x' - \tau_s)^k + d\tau \quad (58-5)$$

در حالتی که $k=1$ کرنل توسط رابطه زیر داده می شود:

$$K(x, x') = 1 + \langle x, x' \rangle + \frac{1}{2} \langle x, x' \rangle \min(x, x') - \frac{1}{6} \min(x, x')^3 \quad (59-5)$$

۵-۹-۸- چند جمله ایها (Bsplines)B

این نوع از چند جمله ایها نوع دیگری از فرمول بندی چند جمله ایها هستند که مورد استفاده قرار می

گیرند کرنل در باره [۱-۱] تعریف می شود و به صورت زیر می باشد:

$$K(x, x') = B_{2N+1}(x - x') \quad (60-5)$$

۵-۹-۹- کرنلهای جمع پذیر

با جمع کرنلها با یکدیگر می توان کرنلهای پیچیده تری را بدست آورد. این حقیقت از آنجا ناشی می

شود که جمع دو تابع معین مثبت به صورت زیر معین و مثبت خواهد بود

$$K(x, x') = \sum_i K_i(x, x') \quad (61-5)$$

۵-۹-۱۰- کرنلهای چند بعدی

کرنلهای چند بعدی می توانند با استفاده از حاصل *tersor* به صورت زیر بدست می آیند.

$$K(x, x') = \prod_i K_i(x_i, x'_i) \quad (۶۲-۵)$$

این روش برای استفاده در ساختار کرنلهای کثیرالجمله چندبعدی سودمند می باشد و از حاصلضرب کرنلهای نامتغیر بدست می آید.

۵-۱۰- سنجش عملکرد

عملکرد یک عامل طبقه بندی کننده با استفاده از شاخصه های حساسیت، دقت و ویژگی ذکر شده سنجیده می شود.

$$sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۶۳-۵)$$

$$specificity = \frac{TN}{TN + FP}$$

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

در روابط مذکور

TP تعداد موارد طبقه بندی مثبت صحیح (ماشین یادگیری به درستی طبقه بندی می کند)

TN تعداد موارد طبقه بندی منفی صحیح (ماشین یادگیری به درستی طبقه بندی می کند)

FP تعداد مواد طبقه بندی شده مثبت نادرست (ماشین یادگیری مورد را تحت عنوان مثبت نامگذاری

ی کند در حالیکه مورد مربوط منفی باشد)

FN تعداد مواد طبقه بندی شده منفی نادرست (ماشین یادگیری مورد را تحت عنوان مثبت

نامگذاری ی کند در حالیکه مورد مربوط مثبت باشد)

در ارزیابی حساسیت درصد حالات عملکردی طبقه بندی شده صحیح را نشان می دهد و میزان ذکر

شده از قبل درصد حالات معیوب دارای طبقه بندی صحیح را نشان می دهد.

برای بدست آوردن مقادیر مذکور می توان به شکل دستی و خیلی راحت با توجه به شکل عملکرد

بنابراین از آوردن این محاسبات در نظر افزار صرف نظر شده است. که گزینه ها از بالا به ترتیب

حساسیت ، نرخ داده های اشتباه دقت می باشند.

۵-۱۱- انتخاب کرنل مناسب

سئوالی که در اینجا مطرح می شود این است که با وجود ترکیب های گوناگون برای یک مسئله

خاص کدامیک از توابع کرنل می تواند مناسبتر باشد البته این سوال جدیدی نیست کران بالای بعدی

VC در معادله ۵-۱۶ می تواند ابزار مناسبی برای مقایسه کرنالها باشد. یا این وجود این روش نیازمند

تخمین شعاع ابر کره هایی دارد که شامل داده ها در یک فضای ویژگی غیرخطی دارد. در نگاه کلی

حتی اگر یک متد تئوری برای انتخاب کرنل به خوبی توسعه داده شود، تا زمانی که بر روی تعداد زیادی از مسائل مورد آزمایش قرار نگیرد نمی توان به صحت کامل آن اطمینان داشت. بنابراین انتخاب کرنل به صورت دستی و دلخواه انجام می گیرد و اگر نقاطی با یک کرنل قابل جداسازی نبودند می بایست این کار تا زمان جداسازی درست با سایر کرنل ها انجام داد.

۵-۱۲- مقایسه بین شبکه های عصبی مصنوعی و SVM

اساس شناسایی تجربی یک سیستم بر مبنای مشاهدات محدود و تحلیل هائی روی نمونه های انتخاب شده می باشد چون تمام اتفاقات ممکن و نتایج آنها را نمی دانیم پس فضای ورودی ها به طور کامل شناخته شده نیست. پس نمونه برداری در فضای توزیعی ناهمگون دارد و این یکی از ضعف های بزرگ برای مدل های پیشنهادی در پیش بینی واقعیت می باشد.

مشکل شبکه های عصبی که سابقاً استفاده می شدند این بود که نمی توانستند یک مدل جامع برای سیستم بدست آوردند. این مشکل ناشی از الگوریتم بهینه سازی بود که برای انتخاب پارامترهای استفاده می شد. هم چنین معیارهای آماری که برای مقایسه چند مدل و انتخاب بهترین آنها به کار می رفت در ایجاد مشکل بی تاثیر نبود.

در حقیقت SVM توسیعی از مفهوم شبکه عصبی است که صرفاً به کم بودن خطای کل مدل در پیش بینی نتایج توجه دارد نه به اینکه سعی کند در هر مرحله خطای مربوط به همان مرحله را کمینه کند. SRM حد بالایی برای مجموع این خطاها می یابد و سپس آن را کمینه می کند بر خلاف ERM که

تلاش می کند میزان خطاهای جزئی در اطلاعاتی که شبکه را آموزش می دهد در هر مرحله کم کند همین اختلاف باعث می شود که svm دارای قابلیت های بیشتری باشد.

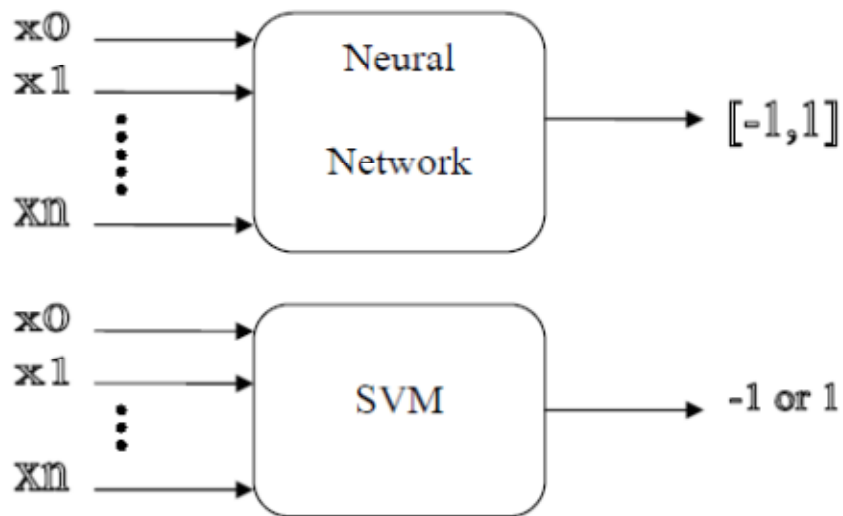
Svm در ابتدا برای حل مسائل دسته بندی (SVC) کاربرد داشت ولی امروزه برای حل مسائل رگرسیون نیز کاربرد دارد (SVR)

لازم به ذکر است که در پایان خاطر نشان شویم که تفاوت عمده دیگری که بین svm و شبکه های عصبی وجود دارد آن است که در svm د و حالت بیشتر برای پیش بینی وجود ندارد.

به عنوان مثال در کاربرد svm در ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم قدرت پیش بینی حالت سیستم یا امن است یا ناامن است (عدد ۱ موقعیت امن و ۰- موقعیت ناامن) بنابراین در پیش بینی های svm تکلیف ما بهتر روشن می شود که یا شبکه ما در حالت امن کار می کند یا حالت ناامن.

ولی در شبکه های عصبی دامنه پیش بینی ها گسترده می باشد و ممکن است حالات مختلفی که سیستم در حال کار می باشد بسته به نوع ورودی متفاوت باشد مثلاً ممکن است با پیشگویی شبکه عصبی موقعیت سیستم ۰/۷۵ یا ۰/۵ یا باشد. پس تصمیم گیری در استفاده از شبکه های عصبی مشکل تر می شود.

در واقع می توان اینگونه برداشت کرد که در شبکه های عصبی به ازای یک تابع تبدیل و به ازای ورودی های متفاوت خروجی های پیوسته ای بین ۱ و -۱ بدست می آید ولی در svm ها به ازای رودیهای متفاوت فقط دو حالت برای خروجی ما اتفاق می افتد. (یا امن یا ناامن) در شکل ۵-۹ تفاوت بین شبکه عصبی svm به صورت نمادین نشان داده شده است.



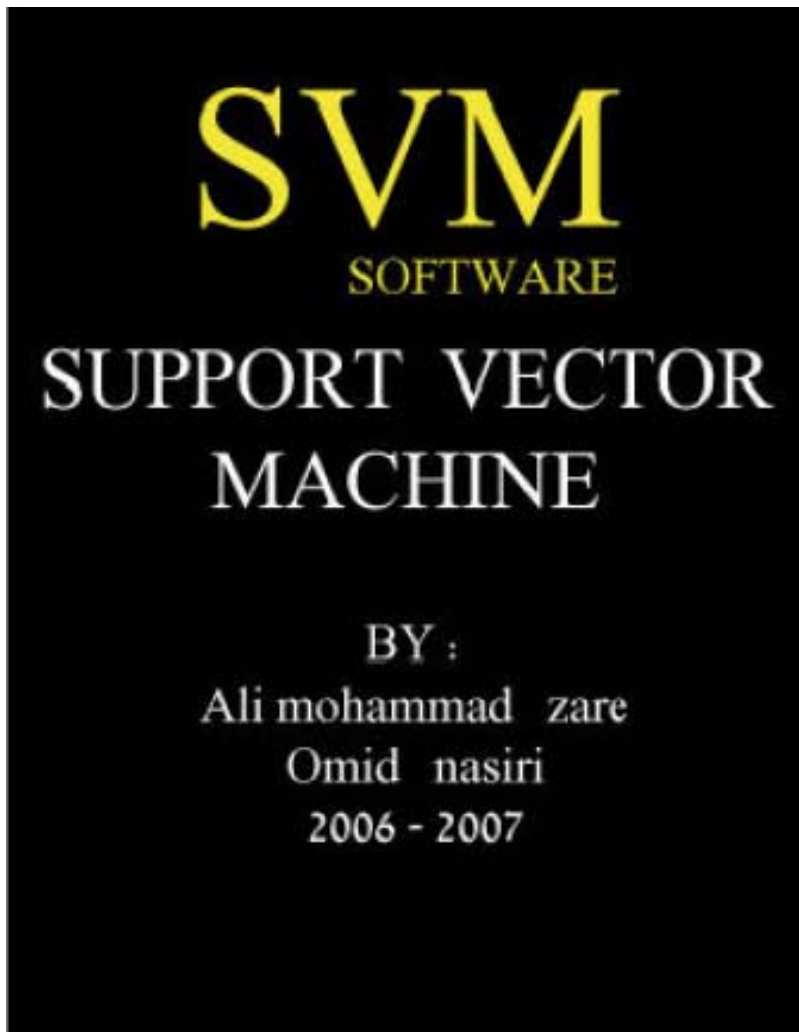
شکل ۵-۹: تفاوت بین شبکه عصبی و svm

فصل ششم

نرم افزار SVM

۱-۶- نرم افزار svm

این نرم افزار به زبان matlab نوشته شده است و لذا برای اجرای آن نیاز به محیط matlab با ورژن ۷ یا بالاتر است. برای اجرای این نرم افزار مسیر matlab را به جایی که فایل های این نرم افزار در آنجا قرار دارد تنظیم کرده و کلمه svm را تایپ کرده که با این کار نرم افزار اجرا می شود [۲۶].



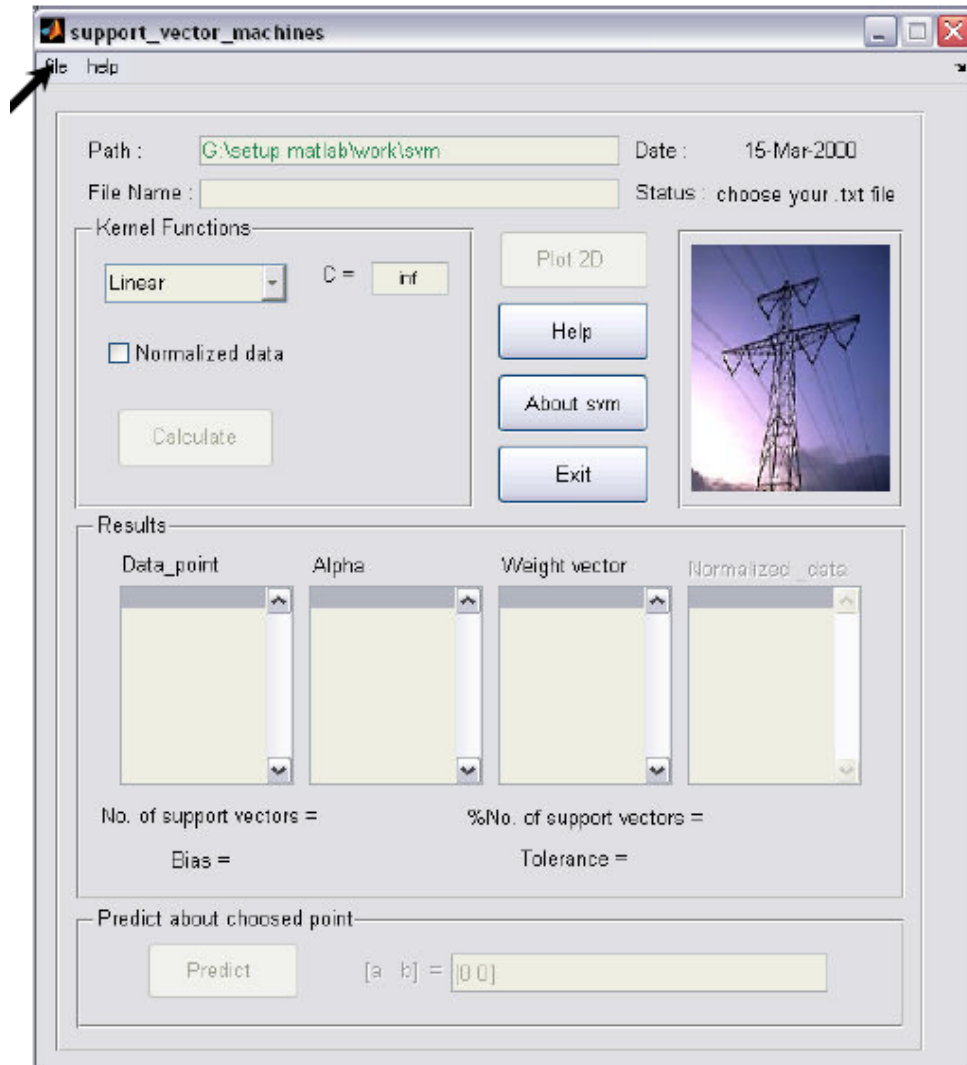
شکل ۱-۶: نرم افزار svm

در این پژوهش از روش **svm** جهت بررسی رفتار دینامیکی دکل های مهاری استفاده می شود بدین صورت که توسط آزمایشات و تجربیات نقاط اطلاعاتی (نقاط امن یا نامن) از رفتار دینامیکی دکل ها بدست می آوریم.

۲-۶- خصوصیات نرم افزار **svm** [۲۰]

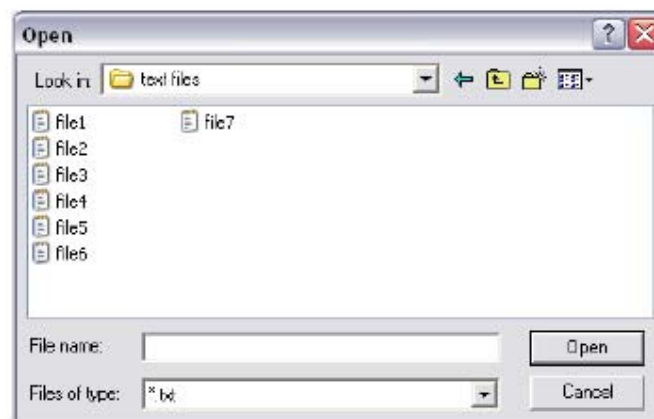
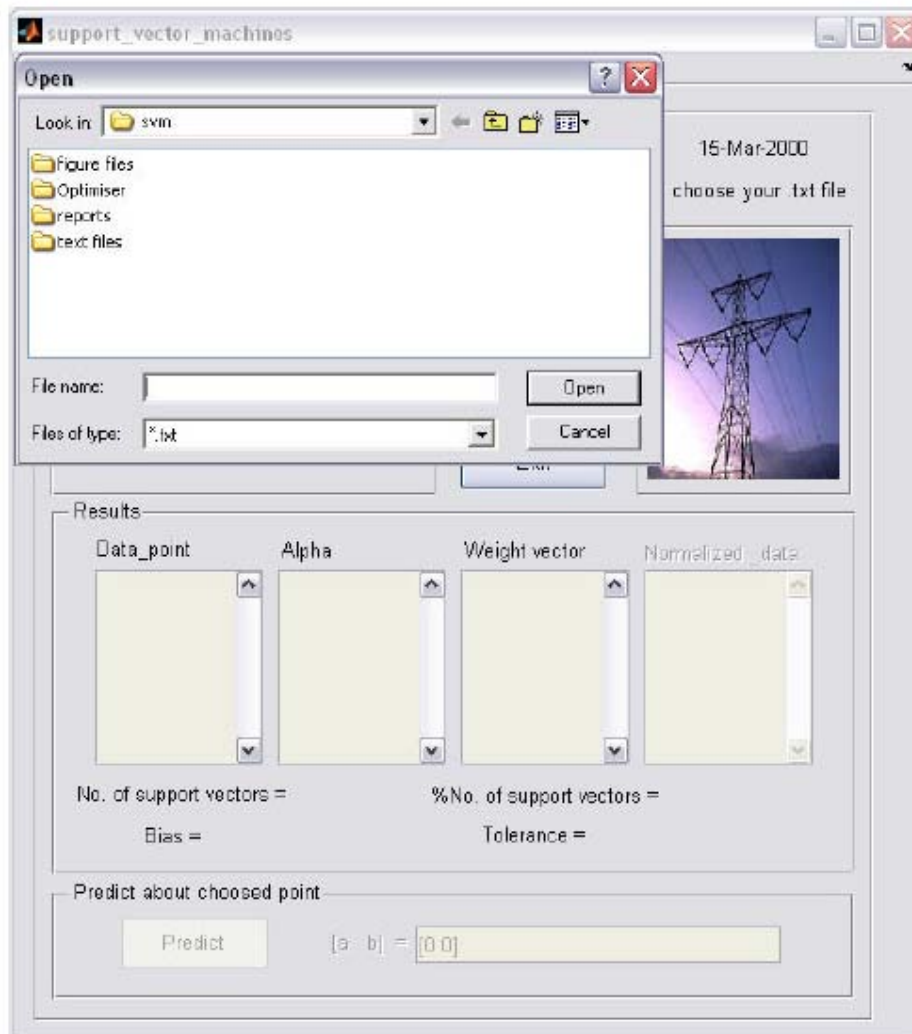
از جمله خصوصیات این نرم افزار در زیر آمده است:

- ۱- دارا بودن از محیط گرافیکی و زیبایی ظاهری
- ۲- تعریف ده تابع کرنل خطی و غیرخطی
- ۳- فراخوانی اطلاعات از یک فایل متنی
- ۴- قابلیت نمایش گزارش متنی بعد از هر عملیات
- ۵- دارای بودن فایل **help** در حین انجام کار، به زبان انگلیسی
- ۶- قابلیت ذخیره سازی نمودارها پس از هر عملیات
- ۷- قابلیت پیش گویی در مورد یک نقطه انتخابی
- ۸- نرمالیزه کردم داده ها در صورت لزوم و نمایش داده های نرمال شده



شکل ۶-۲: نمای svm

برای آشنایی با طرز کار این نرم افزار مراحل انجام یک پروسه ساده را شرح می دهیم. ابتدا باید فایل مورد نظرم را که می خواهیم شبکه مان را با آن آموزش دهیم انتخاب کرده برای جستجوی فایل متنی مورد نظر به روی فایل و سپس **load text file** رفته که با انجام کار پنجره‌ی شکل (۶-۳) ظاهر می شود.



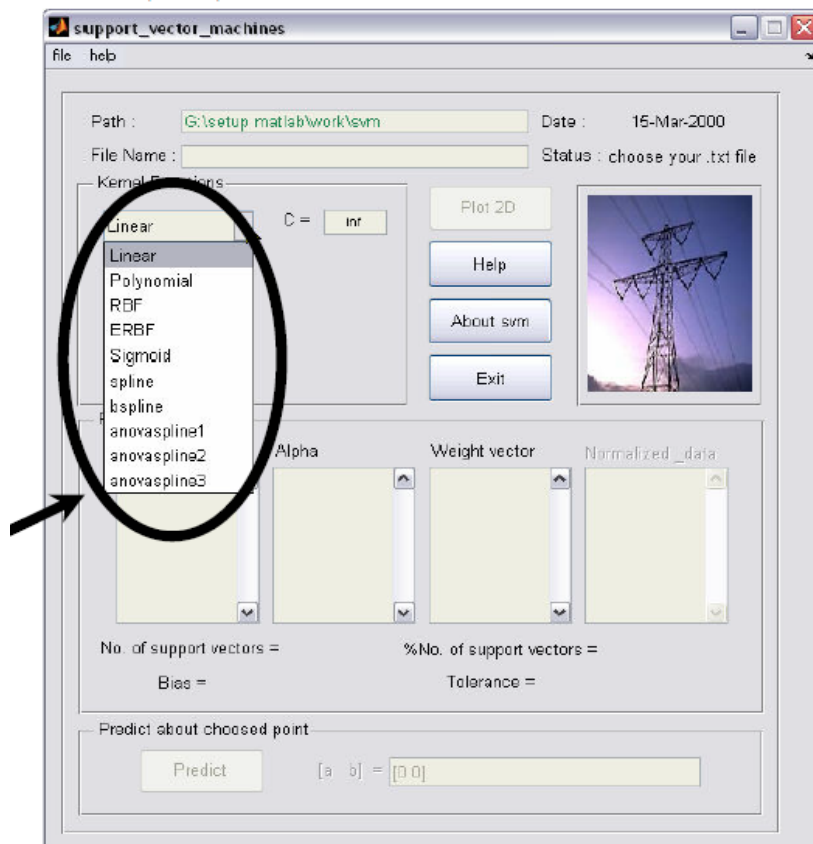
شکل ۶-۳: جستجو برای فایل متنی

در این قسمت فایل مورد نظرمان را انتخاب کرده، همان طور که رد فصل بعد خواهید دید این فایل شامل نقاط اطلاعاتی است که در قالب فایل متنی ذخیره سازی شده است و باید به ترتیبی که در شکل (۴-۶) مشاهده می کنید ذخیره شود.

1	4	1
4	1	-1
2	5	1
5	2	-1
3	6	1
6	3	-1

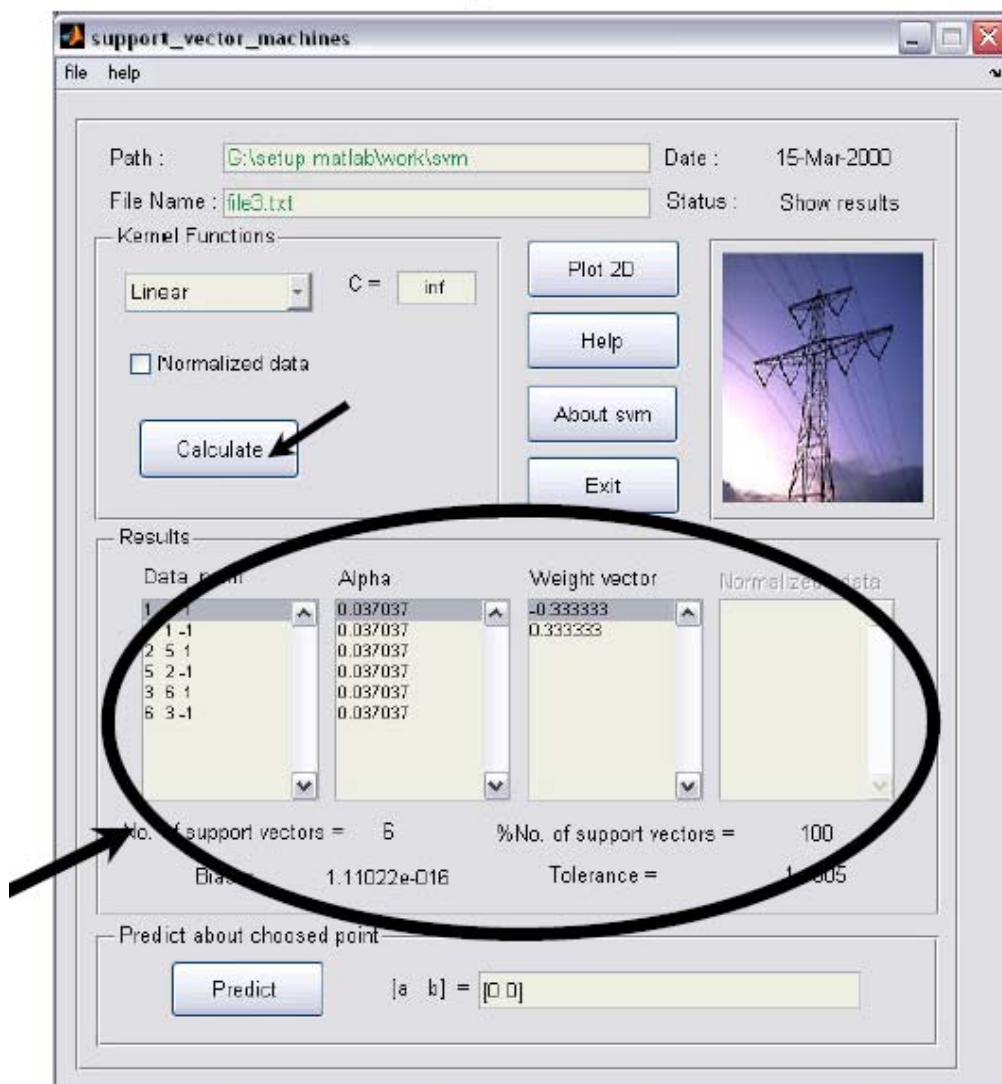
شکل ۶-۴: طریقه نوشتن نقاط اطلاعات

در قسمت kernel function این امکان به ما داده می شود که از بین ده تابع کرنل موجود تابع کرنل مورد نظر را انتخاب کرده و پارامترهای آنها را به مقدار دلخواه تنظیم نمائیم.



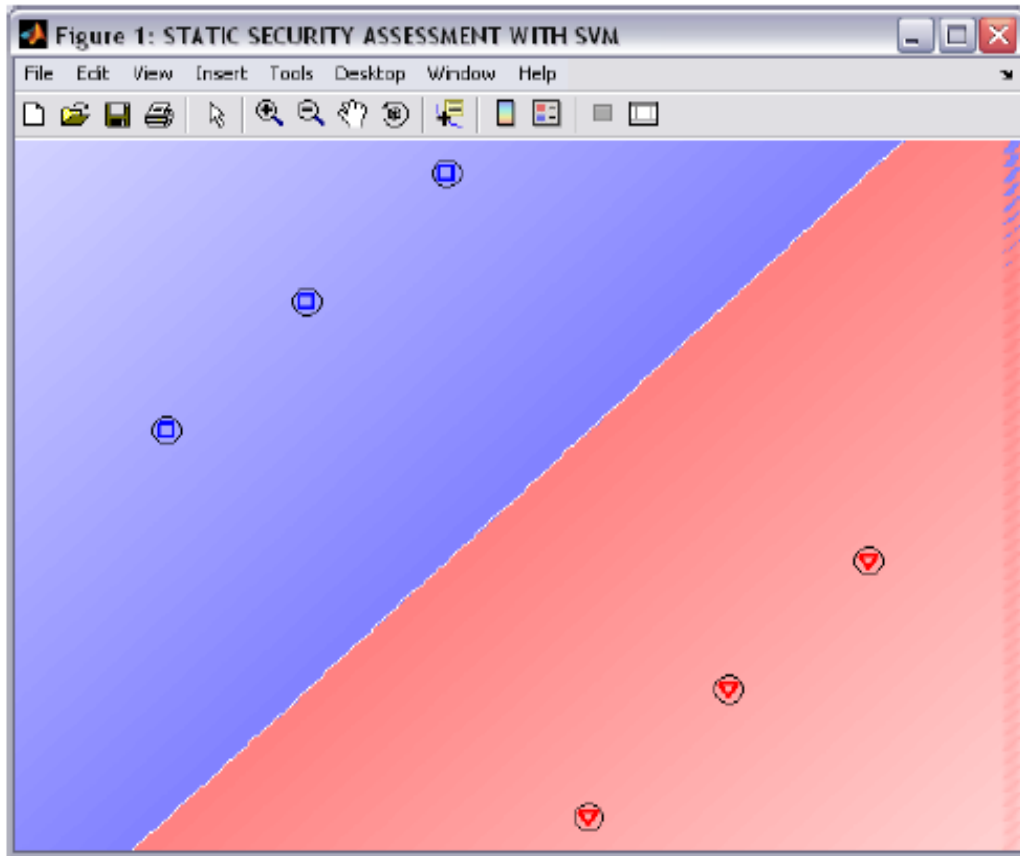
شکل ۶-۵: توابع کرنل

برای این مثال ما سه تابع کرنل انتخاب می‌نمائیم و نتایج را مقایسه می‌کنیم. برای شروع تابع کرنل **liners** را انتخاب می‌کنیم. با فشردن دکمه **Calculate** محاسبات بر اساس تابع کرنل انتخاب شده انجام می‌شود و مقادیر، تعداد **SV** ها و درصد آنها و مقدار خطا و بایاس اولیه و ... روی صفحه نرم افزار ظاهر می‌گردند. همچنین گزارشی از تمام مراحل کار روی پنجره **command window** ظاهر می‌شود که می‌توان از آن کپی گرفته و در یک فایل متنی ذخیره کرد.



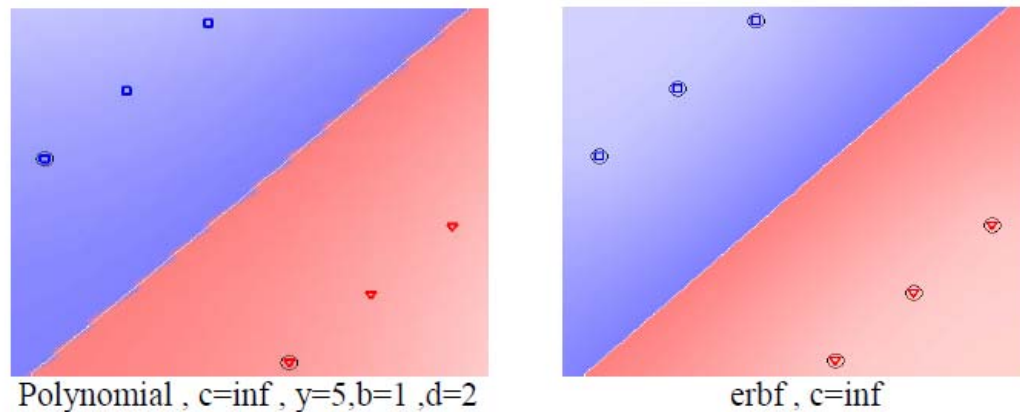
شکل ۶-۶: محاسبات در svm

با فشردن دکمه ۲D plot نمودار دو بعدی ظاهر می شود.



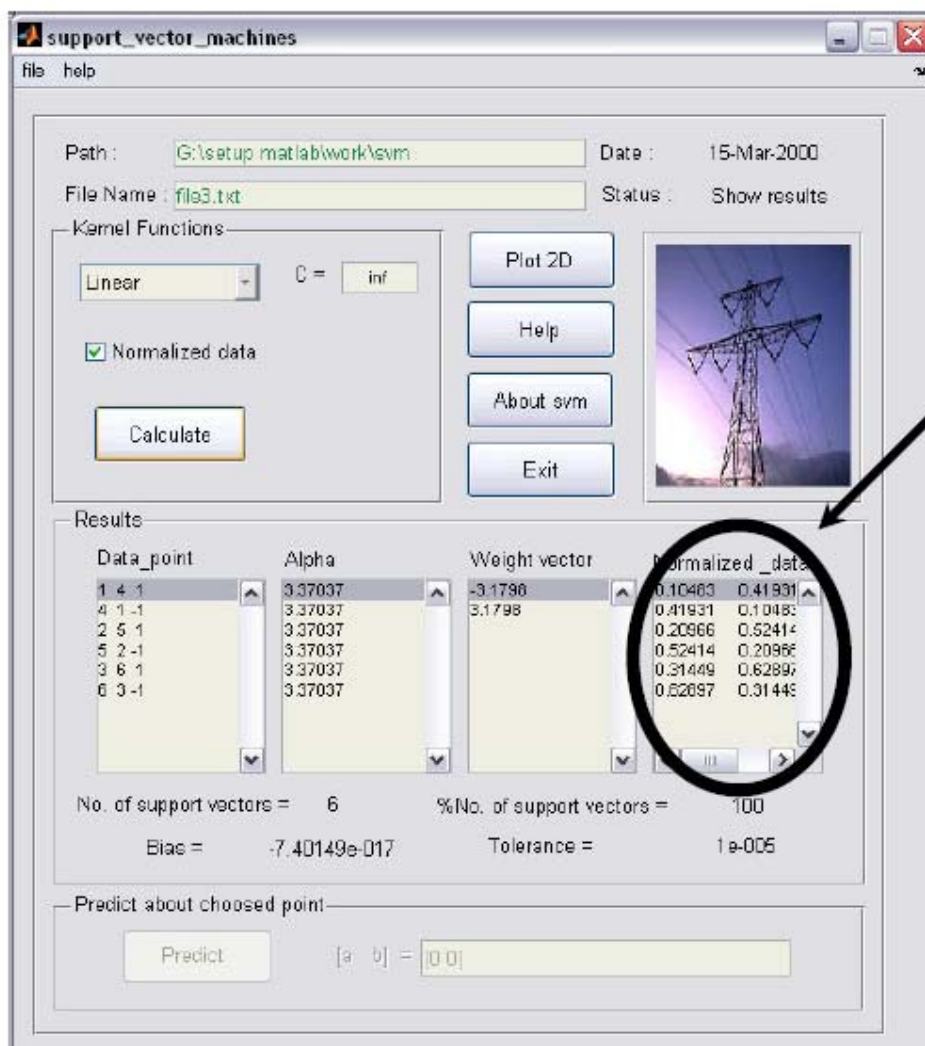
شکل ۶-۷: نمودار دو بعدی $c=\text{inf}$, liner

همانطور که مشاهده می کنید عمل جداسازی با موفقیت انجام شده و نقاط اطلاعات در دو کلاس امن و ناامن طبقه بندی شده اند نقاطی را که به دور آنها دایره ای سیاه رنگی قرار دارد SV ها می باشد که در این مثال تمامی نقاط SV می باشند و همانطور که مشاهده شد تعداد سر SV برابر ۶ درصد آن نیز ۱۰۰٪ می باشد.



شکل ۶-۸: جداسازی توسط تابع کرنل

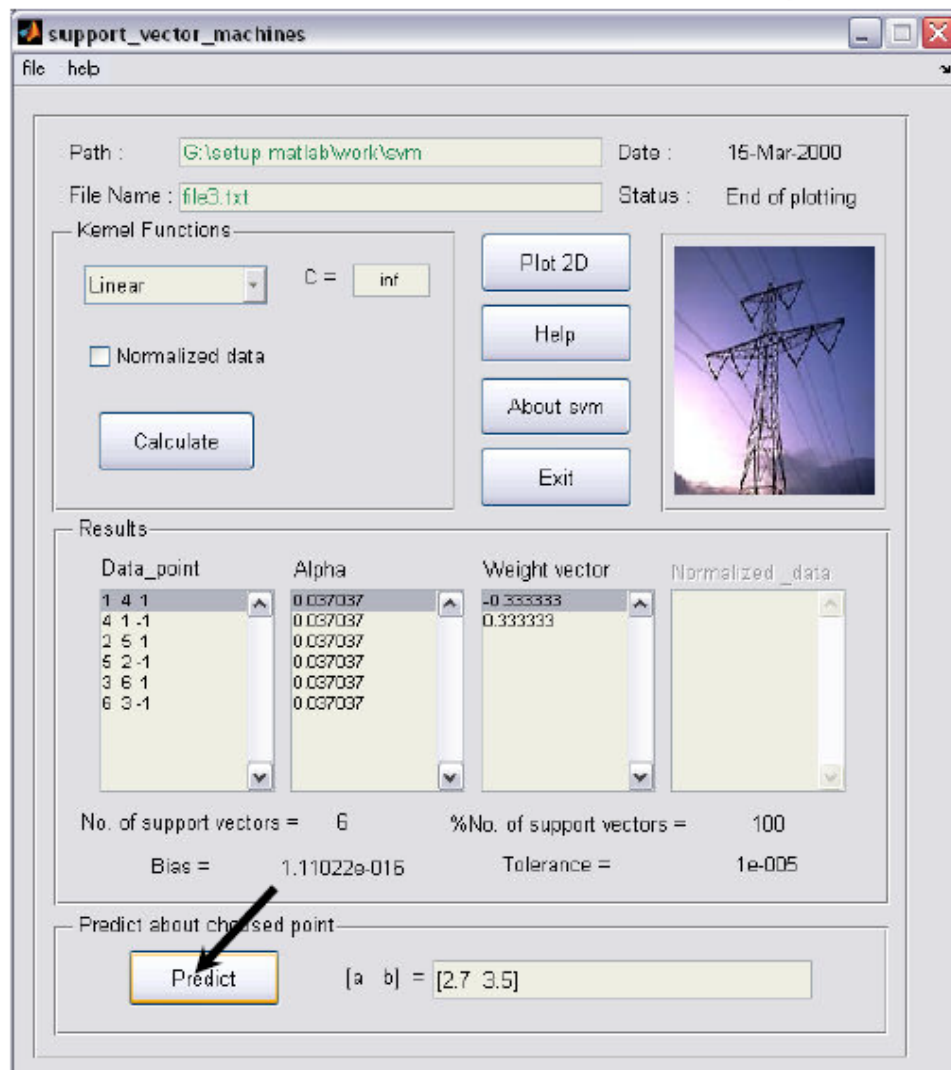
نرم افزار svm این امکان را برای کاربر فراهم می نماید که در صورت لزوم داده های خود را نرمالیزه کرده، نرمالیزه کردن داده ها باعث می شود که داده ها در بازه (۱-۱) مرتب شوند که این امر مزایایی دارد برای نرمالیزه کردن داده ها قبل از آزمایش باید گزینه **Normalized data** تیک بزینیم. داده های نرمال شده در کادر **Normalized data** ظاهر می شوند دو در حالتی که ما از روش نرمال کردن داده ها استفاده می نمائیم دیگر در مورد نقطه انتخابی نمی توانیم استفاده کنیم بنابراین قسمت مربوط به پیش گوئی غیر فعال شده است، زیرا نرمال کردن اطلاعات بر اساس تعداد مشخص سطر و ستون ماتریس داده ها انجام می شود اضافه کردن نقطه جدید باعث بوجود آمدن خطا در کل داده ها می شود و همچنین اگر تصمیم به نرمال کردن نقطه به تنهایی بگیریم باز چون سایر نقاط در نرمال کردن نقشی ایفا نمی کنند باز هم بی فایده است. در رابطه با این موضوع راهکاری به ذهنمان نرسید و میتواند موضوعی برای تحقق بیشتر باشد. در شکل زیر داده های نرمال شده **file۳** را می بیند.



شکل ۶-۹: نرمالیزه کرده داده ها

نرمالیزه کردن داده ها برای کرنل هایی که دارای قلمرو محدود می باشند ضروری می باشد و از سودی می تواند برای کرنل های نامحدود نیز مفید باشد. برای تشخیص ضروری بودن نرمالیزه سازی باید خواص ورودی را مورد بررسی قرار داد. در ضمن نرمالیزه سازی عدد شرطی ماتریس Hessian را در مسئله بهینه سازی بهبود می بخشد(در مورد ماتریس Hessian در این پژوهش بحث نمی کنیم).

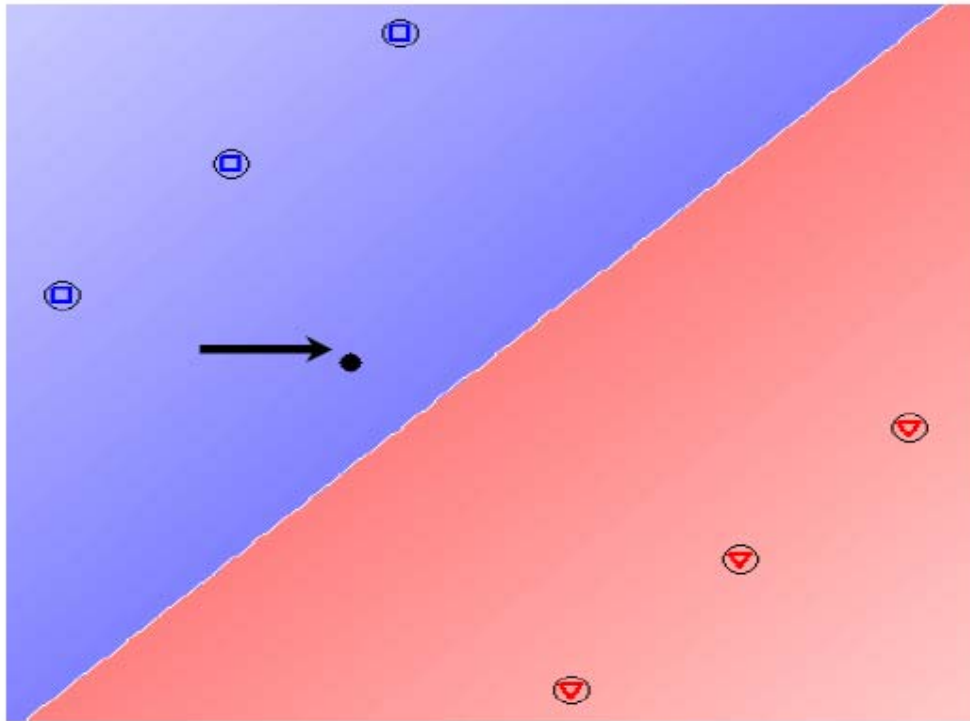
یکی از خصوصیات این نرم افزار آن است که قابلیت پیش گوئی در مورد یک نقطه انتخابی را دارد.



شکل ۶-۱۰: حالت پیش گوئی در مورد یک نقطه

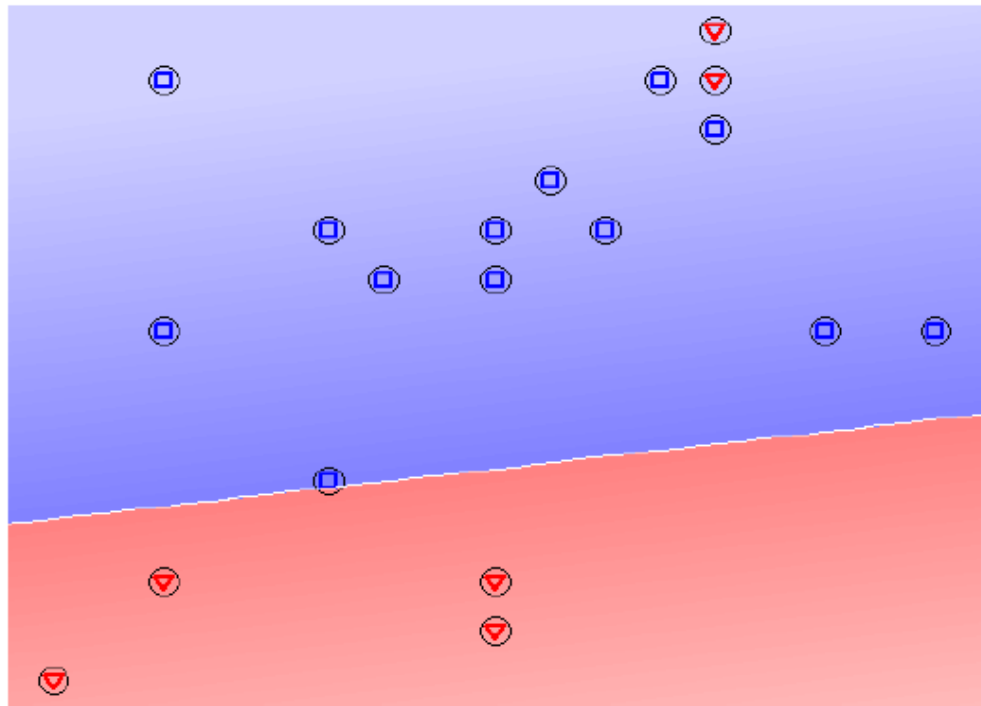
فرض می کنیم می خواهیم در مورد نقطه (۵,۳ و ۷,۲) پیش گوئی کنیم برای این کار نقطه را در کادر مربوطه نوشته سپس دکمه Predict را می فشاریم. در این روش امکان برای ما بوجود می آید که در

مورد نقاطی که حالت آتی شبکه می باشند پیش گوئی کرده و حالت امن یا ناامن بودن شبکه را بدانیم نقطه مورد نظر برای مدت سه ثانیه چشمک زن می باشد و سپس به رنگ مشکی در می آید که شکل (۱۱-۴) گویای این مطلب است.

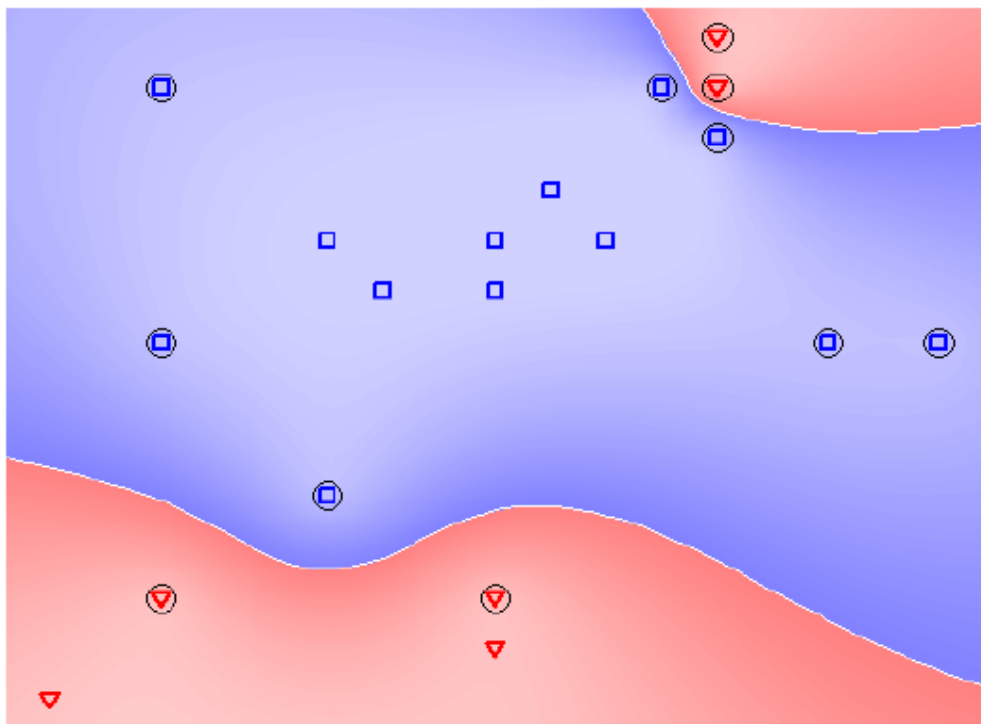


شکل ۱۱-۶: $Rbf, c=inf, y=5$

گاهی اوقات ممکن است نقاطی را که می خواهیم شبکه را با آن آموزش دهیم توسط یک تابع کرنل خطی (*liner*) قابل جداسازی نباشد و ما را مجبور به استفاده از یک کرنل غیر خطی کنند شکل (۱۲-۶) عدم موقعیت کرنل *linear* در جداسازی نقاط غیر خطی به اثبات می رساند و شکل (۱۳-۶) نیز موقعیت کرنل *erbf* را در انجام این کار نشان می دهد.

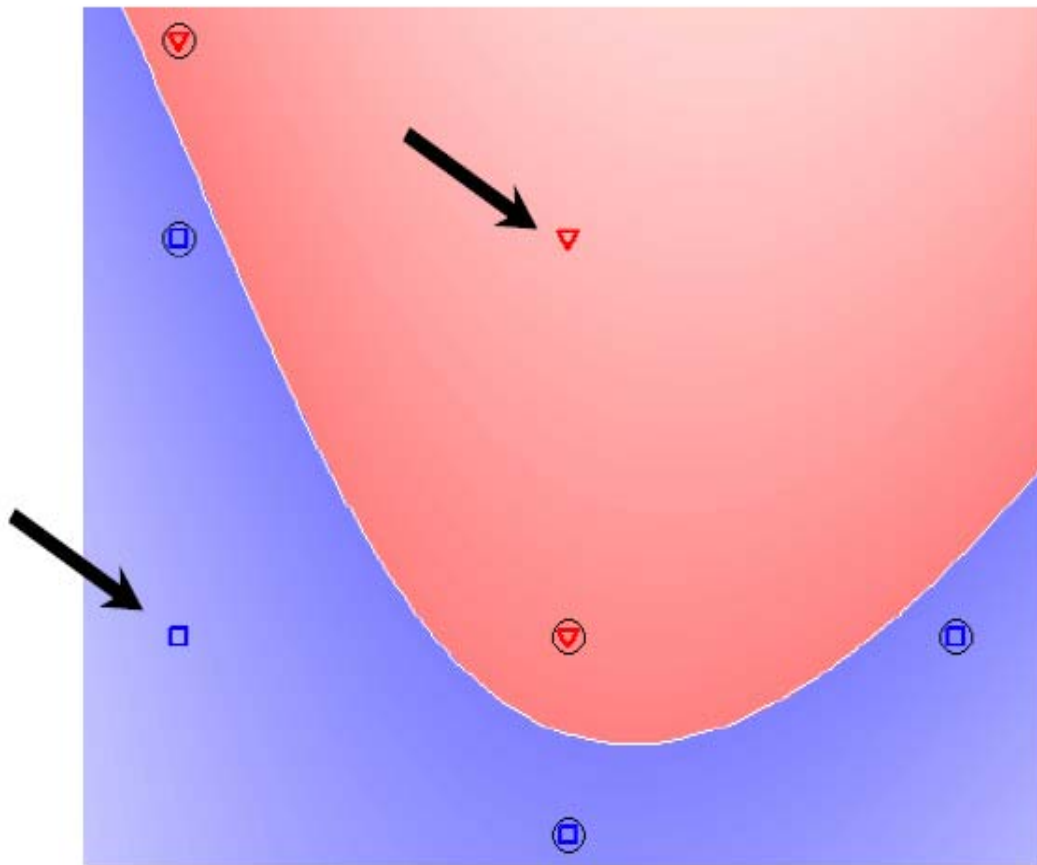


شکل ۶-۱۲: عدم موقعیت کرنل linear

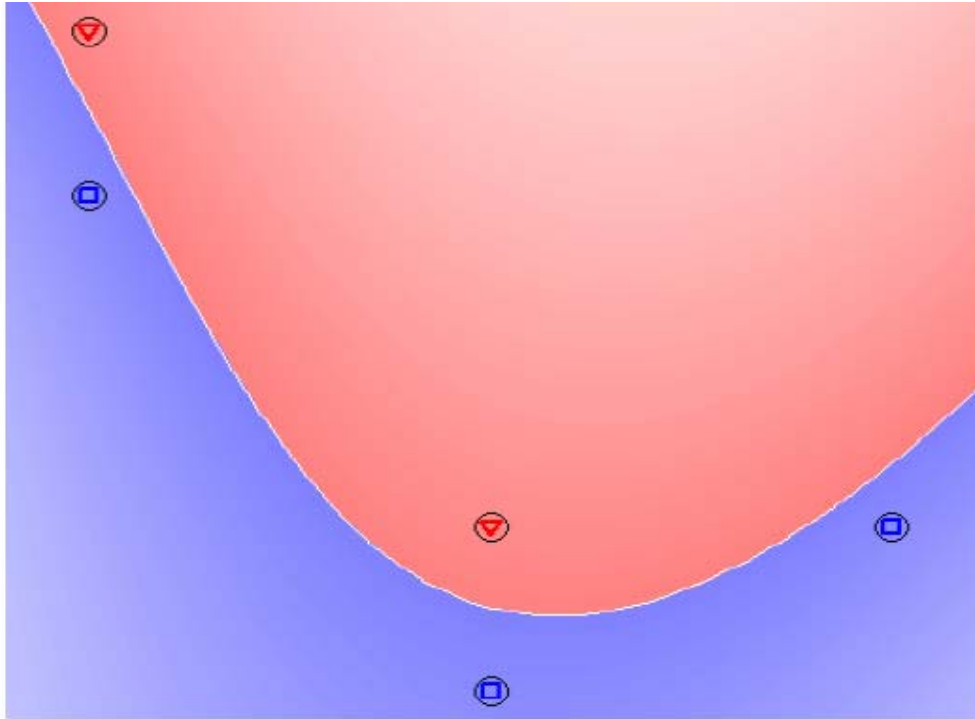


شکل ۶-۱۳: موقعیت کرنل brbf

بعد از دسته بندی مجموعه ای از نقاط به هم ریخته، ضرایب لانگراژ برای نقاط روی مرز SVها غیر صفر بوده و برای تمامی نقاط دیگر صفر می باشد. این بدین معنی است که تنها SVها در تعیین مرز جداکننده موثر می باشند یعنی اگر نقاط دیگر حذف شده و شبکه صرفاً با SVها آموزش ببینند باز هم همان صفحه جدا کننده بدست می آید. اشکال (۶-۱۴، ۶-۱۵)



شکل ۶-۱۴: نقش یکنای SV در عمل جداسازی



شکل ۶-۱۵: حذف نقاط و نقش یکتای SV ها در جداسازی

پس در تصمیم گیری در سیستم های قدرت به روش SVM باید به دنبال SV بود. یعنی نقاطی که روی مرز امنیت و عدم امنیت قرار می گیرند، مطلوبند. (نکته خیلی مهم)

در حالتی که عدم موفقیت یک تابع کرنل خطی را در جداسازی نقاط غیر خطی مشاهده کردید بدون تردید حداقل یکی از ضرائب لاگرانژ برابر با مقدار پنالتی C شده است.

فصل هفتم

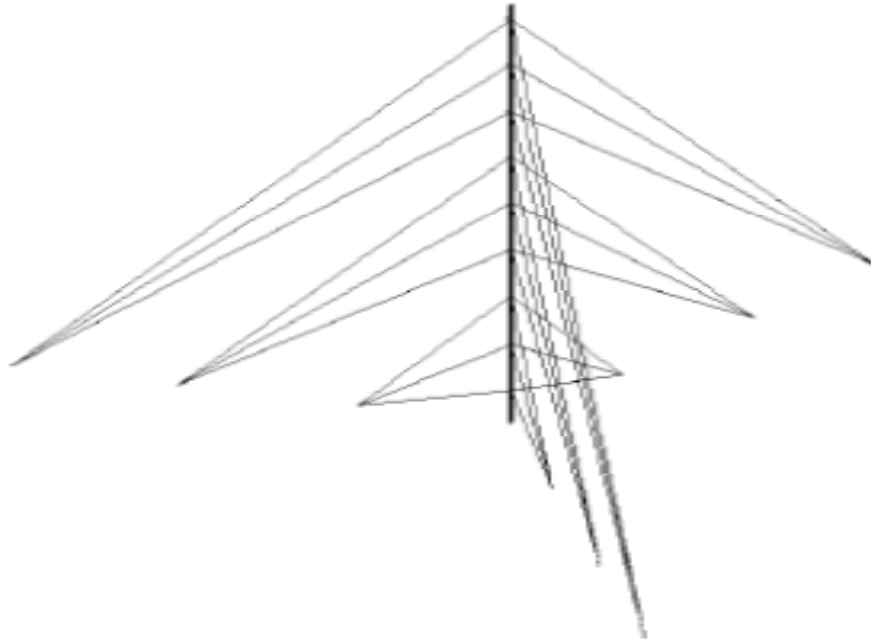
مدل سازی دکل مهارسی با

ANSYS

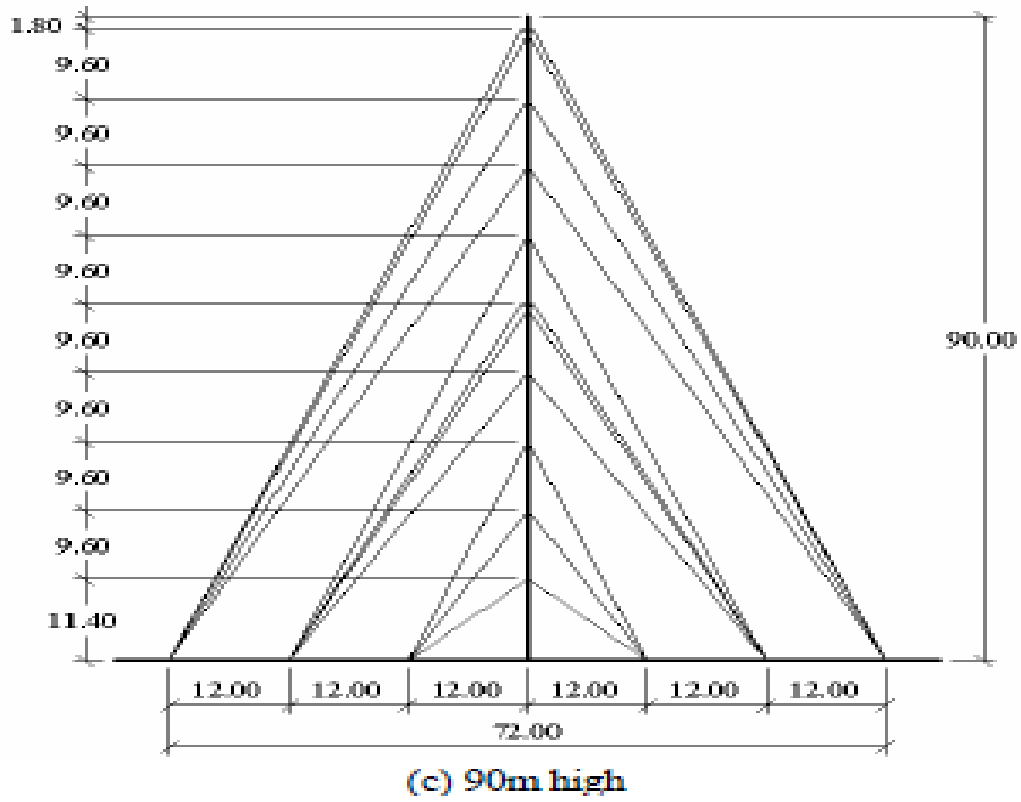
۱-۷- مدل سازی با ANSYS

برای تولید و ارزیابی مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی دکل های مهاری (محاسبه تغییر مکان راس دکل، محاسبه فرکانس طبیعی دکل در مود اول) تحت اثر نیروی زلزله در هر حالت از تعداد ۳۰۰ نمونه دکل مهاری که توسط نرم افزار ANSYS آنالیز شده اند استفاده میشود.

هر نمونه دکل مهاری در بر گیرنده ۵ متغیر مستقل شامل: X۱: فاصله افقی بین کابل های مهار بر روی سطح زمین، X۲: ارتفاع اولین سطح مهار بر روی دکل تا سطح زمین، X۳: ارتفاع بین کابل های مهار بر روی سطح دکل، X۴: ارتفاع آنتن بر روی دکل و n: تعداد سطح تراز مهاری و دو متغیر وابسته: ماکزیمم تغییر مکان جانبی (Maximum Lateral Displacement) و فرکانس (frequency) دکل میباشد. برای مثال ۵ پارامتر مستقل برای دکل مهاری ۹۰ متری نشان داده شده در شکل ۱-۷ و ۲-۷ به صورت زیر میباشد.



شکل ۷-۱: نمای سه بعدی دکل ۹۰ متری



شکل ۷-۲: دکل مهاری با ارتفاع ۹۰ متر

X۱: فاصله افقی بین کابل های مهار بر روی سطح زمین (۱۲ متر)

X۲: ارتفاع اولین سطح مهار بر روی دکل تا سطح زمین (۱۱,۴ متر)

X۳: ارتفاع بین کابل های مهار بر روی سطح دکل (۹,۶ متر)

X۴: ارتفاع آنتن بر روی دکل (۱,۸ متر)

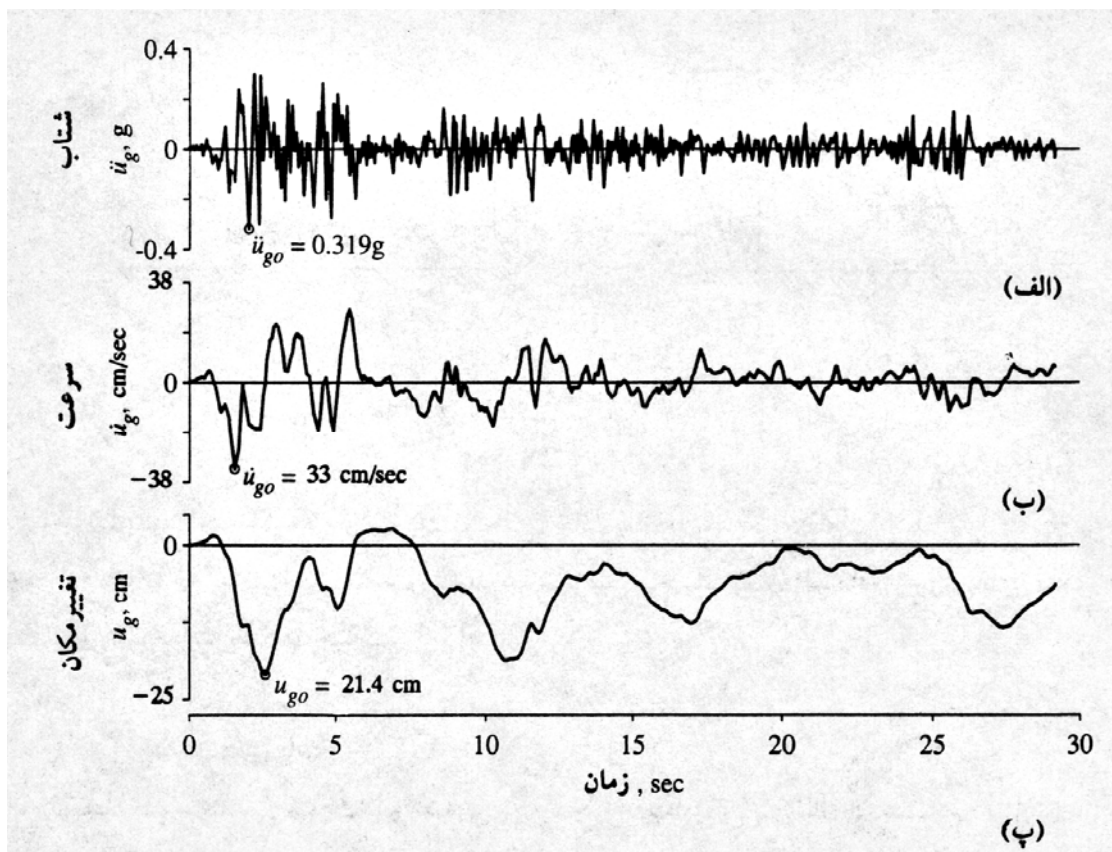
n: تعداد سطح تراز مهاری (۹ سطح)

برای ایجاد نمونه های مختلف از دکل های مهاری محدوده تغییر پارامتر های فوق در این پژوهش به صورت X۱: ۴ تا ۱۲ متر، X۲: ۴ تا ۱۲ متر، X۳: ۳ تا ۱۱ متر، X۴: ۱ تا ۲ متر و n: ۲ تا ۱۰ سطح تعریف میگردد. دکل های مورد بررسی در این مقاله دارای هندسه خرپائی شکل و سطح مقطع مربعی شکل میباشند. سطح مقطع همه قسمت های دکل از نبشی هایی با ساقهای برابر درست شده اند. قطعات نبشی توسط پیچ ها بهم متصل میشوند. وزن خالص موثر در آنالیز عبارت است از: وزن خالص سازه، پلکانها، آنتن ها کابل های مهار و ... همچنین مدل سازی با استفاده از المان محدود سه بعدی تیر با اتصالات صلب مشخص میشود. همه بخش های نبشی (پروفیل شماره ۱۰ و بالاتر) از فولاد ST۳۲ با مقاوت کششی 3600 kg/cm^2 ساخته شده اند و نبشی های کوچکتر از پروفیل ۱۰ از فولاد ST۳۷ با مقاوت کششی 2400 kg/cm^2 ساخته شده اند. ضریب ارتجاعی و وزن مخصوص مصالح فولادی استفاده شده به ترتیب $2.188 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و $7.85 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ میباشد.

۷-۲- آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی:

برای مقاصد مهندسی، نمودار تغییرات شتاب زمین بر حسب زمان که شتابنگاشت نامیده می شود، مفیدترین شیوه برای تعریف تکان های زمین در هنگام زلزله است با در دست داشتن شتابنگاشت و ماتریس جرم و سختی سازه و میرایی مشخص، مسئله ای که باید حل گردد کاملاً تعریف می شود.

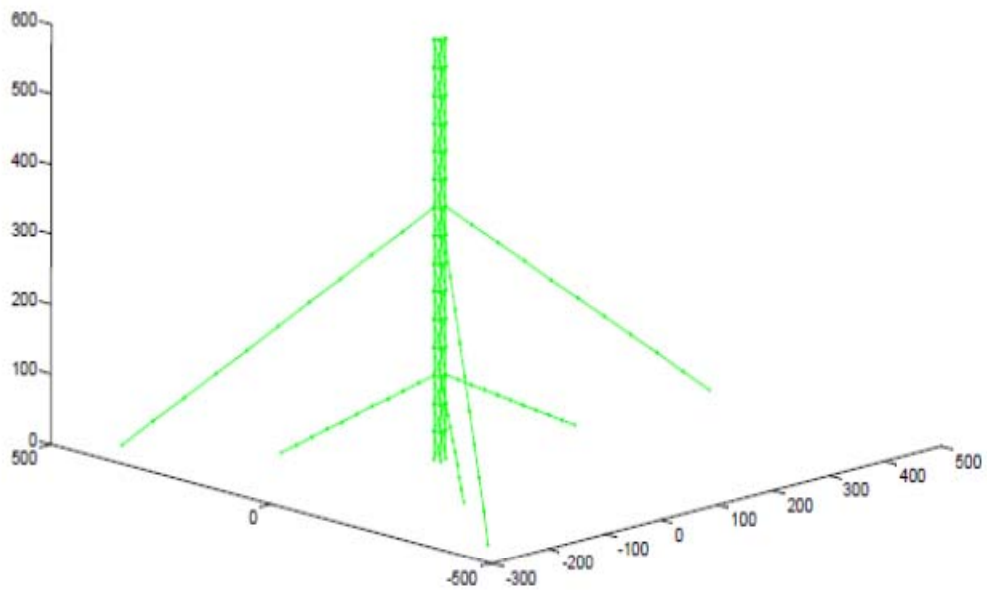
در هر زلزله سه مؤلفه شتاب، دو مؤلفه متعامد در صفحه افق و یک مؤلفه قائم، ثبت می گردد. برای ثبت شتاب از شتابنگارهای حرکت قوی استفاده می شود. این شتابنگارها دارای ثبت پیوسته نمی باشند و با هنگام رسیدن اولین امواج قوی زلزله شروع به فعالیت می کنند. با این روش، از ثبت بیهوده ارتعاش های ریز و دائمی زمین جلوگیری می شود. به جای نمودار شتاب زمین، می توان آن را به صورت عددی در فواصل زمانی کوتاه از هم نشان داد. با توجه به نامنظمی زیاد، فواصل زمانی انتخابی بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ ثانیه می باشد. بنابراین برای یک زلزله معمولی تعریف حدود ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ نقطه برای نمایش عددی شتاب ها لازم است. نمودار الف در شکل ۷-۳ شتابنگاشت زلزله ۱۹۴۰ ال سترو با مقدار حداکثر شتاب $0.319g$ می باشد با انتگرال گیری از این نمودار، نمودار سرعت زمین مطابق شکل ب، به دست می آید. مقدار حداکثر سرعت حرکت زمین ۳۳ سانتی متر بر ثانیه است با انتگرال گیری از نمودار سرعت نمودار تغییر مکان زمین با مقدار حداکثر ۲۱/۴ سانتی متر حاصل می گردد.



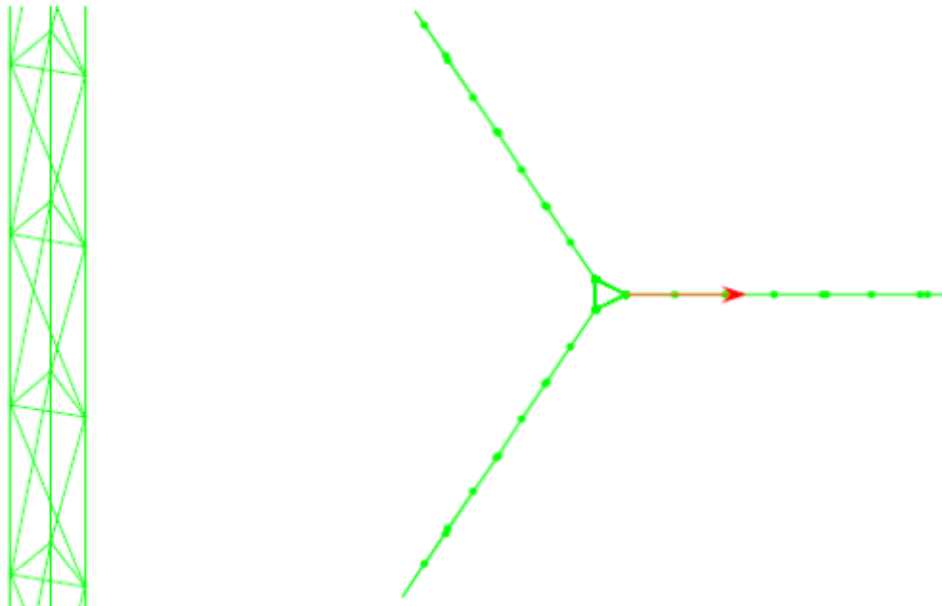
شکل ۷-۳: مؤلفه شتاب افقی شمال - جنوب منطقه ال سنترو در زلزله امپریال ولی (۱۹۴۰)

در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل دینامیکی زمانی (یا تاریخچه زمانی) و با استفاده از مولفه های شتاب زمان زلزله ۱۹۴۰ ال سنترو به آنالیز دینامیکی دکل های مهاری پرداخته شده است.

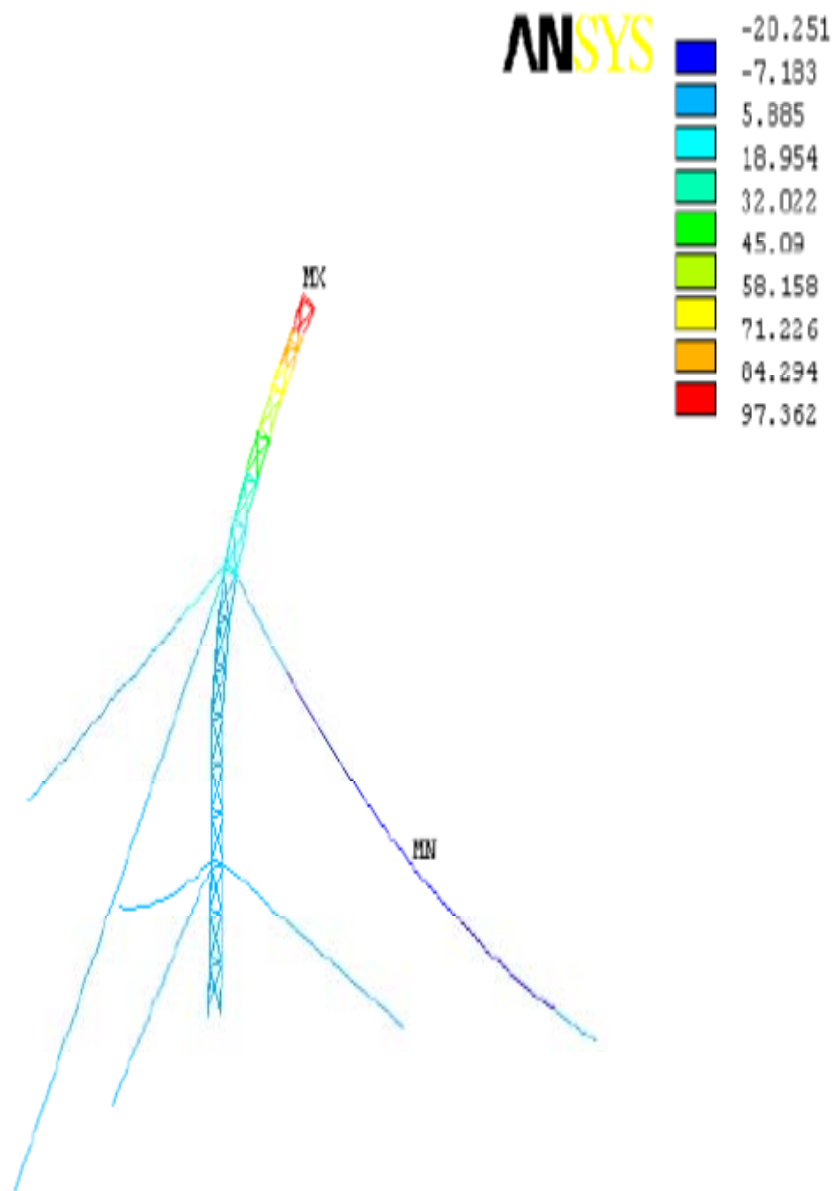
در اشکال ۷-۴ الی ۷-۱۴ نتایج آنالیز دکل مهاری ۱۸۲ متری توسط نرم افزار ANSYS تحت مولفه های شتاب زمان زلزله ال سنترو نشان داده شده است.



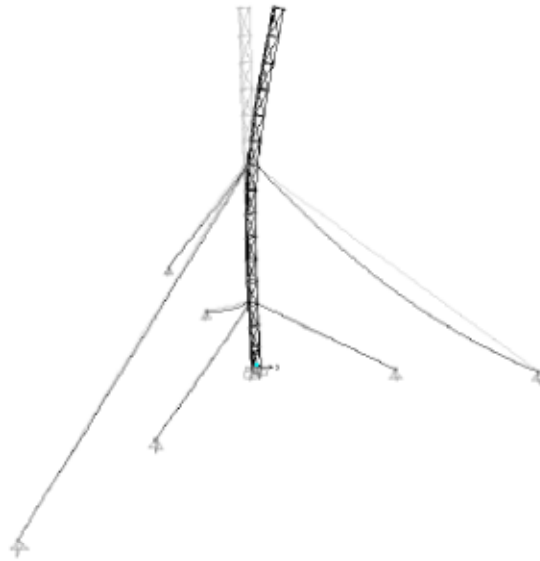
شکل ۷-۴: شکل هندسی دکل مهار شده



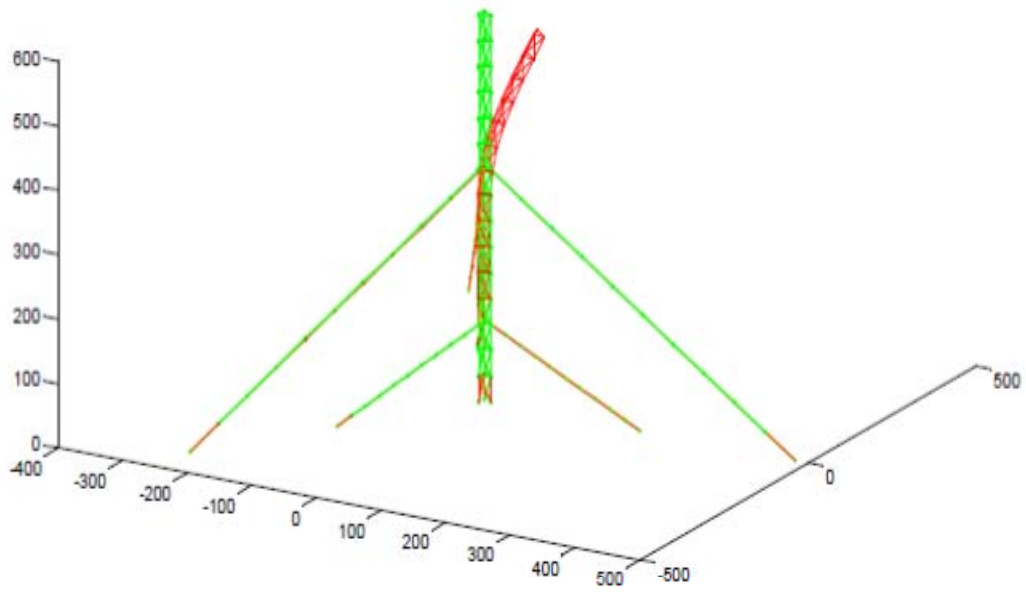
شکل ۷-۵: پلان دکل مهارى



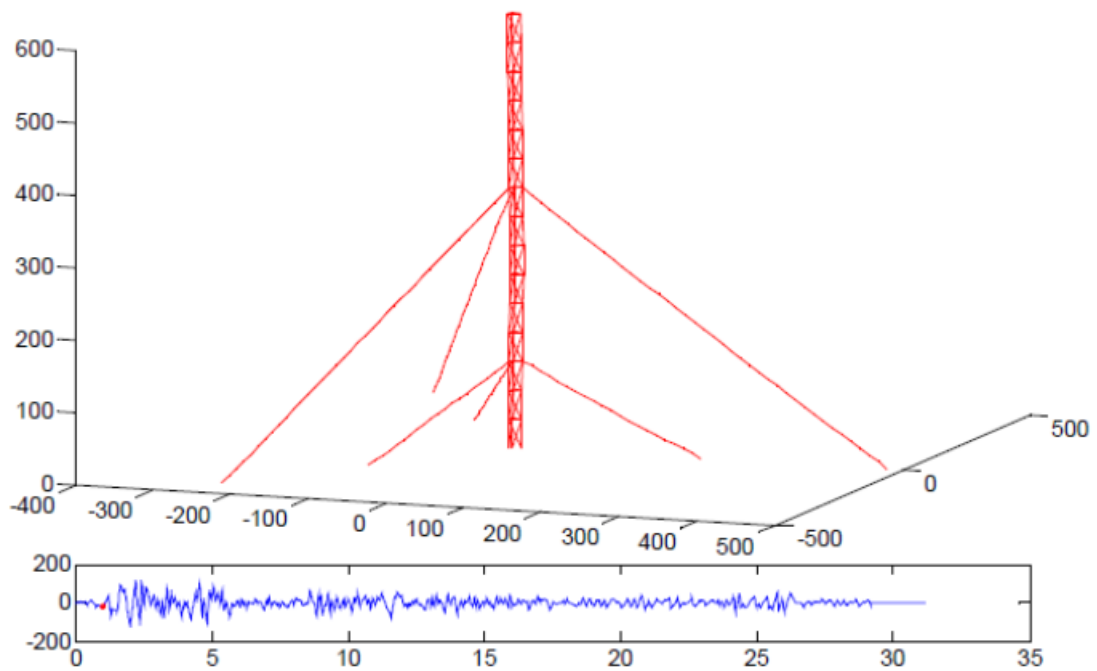
شکل ۶-۷: محاسبه نسبت تنش ها در دکل مهاری



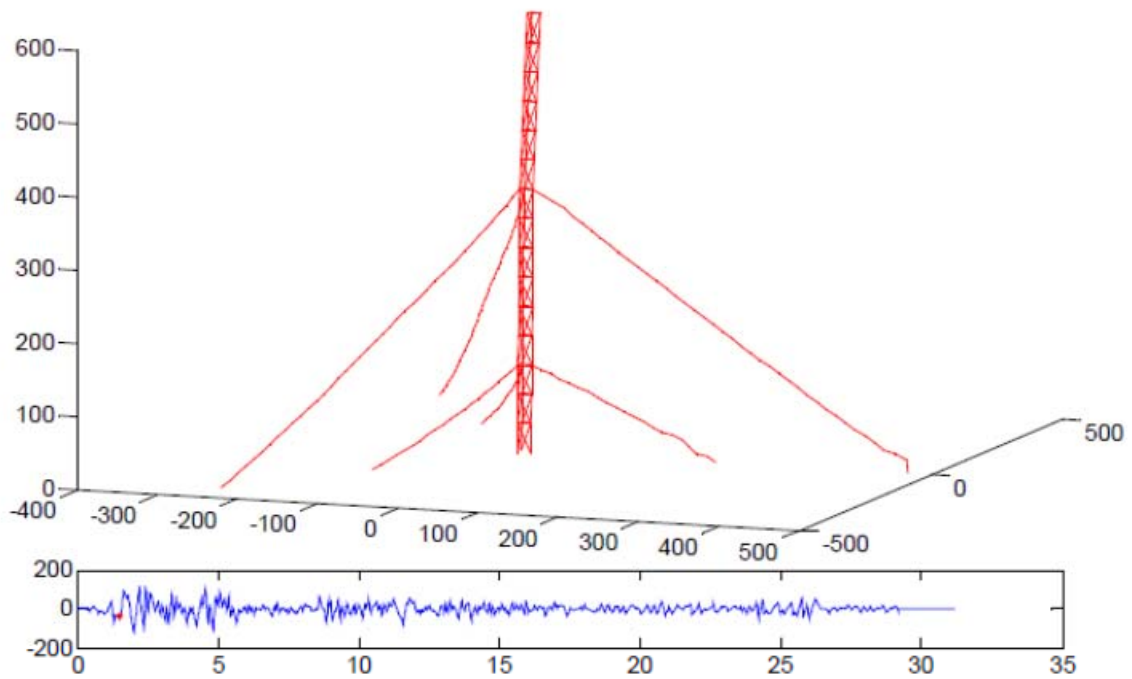
شکل ۷-۷: شکل تغییر یافته دکل مهاری



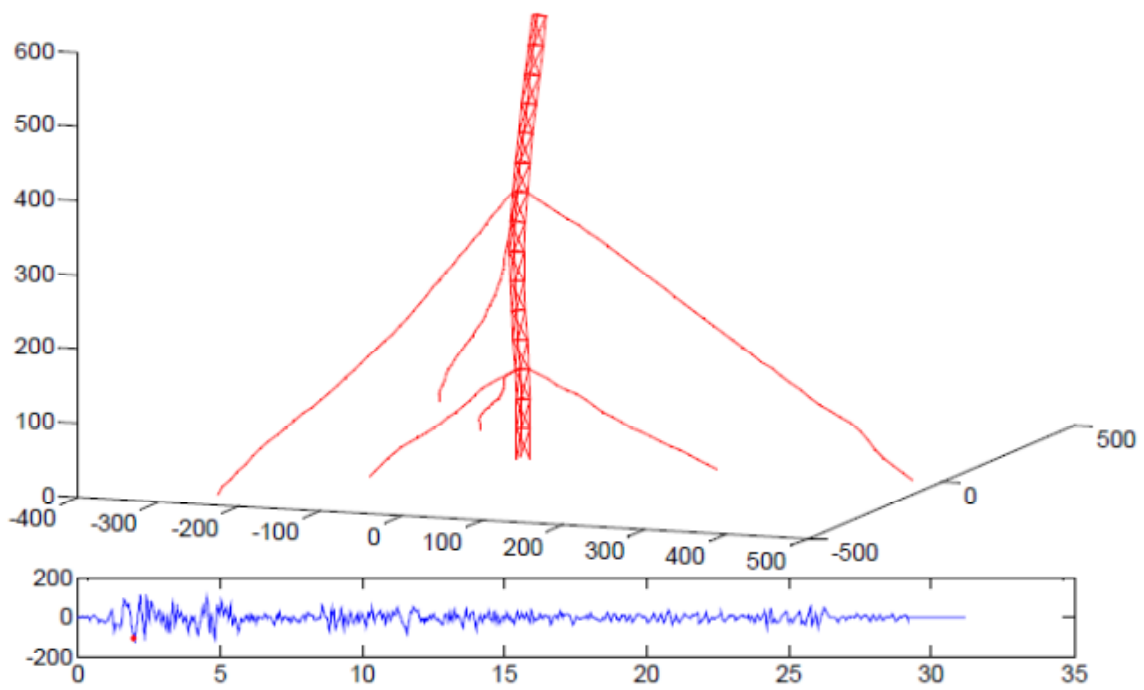
شکل ۷-۸: تغییر شکل خمشی دکل مهاری تحت بار دینامیکی در نقطه فوقانی



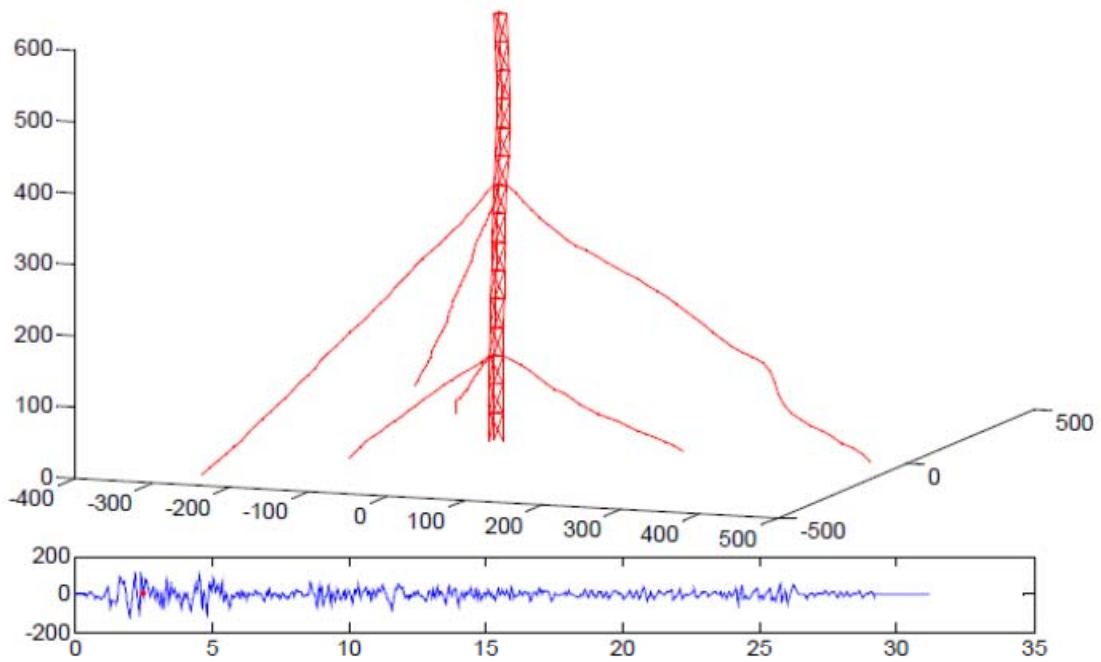
شکل ۷-۹: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=1$ second



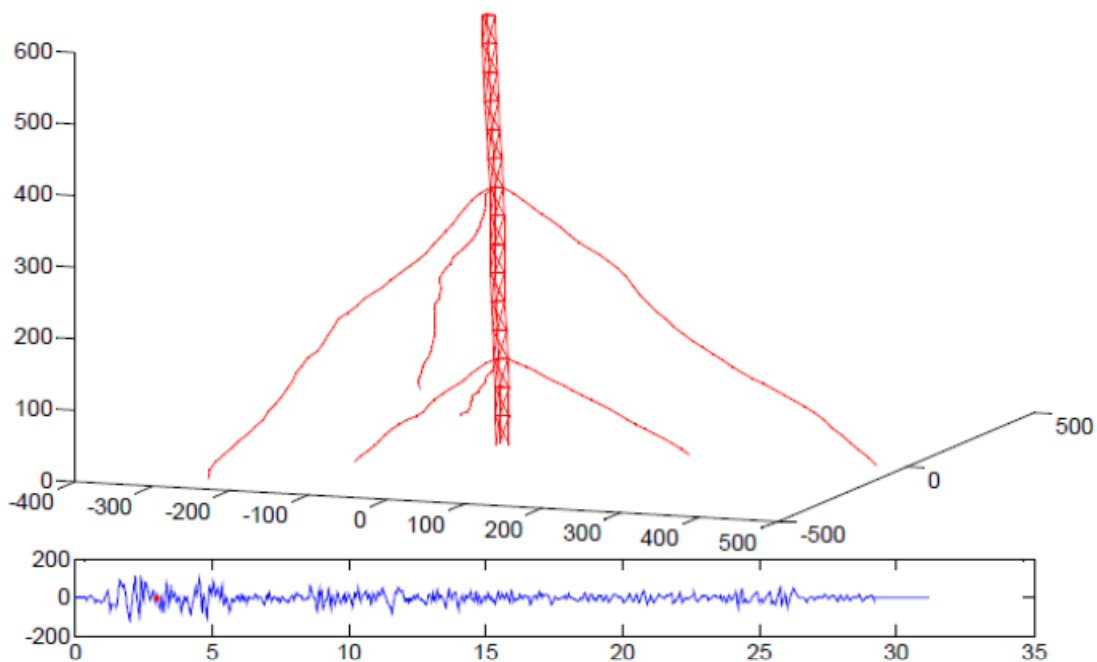
شکل ۷-۱۰: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=1,5$ second



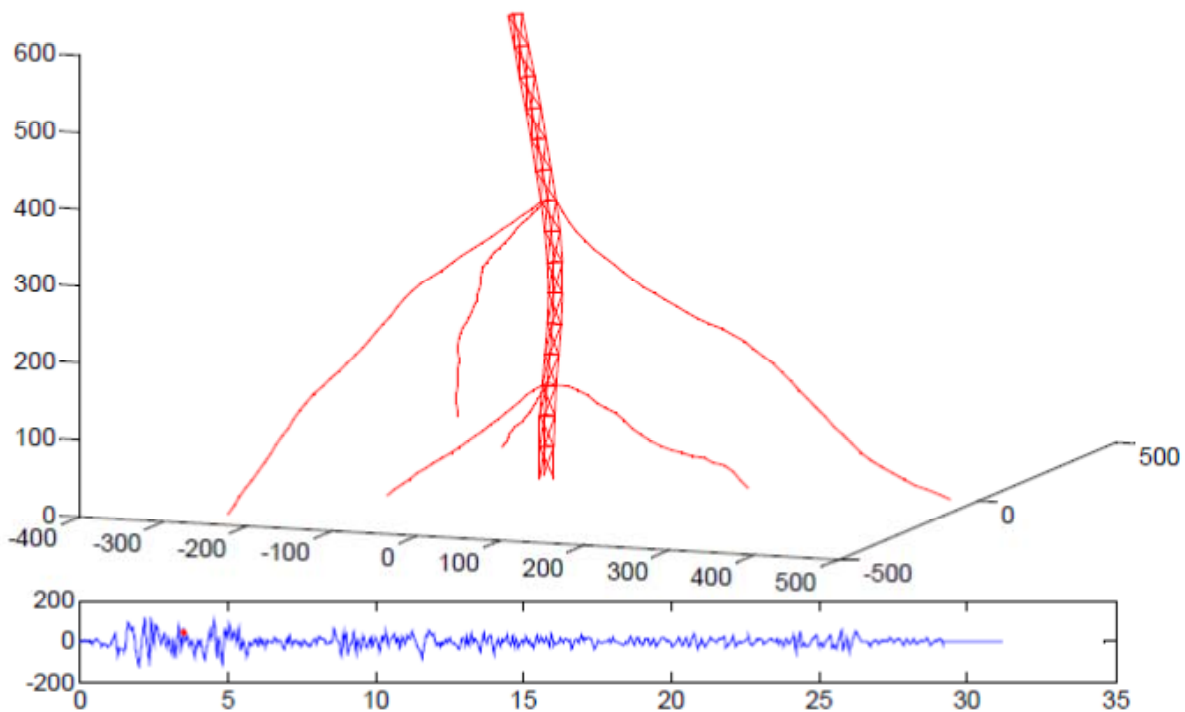
شکل ۷-۱۱: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=2$ second



شکل ۷-۱۲: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=2,5$ second

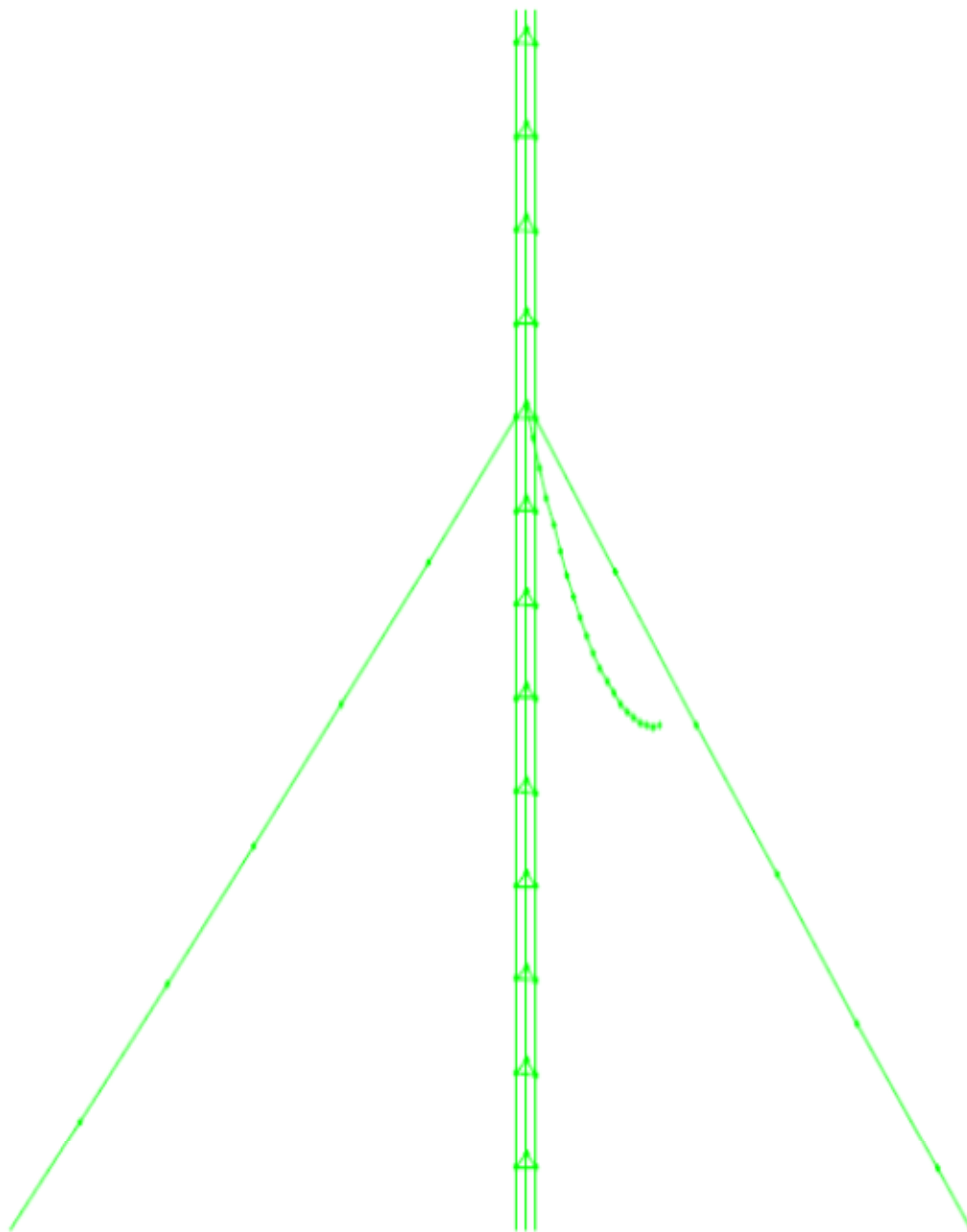


شکل ۷-۱۳: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=3$ second

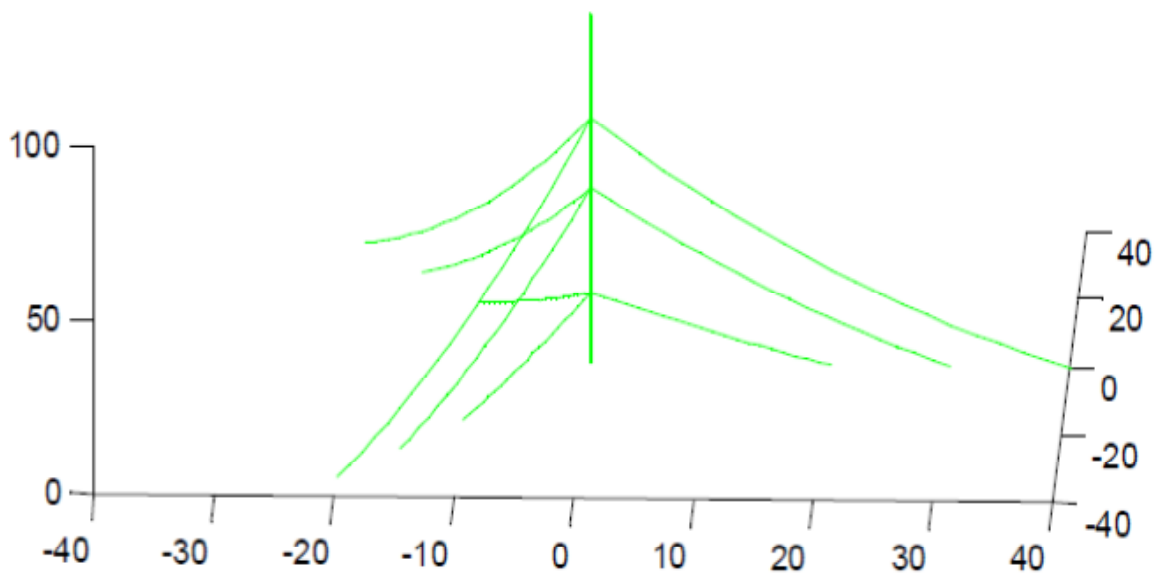


شکل ۷-۱۴: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=3,5$ second

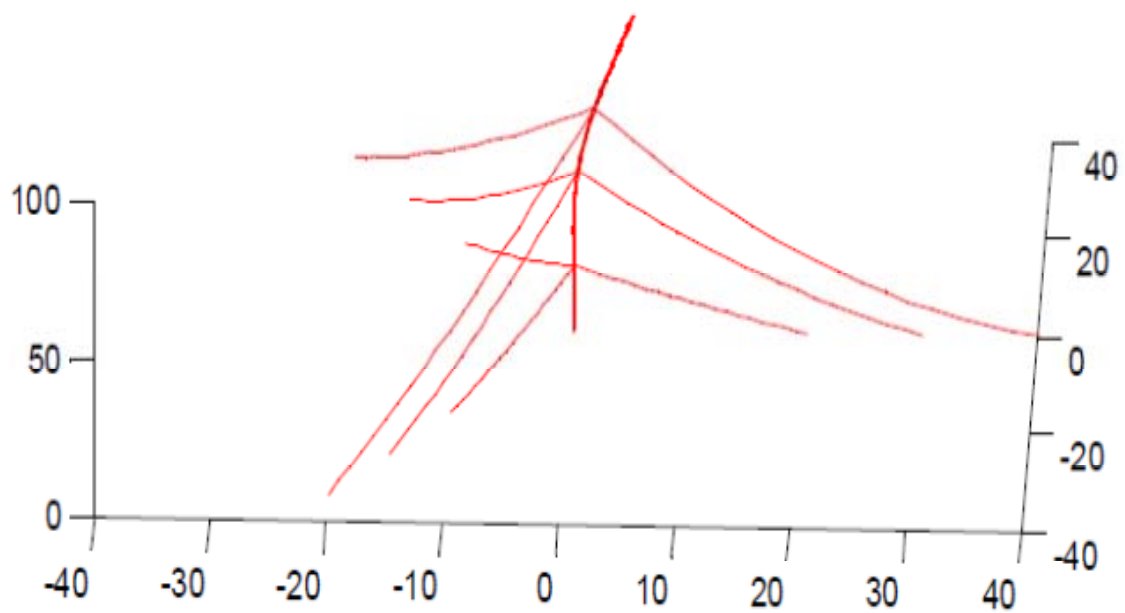
همچنین در مثالی دیگر در اشکال ۷-۱۵ الی ۷-۳۳ نتایج آنالیز دکل مهاری ۱۰۰ متری توسط نرم افزار ANSYS تحت مولفه های شتاب زمان زلزله ال سنترو نشان داده شده است.



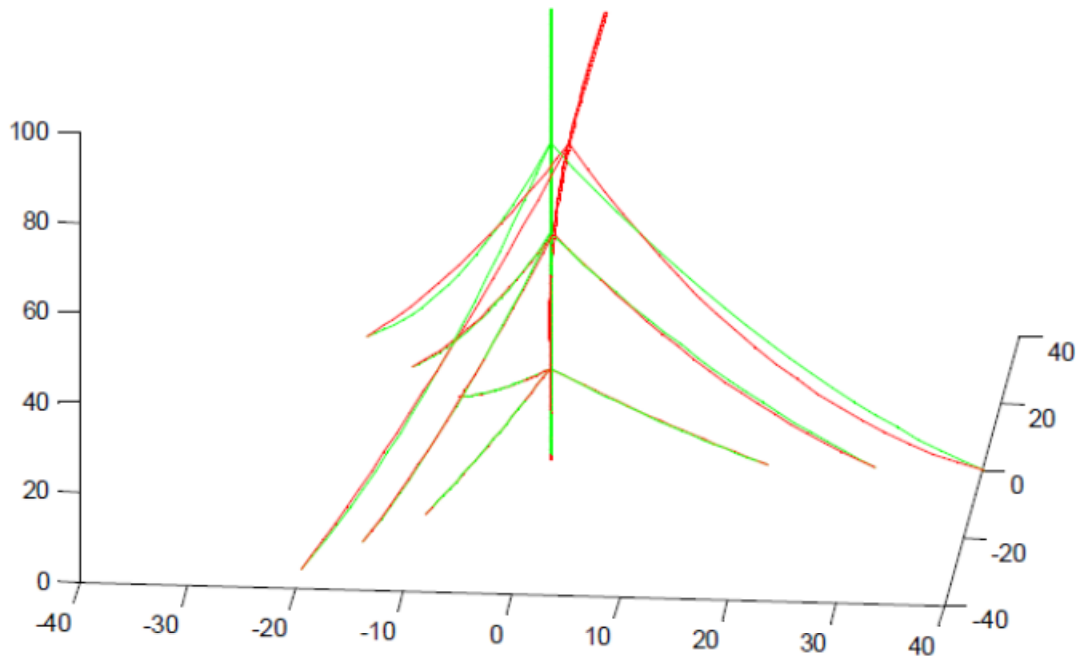
شکل ۷-۱۵: شکل هندسی دکل مهاری شده



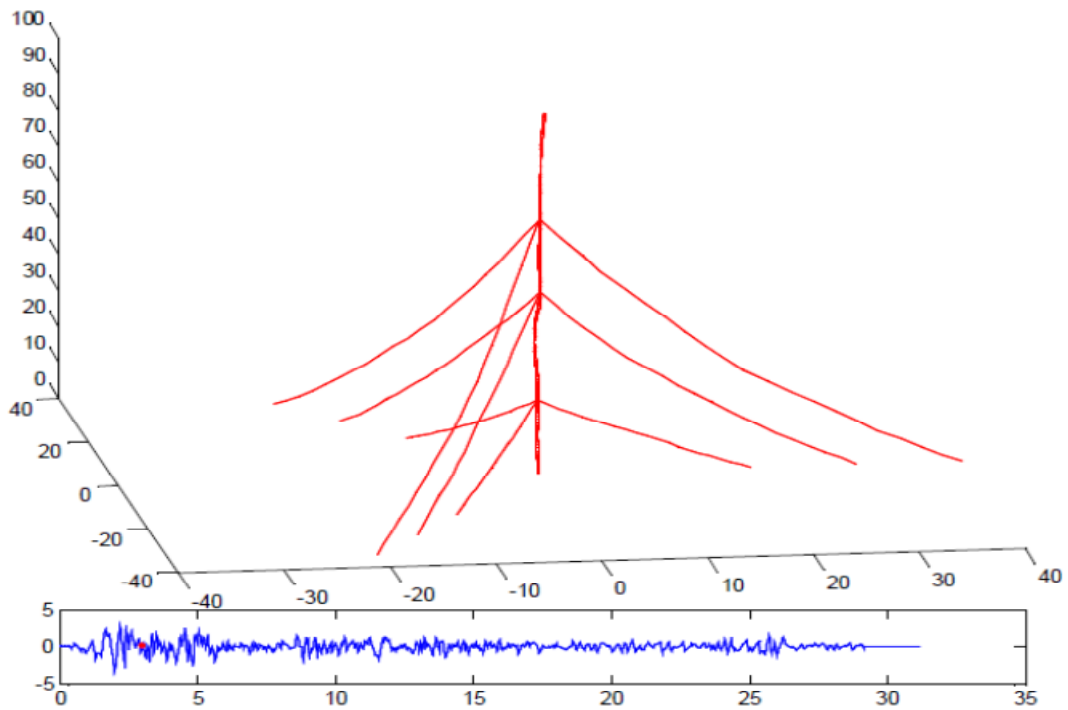
شکل ۷-۱۶: شکل تغییر نیافته دکل مهاری ۱۰۰ متری



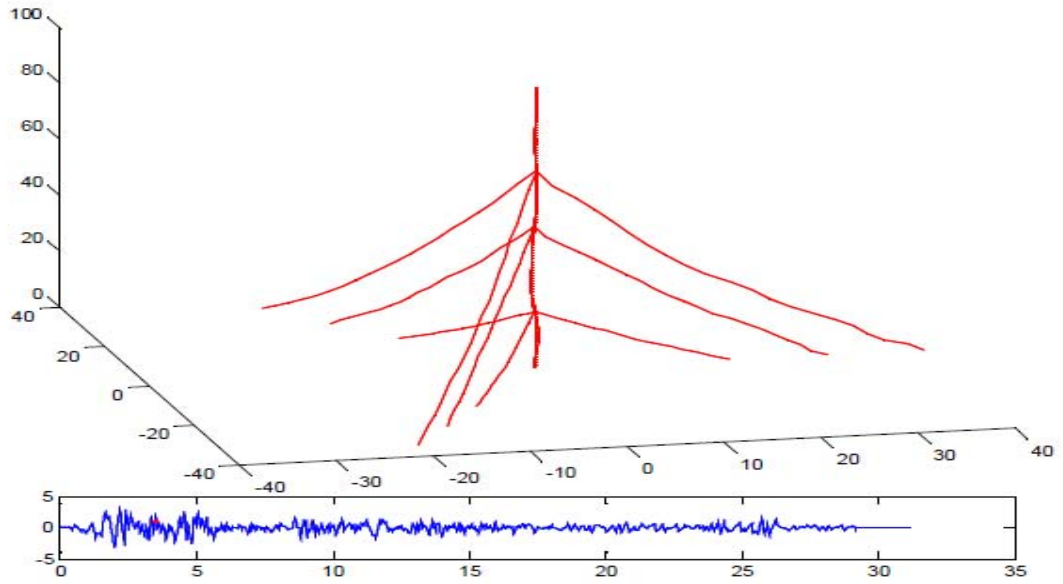
شکل ۷-۱۷: شکل تغییر یافته دکل مهاری ۱۰۰ متری



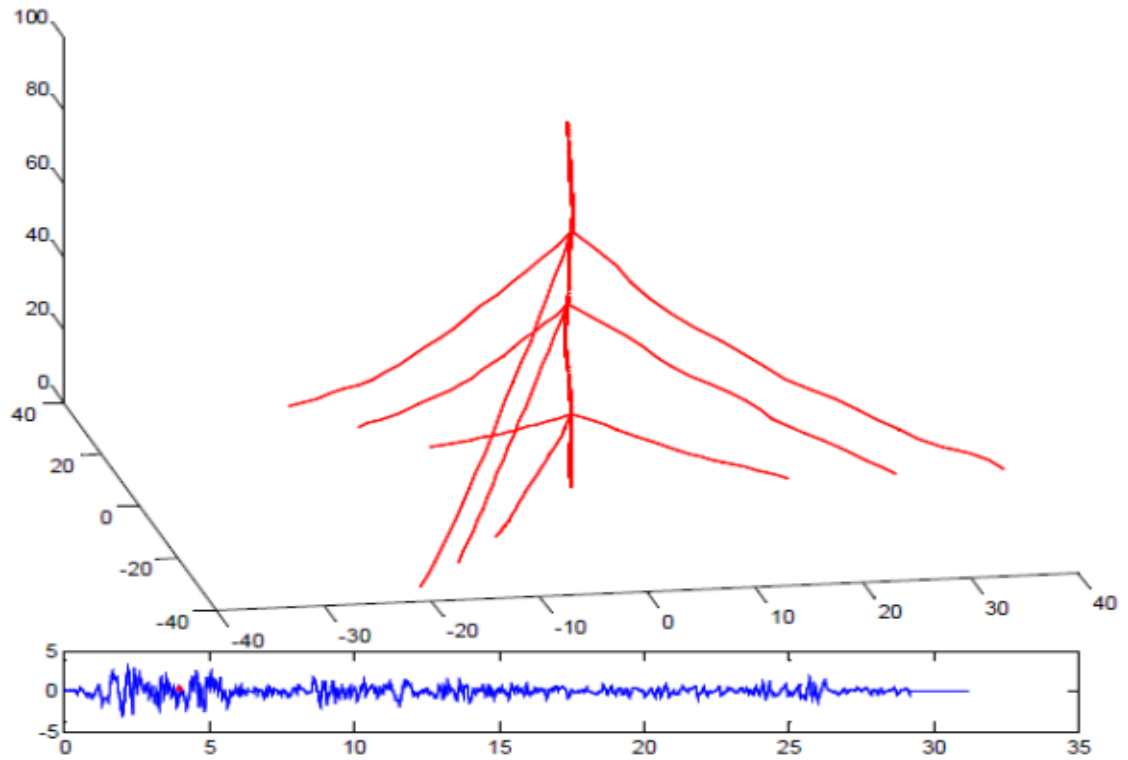
شکل ۷-۱۸: شکل تغییر یافته و نیافته دکل مهاری ۱۰۰ متری



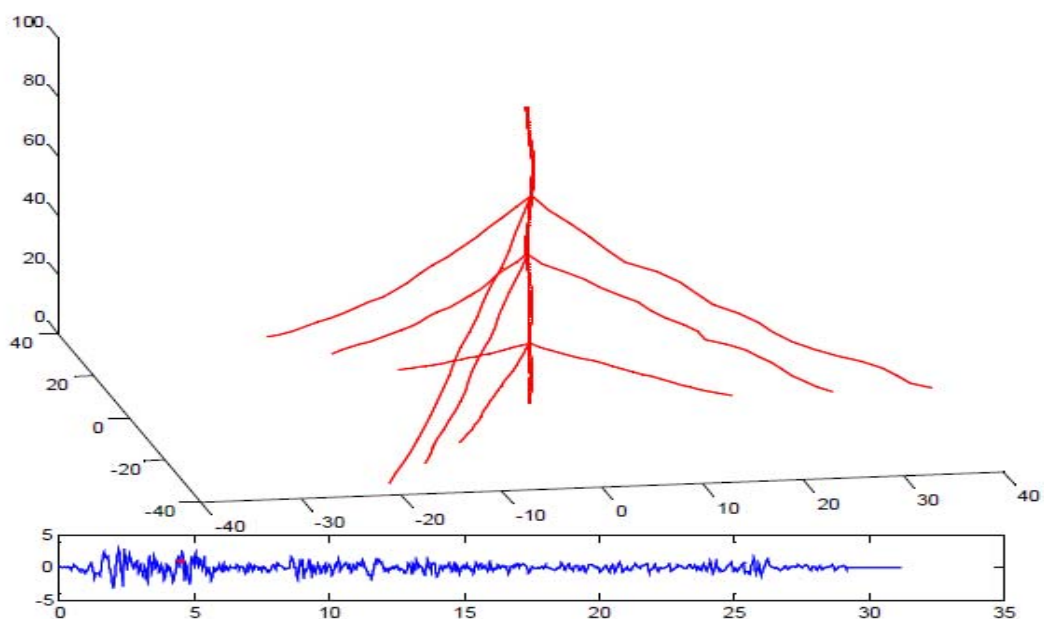
شکل ۷-۱۹: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=3$ second



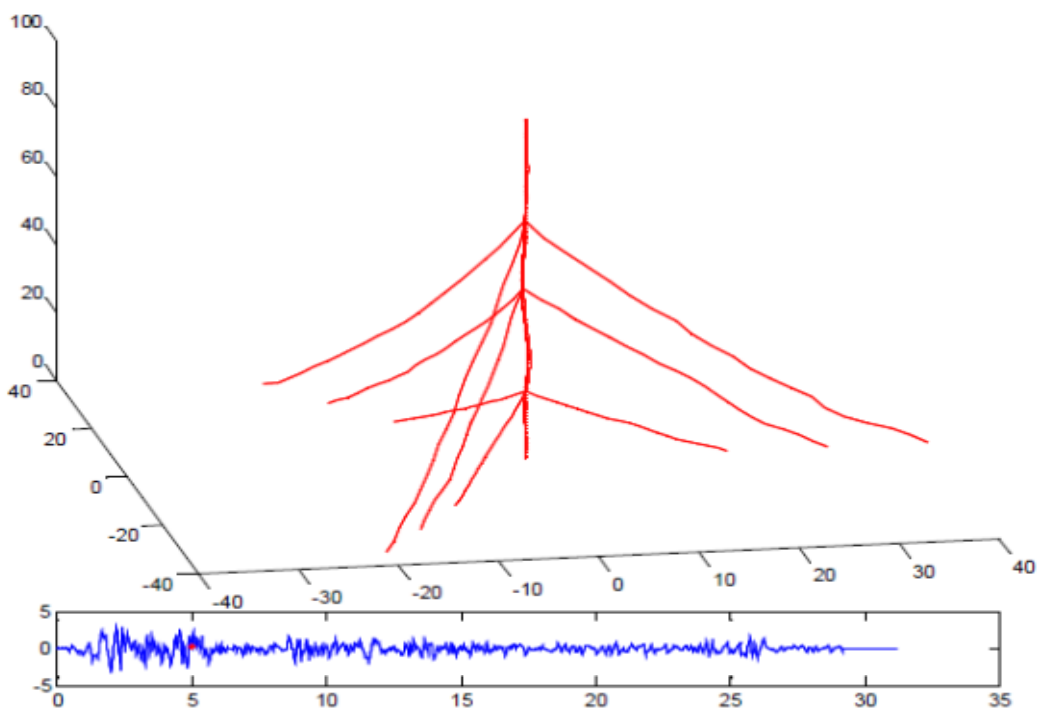
شکل ۷-۲۰: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=۳,۵$ second



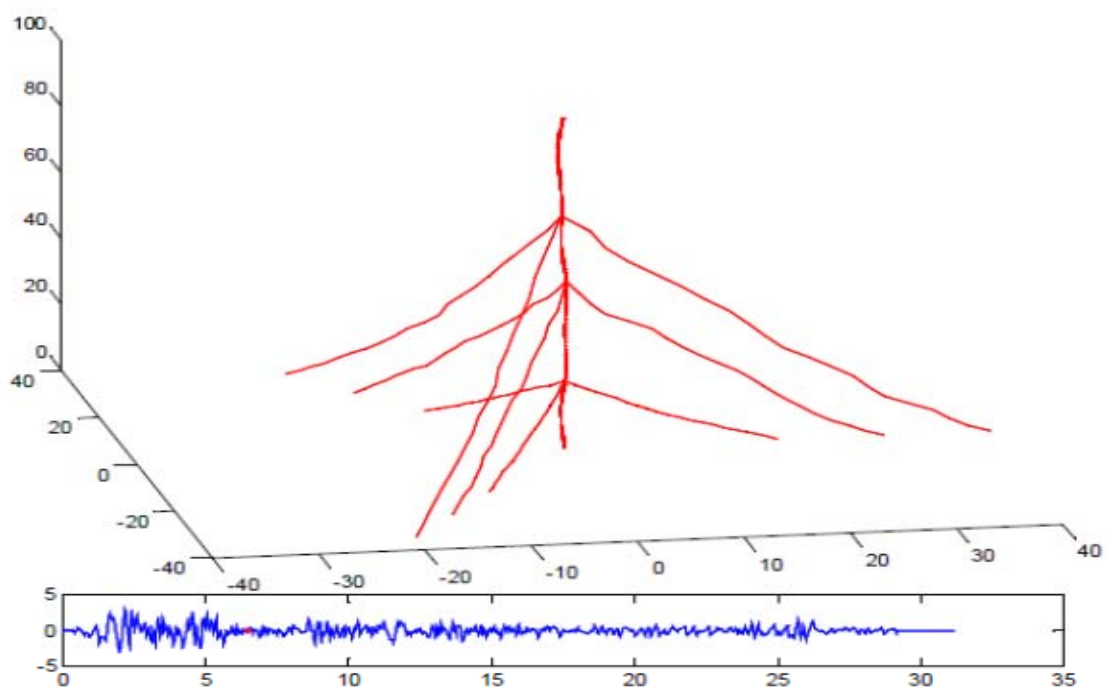
شکل ۷-۲۱: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=۴$ second



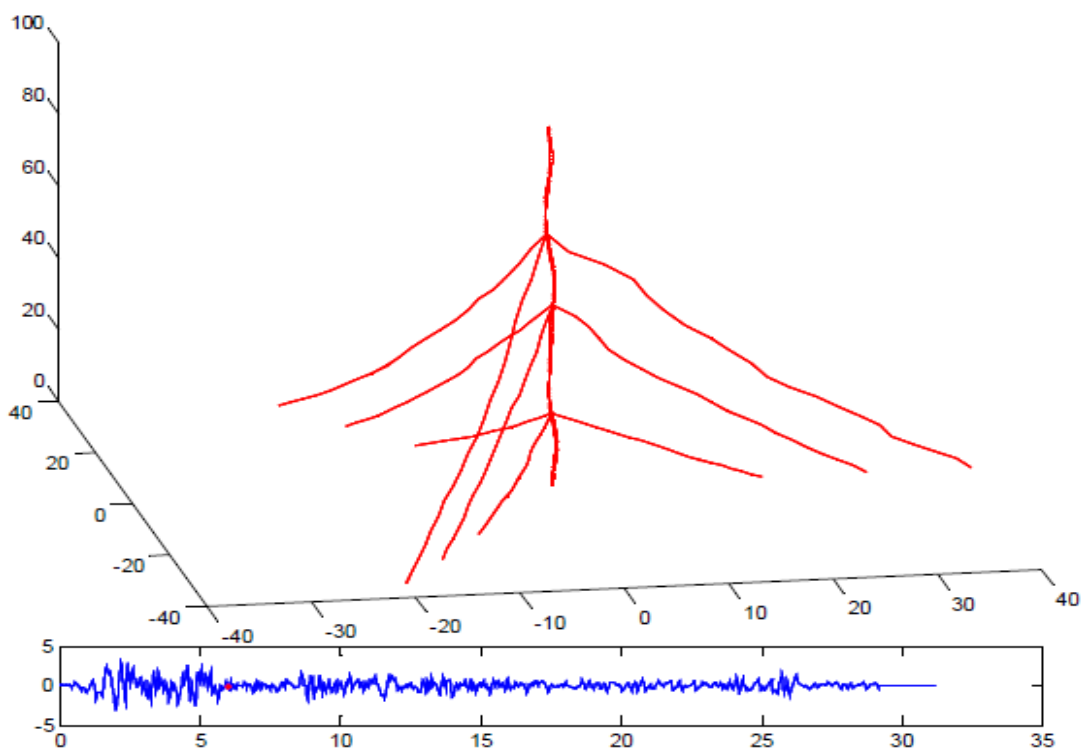
شکل ۷-۲۲: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=4.5$ second



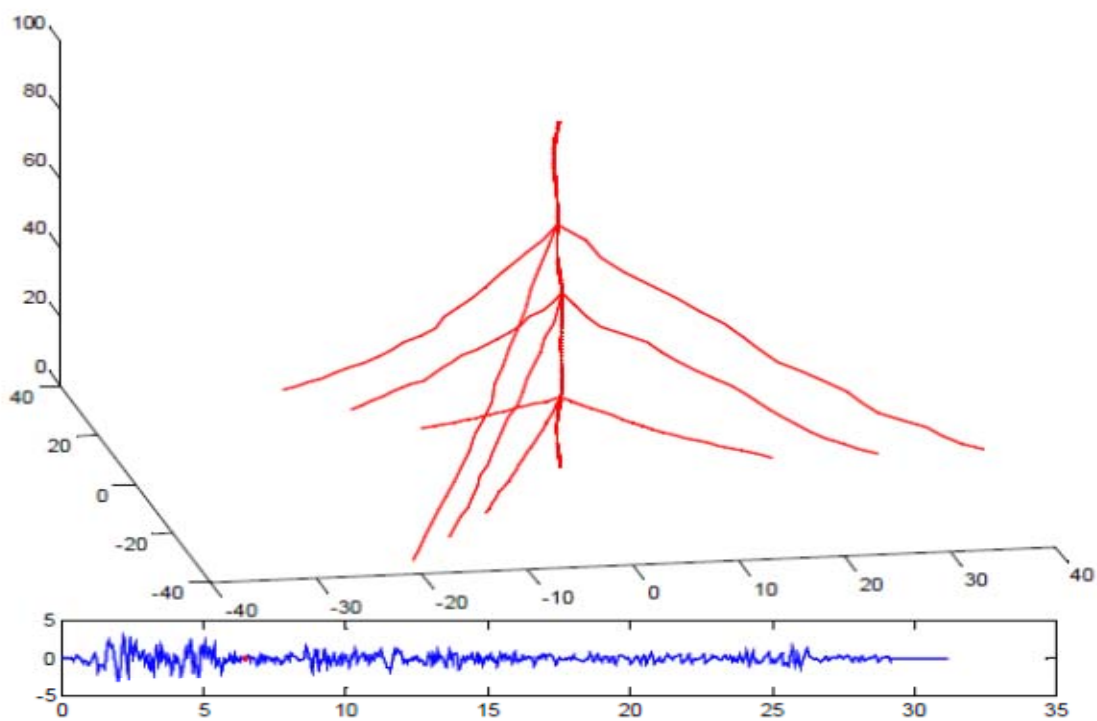
شکل ۷-۲۳: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=5$ second



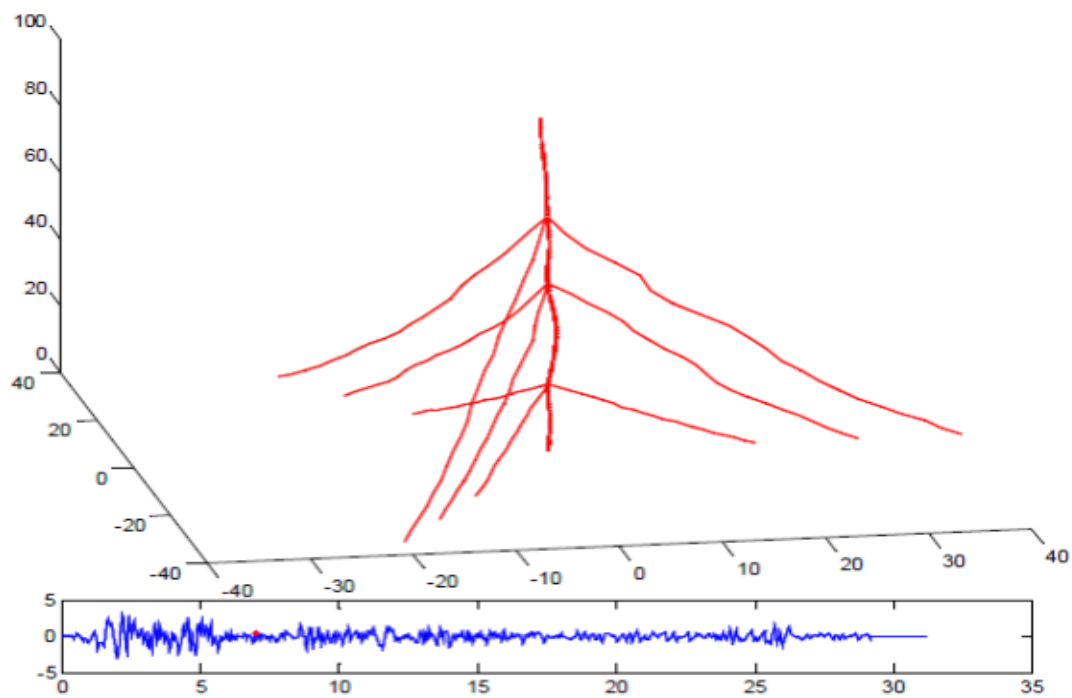
شکل ۷-۲۴: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=۵.۵$ second



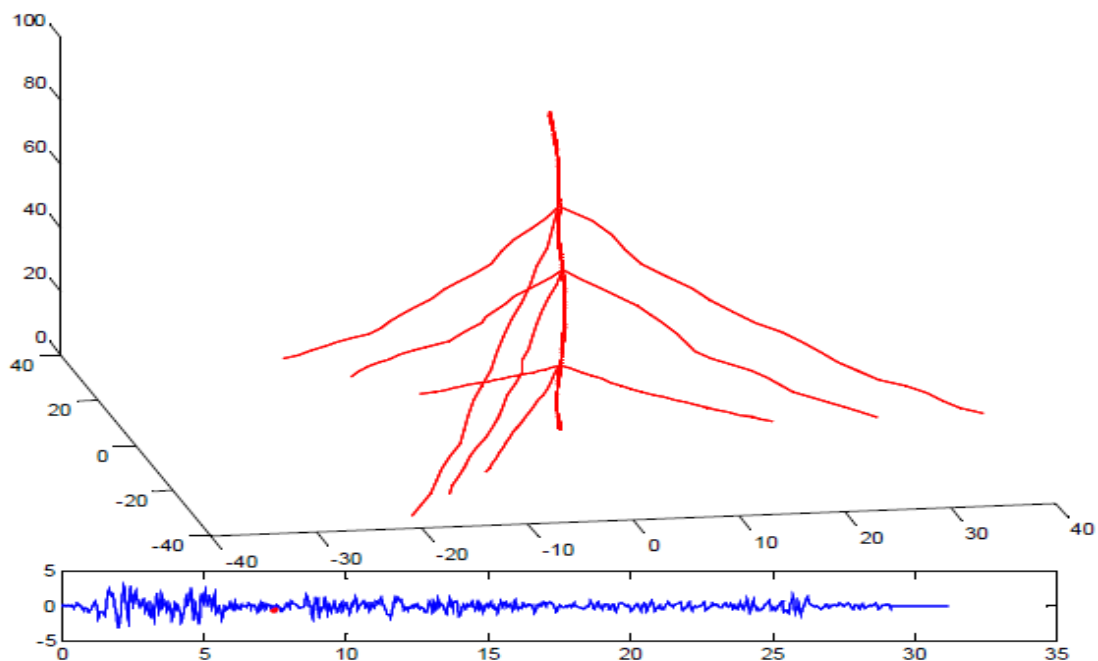
شکل ۷-۲۵: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=۶$ second



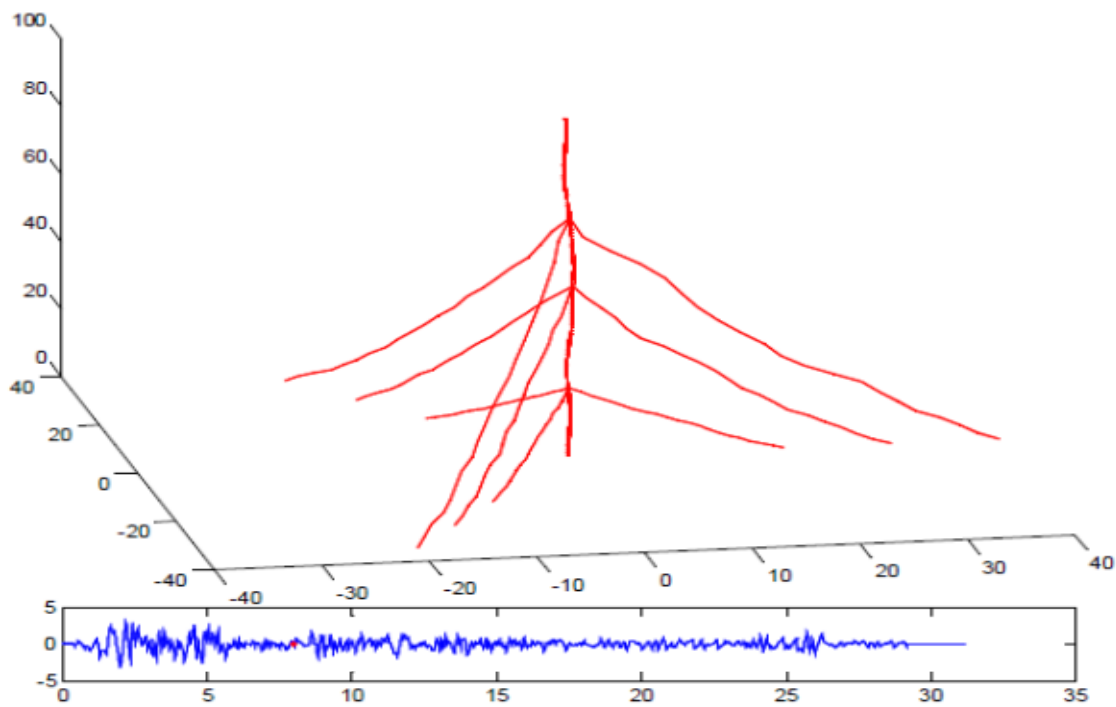
شکل ۷-۲۶: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=۶.۵$ second



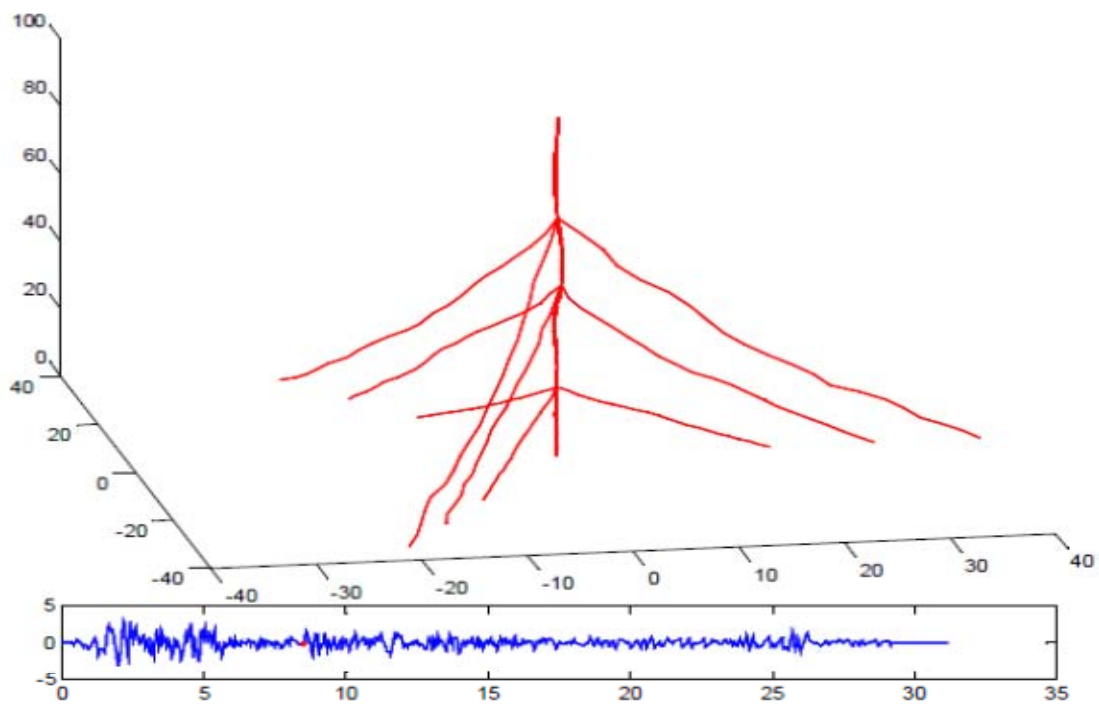
شکل ۷-۲۷: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=۷$ second



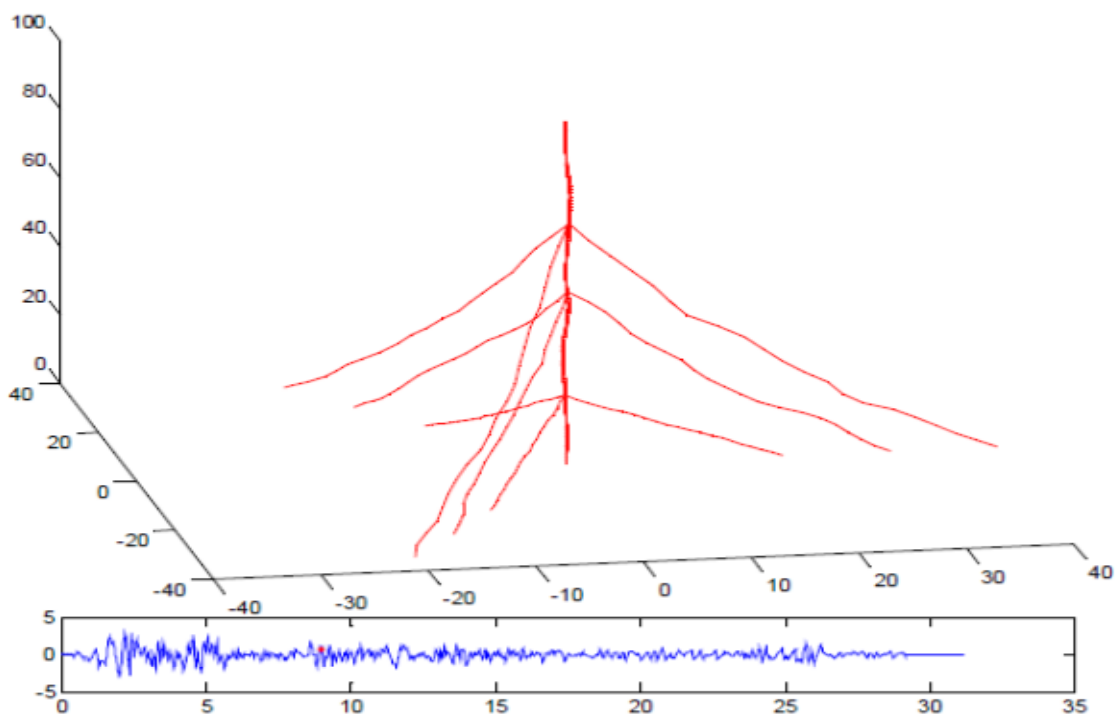
شکل ۷-۲۸: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=7.5$ second



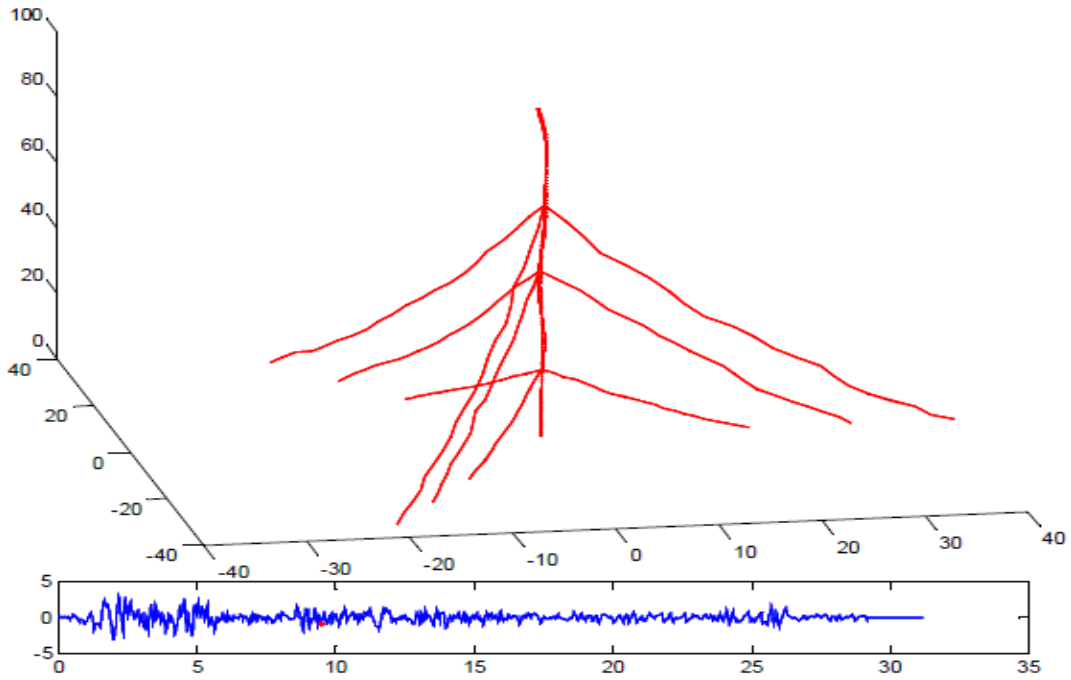
شکل ۷-۲۹: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=8$ second



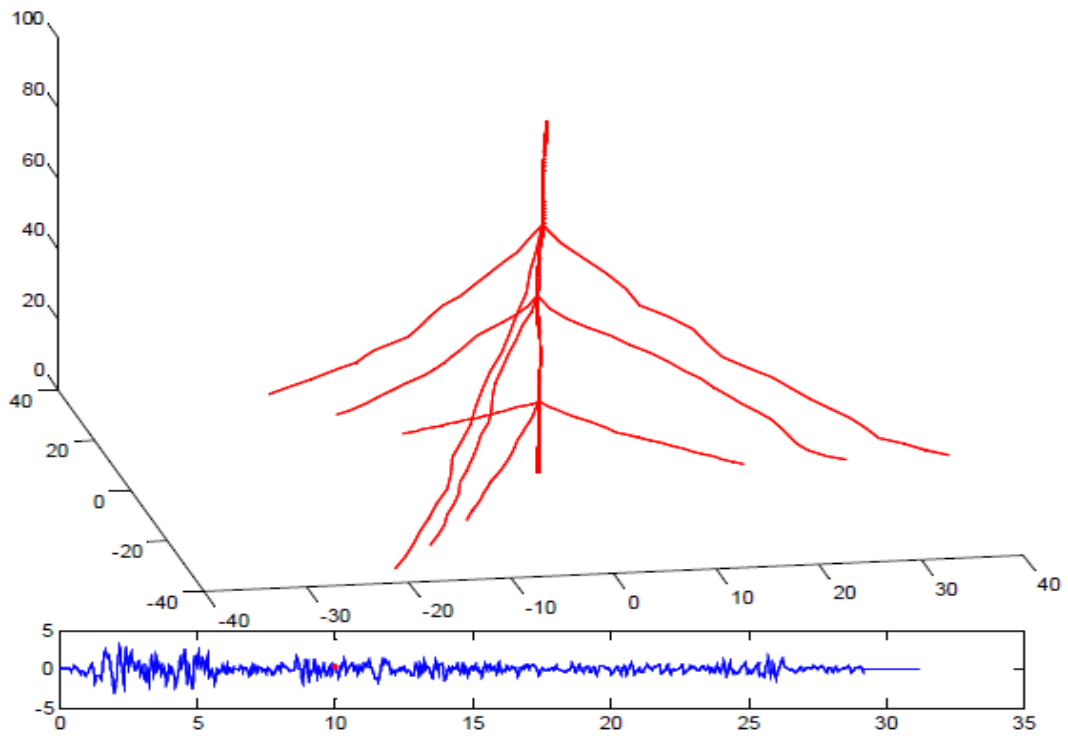
شکل ۷-۳۰: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=8.5$ second



شکل ۷-۳۱: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=9$ second

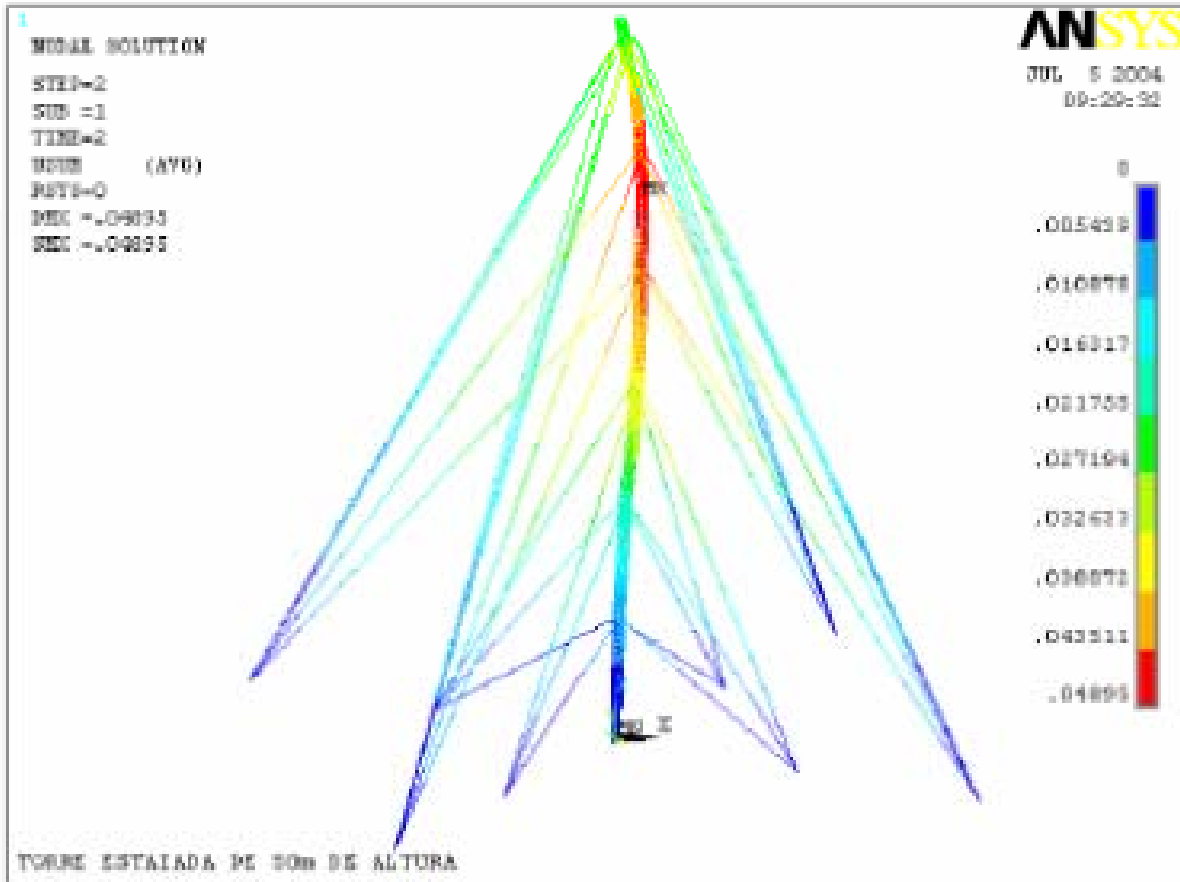


شکل ۷-۳۲: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=9.5$ second

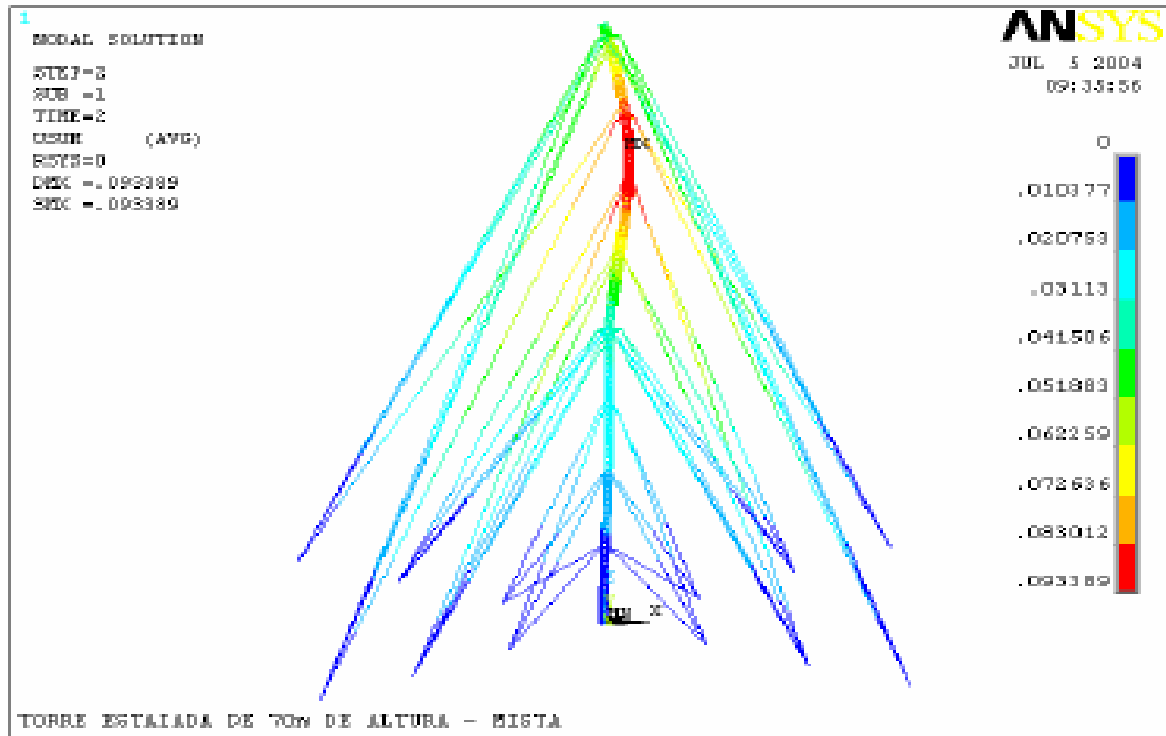


شکل ۷-۳۳: تغییر شکل دکل مهاری در زمان $t=10$ second

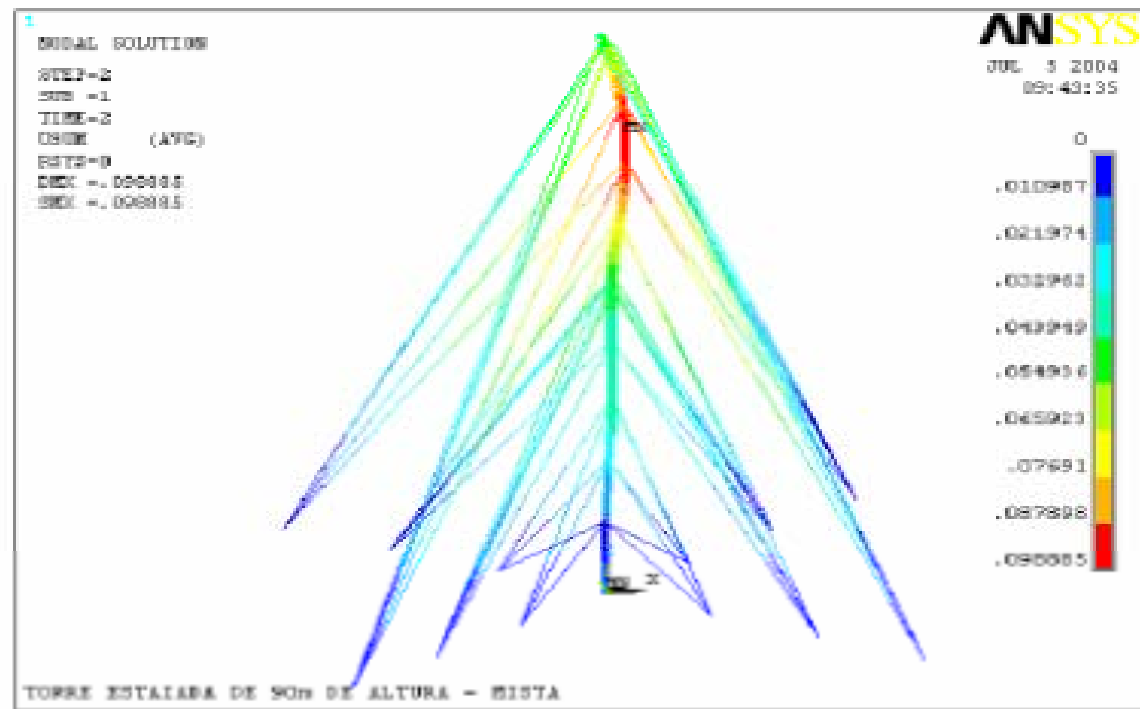
نتایج آنالیز تاریخچه زمانی برای محاسبه تغییر مکان در تراز های مختلف دکل مهاری ۷۰،۵۰ و ۹۰ متری در اشکال ۷-۳۴ الی ۷-۳۶ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳۴: نتایج تغییر شکل دکل مهاری ۵۰ متری در تراز های مختلف



شکل ۷-۳۵: نتایج تغییر شکل دکل مهاری ۷۰ متری در تراز های مختلف



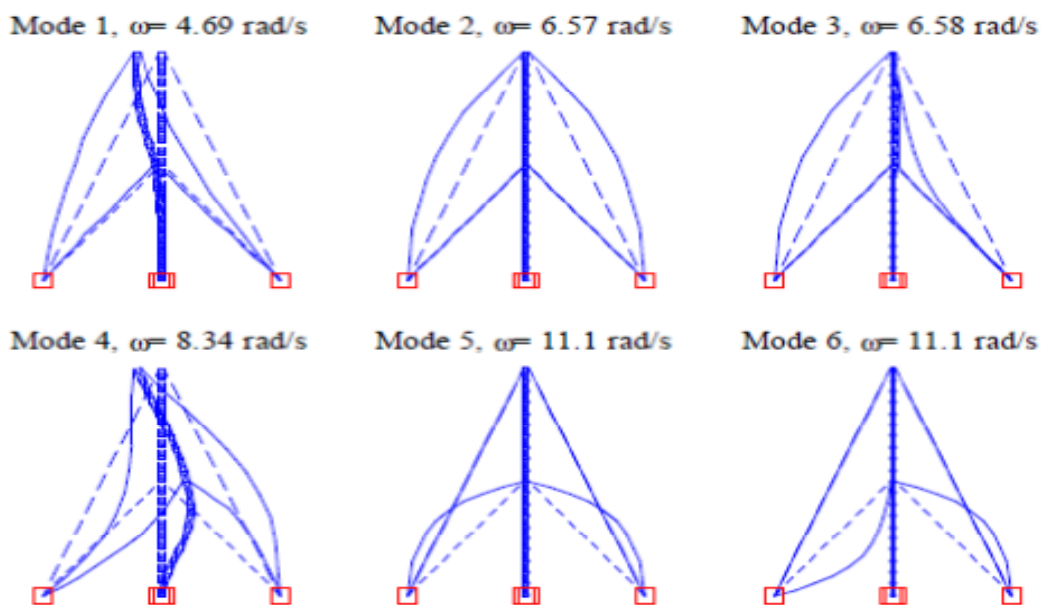
شکل ۷-۳۶: نتایج تغییر شکل دکل مهاری ۹۰ متری در تراز های مختلف

۷-۳- آنالیز مودال:

به کمک این نوع آنالیز می توان به مشخصات ارتعاشی سیستم ها دست یافت. از جمله مهمترین کاربردهای آن، به دست آوردن فرکانس های تشدید و شکل مودهای ارتعاشی یک سیستم (خواه به صورت یک سازه و خواه به شکل عضو از سیستم مکانیکی) می باشد.

محاسبه فرکانس سازه ها و محدود کردن آنها به مقادیر مشخص (و یا بیشینه کردن آنها) دو پیامد بسیار مفید به دنبال دارد که همواره مورد توجه و هدف مهندسین و طراحان است. این دو نتیجه عبارتند از: کاهش دامنه ارتعاش سازه و جلوگیری از وقوع حالت تشدید در پاسخ دینامیکی سازه. وضعیت تشدید وضعیتی است که فرکانس بار اعمالی با فرکانس طبیعی ارتعاش مساوی باشد. بنابراین اگر ابعاد یا شکل سازه طوری تغییر کند که با وجود حفظ کارایی و عملکرد پیش بینی شده برای سازه، فرکانس طبیعی آن افزایش یابد، دامنه ارتعاش و تغییر شکل سازه در اثر تحریکات دینامیکی کاهش خواهد یافت. این عامل، باعث کاهش تنش و خیز در سازه ها شده و بخصوص احساس امنیت در سازه های عمرانی را به دنبال دارد.

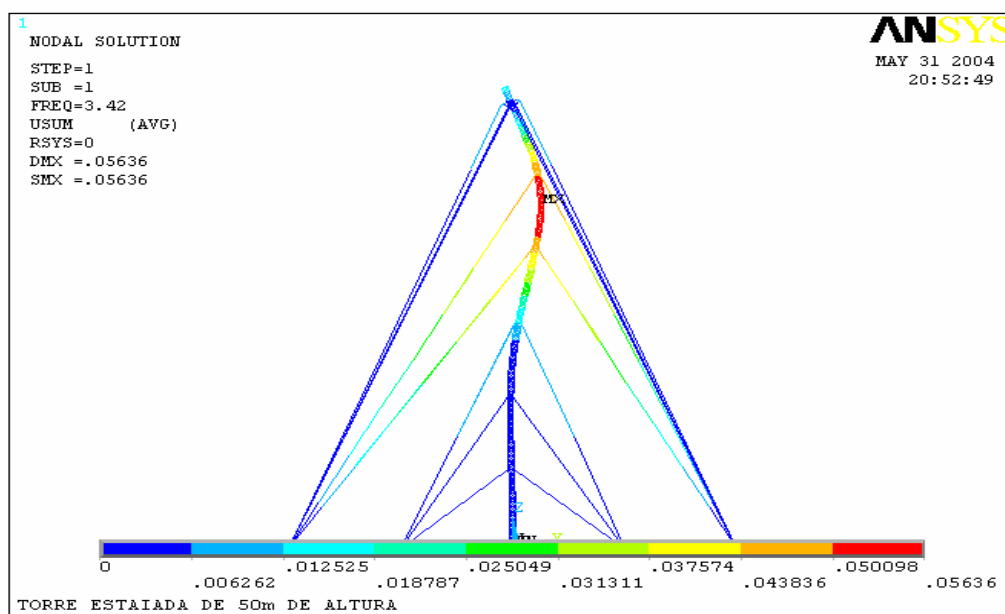
از آنالیز مودال جهت تعیین مقدار فرکانسهای طبیعی و شکل مود دکل های مخابراتی در فرکانس مزبور استفاده می گردد. مقدار این فرکانس بستگی به شکل سازه، نوع تکیه گاه و بارگذاری برج مخابراتی دارد. شکل مود ها در دکل های مهاری به دو دسته کلی تقسیم میشوند: ۱- شکل مود ها ناشی از ارتعاش فقط کابل ۲- شکل مود ها ناشی از ارتعاش دکل و کابل. در شکل ۷-۳۷ شش مود اول دکل مهاری با ۲ سطح مهاری به همراه فرکانس مربوط نشان داده شده است.



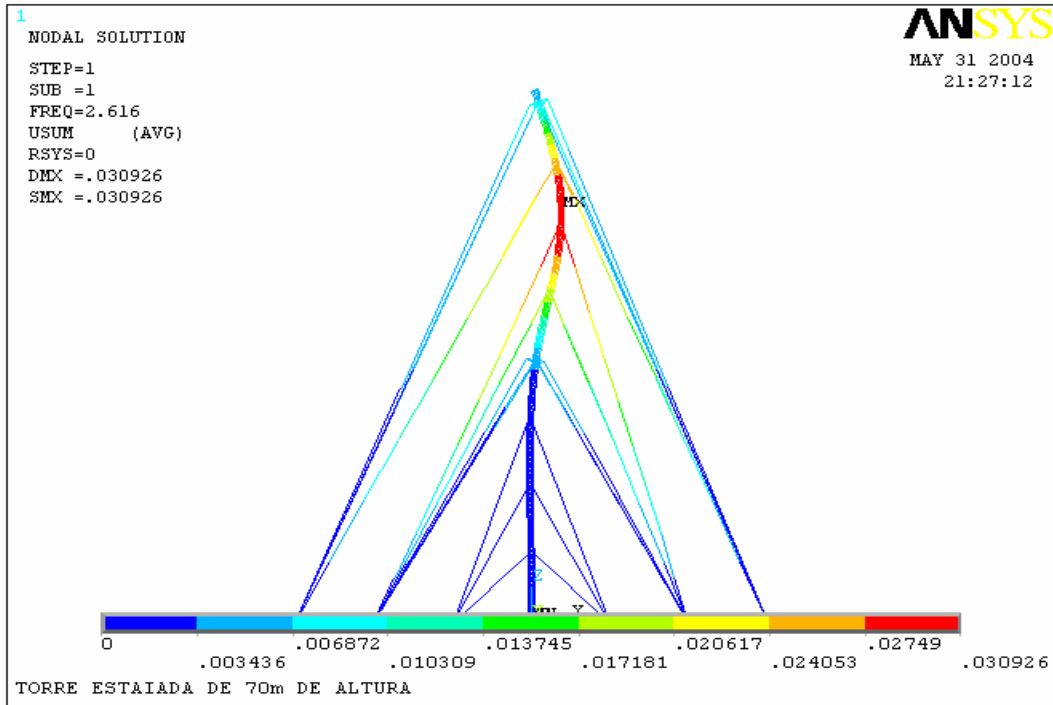
شکل ۷-۳۷: شش مود دکل مهاری به همراه فرکانس مربوطه

با استفاده از نرم افزار ANSYS تغییر شکل دکل مهاری ۵۰، ۷۰ و ۹۰ متری در مود اول را به صورت اشکال

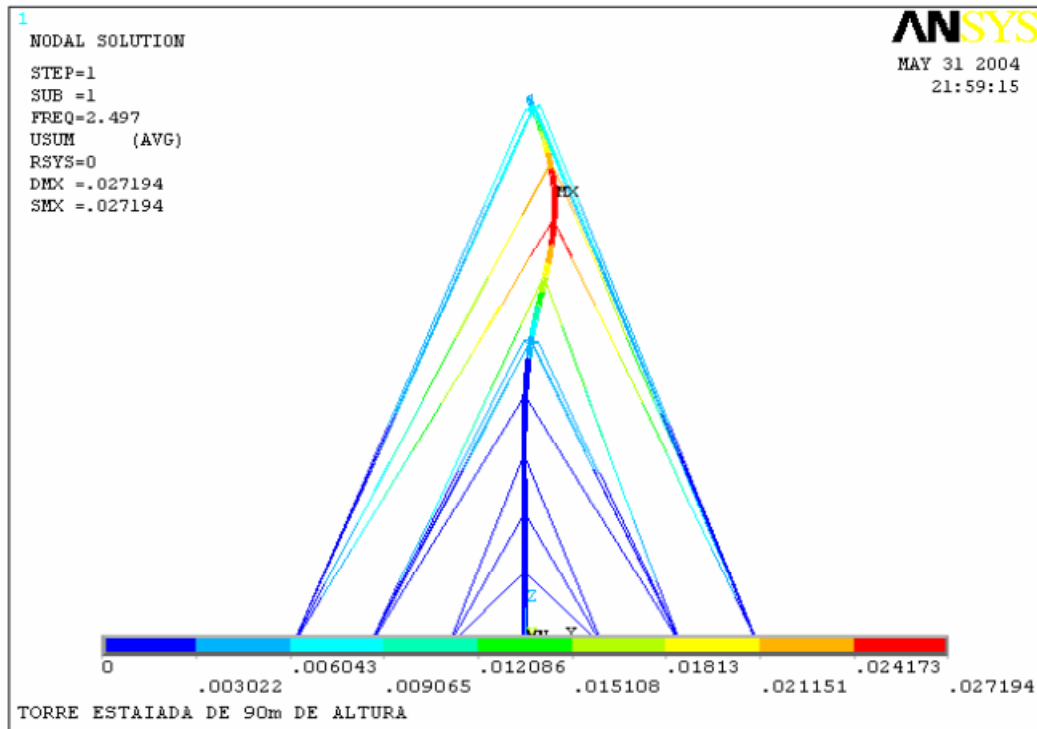
۷-۳۸ الی ۷-۴۰ نمایش می‌دهیم.



شکل ۷-۳۸: تغییر شکل دکل مهاری ۵۰ متری در مود اول

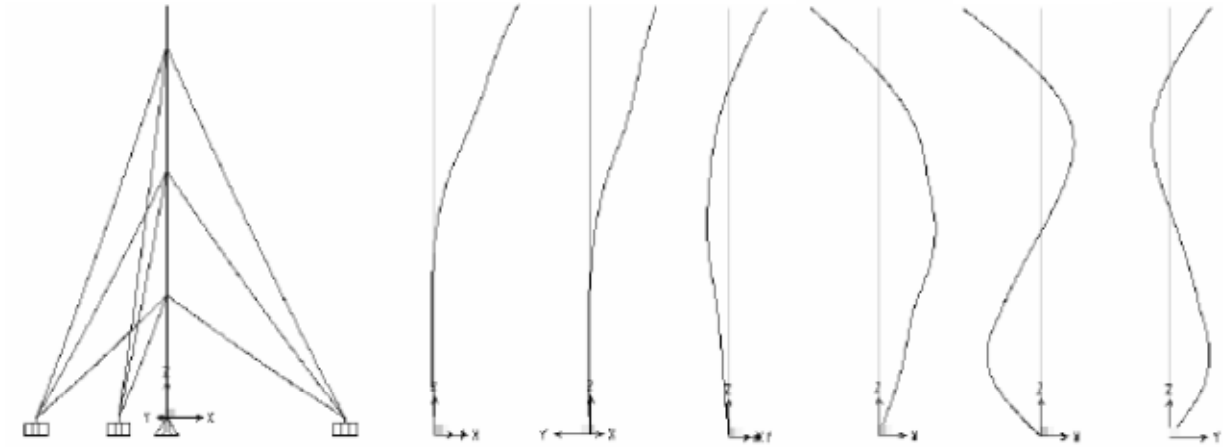


شکل ۷-۳۹: تغییر شکل دکل مهاری ۷۰ متری در مود اول

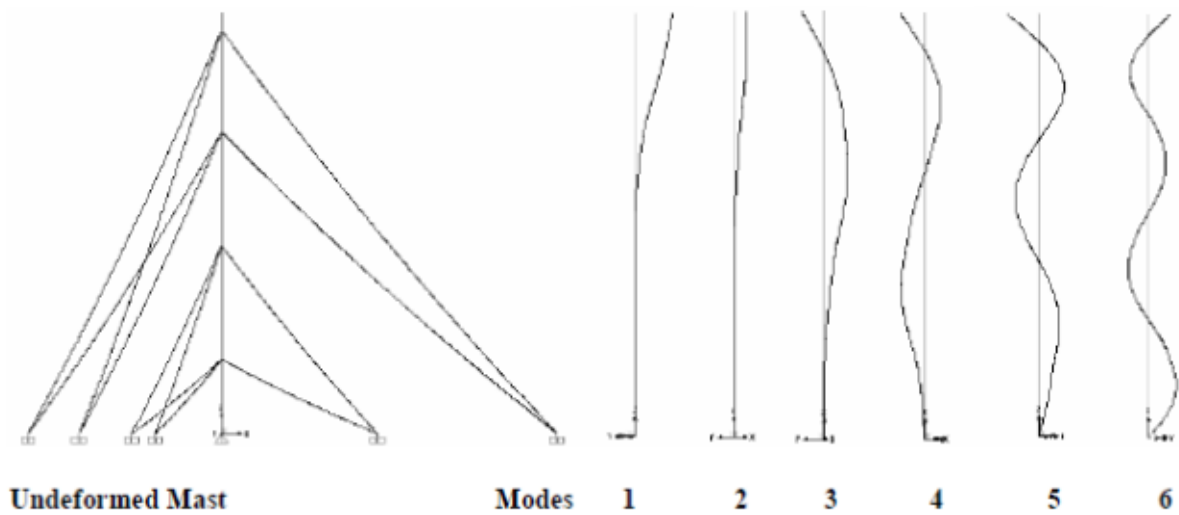


شکل ۷-۴۰: تغییر شکل دکل مهاری ۹۰ متری در مود اول

همچنین در نمای کلی تغییر شکل دکل مهاری به ترتیب با سه و چهار سطح مهاری در شش مود اول آن در اشکال ۴۱-۷ الی ۴۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴۱-۷: تغییر شکل دکل با سه سطح مهاری در شش مود اول آن



شکل ۴۲-۷: تغییر شکل دکل با چهار سطح مهاری در شش مود اول آن

فصل هشتم

مدل سازی دکل مهارسی با

SVM

۸-۱- مدل سازی دکل مهاری با SVM

ماشین های بردار پشتیبان همانند شبکه های عصبی مصنوعی، یک نوع الگوریتم داده کاوی است . از ماشین های بردار پشتیبان تاکنون در زمینه های مختلفی مانند تشخیص چهره، طبقه بندی متون، بیوانفورماتیک و ... استفاده شده است . مهم ترین کاربرد ماشین های بردار پشتیبان در طبقه بندی و خطی سازی داده ها است . مراحل حل مسئله در الگوریتم ماشین های بردار پشتیبان همانند الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی به دو مرحله آموزش و مرحله آزمایش یا صحت سنجی تقسیم می شود. برای تولید مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان داده ها با نسبت ۷۰ به ۳۰ به دو دسته آموزش و ارزیابی تقسیم میشوند. (۲۱۰ نمونه برای آموزش و ۹۰ نمونه برای ارزیابی) مدل مورد نظر توسط داده های مجموعه آموزش تولید شده و کارایی آن در پیش بینی جمعیت مورد نظر به کمک داده هایی که در طول آموزش مدل تجربه نشده اند (مجموعه داده های آزمایش) بررسی میگردند.

برای بررسی نتایج به دست آمده از مرحله آزمایش مدل SVM می توان از شاخص های آماری زیادی استفاده کرد . با این وجود در پژوهش حاضر، از میان شاخص های آماری متعدد در دسترس، شاخص هایی برای ارزیابی درستی عملکرد مدل انتخاب شده است که با استفاده از آن ها میزان خطای موجود در نتایج به دست آمده، میزان همبستگی داده ها، پراکندگی نتایج حاصل نسبت به مقادیر واقعی نشان داده شده و ارزیابی شود . بر این اساس عملکرد مدل SVM با کمک پارامترهای آماری ضریب همبستگی، جذر مربع میانگین خطاها، شاخص پراکندگی وانحراف، ارزیابی شده

است. ضریب همبستگی، نوع و میزان همبستگی موجود بین داده های ورودی و خروجی مدل را تعیین می کند و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می شود. (رابطه ۸-۱)

$$CC = \frac{\sum (T_i - \bar{T}_i)(O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum (T_i - \bar{T}_i)^2 \sum (O_i - \bar{O}_i)^2}}$$

در این رابطه O_i معرف مقدار خروجی شبکه برای هر داده، T_i مقدار واقعی برای i امین خروجی، O_i میانگین خروجی ها و T_i میانگین مقادیر واقعی است.

جذر مربع میانگین خطاها بیانگر میزان خطای با بعد موجود در نتایج به دست آمده است. میزان جذر مربع

میانگین خطاهای موجود در نتایج خروجی هر یک از مدل ها با رابطه زیر محاسبه می شود: (رابطه ۸-۲)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - T_i)^2}{N}}$$

در رابطه فوق N بیانگر تعداد کل نمونه هاست. در این پژوهش، مدلی که دارای CC بیشتر و $RMSE$ کمتر بوده، به عنوان مدل بهینه انتخاب شده است.

همچنین از بین ده تابع کرنل موجود نرم افزار SVM (ذکر شده در قسمت ۵-۹) پس از انجام آنالیزهای متفاوت با تمام پارامترهای موجود در ده تابع کرنل نرم افزار، تابع کرنل پایه شعاعی (rbf) که در تحقیقات متعددی به عنوان بهترین تابع کرنل انتخاب شده در این تحقیق نیز به عنوان تابع کرنل برتر انتخاب و استفاده میشود. در این پژوهش برای رسیدن به یک مدل بهتر با ترکیب های مختلفی از پارامترهای تابع کرنل

(C, ϵ و ζ) مدل های متعددی را ایجاد و مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. مقادیر (C, ϵ و ζ) از مهم ترین پارامترهای تعیین کننده ساختار یک مدل SVM با تابع کرنل rbf است، بنابراین در ادامه، مقدار این سه پارامتر از طریق آزمون و خطا تعیین می‌گردد. مقادیر بهینه (C, ϵ و ζ) به گونه ای تعیین شده که نتایج به دست آمده دارای بیشترین مقادیر پارامتر ضریب همبستگی و کمترین مقادیر RMSE باشد. لازم به ذکر است نرم افزار svm دو حالت کلی برای حل مسئله دسته بندی دارد: C-SVM و NU-SVM تفاوت این دو در چگونگی بیان مسئله به صورت یک مسئله بهینه سازی و همچنین پارامتر مورد تنظیم است. در این پژوهش مسئله در هر دو حالت کلی برای هسته rbf حل شده، بطوریکه برای حالت NU-SVM برای پارامتر NU از مقادیر ۰.۱، ۰.۲۵، ۰.۵، ۰.۷۵، ۰.۹، ۱ استفاده شده است و برای حالت C-SVM برای پارامتر C از مقادیر ۰.۱، ۱، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده برای CC و RMSE در دو حالت دسته بندی کلی ذکر شده و با توجه به نتایج مطلوب تر روش C-SVM در محاسبه پارامترهای ذکر شده میانگین خطاهای موجود و ضریب همبستگی جهت جلوگیری از انجام عملیات غیر مفید در حجم بالا برای این پژوهش فقط محاسبات مربوط به روش C-SVM آورده میشود.

۸-۲-ارائه مدل SVM برای محاسبه تغییر مکان راس دکل

برای تولید و ارزیابی مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان جهت پیش بینی پاسخ دینامیکی دکل های مهاری (محاسبه تغییر مکان راس دکل) تحت اثر نیروی زلزله از تعداد ۲۱۰ نمونه دکل مهاری (مجموعه داده های آموزش) و ۹۰ نمونه دکل مهاری (مجموعه داده های ارزیابی) که توسط نرم افزار ANSYS آنالیز شده اند استفاده میشود (جدول ۸-۱، ۸-۲). لازم به ذکر است تمام ابعاد موجود بر حسب متر است.

ردیف	x1	x2	x3	x4	n	ارتفاع دکل	Anslys Deflection	Svm Deflection	Error Percent
1	7.5	4.9	2.8	0.9	8	25.4	3.46	3.96	14.39
2	11.4	11.3	8.8	2.5	12	110.6	13.2	15.4	16.64
3	10.9	10.2	10.2	1.9	11	114.1	13.57	15.59	14.87
4	6	12.1	6.3	1.6	7	51.5	5.79	6.26	8.12
5	11.8	10	6.3	1.7	7	49.5	5.54	6.45	16.35
6	7.5	12.3	9.1	2.2	12	114.6	13.12	15.3	16.58
7	11.3	12.3	8.9	2.3	7	68	7.59	8.32	9.57
8	6.8	11.7	3.9	2.1	7	37.2	5.01	5.55	10.85
9	4.4	5.4	7.2	2.5	7	51.1	5.75	6.32	9.99
10	12.5	10.3	7.9	1.2	8	66.8	7.54	8.76	16.22
11	10.8	10.6	8.5	0.8	11	96.4	11.32	12.33	8.93
12	10.8	6	2.9	1.9	8	28.2	4.09	4.43	8.22
13	6.5	4	11.6	2.5	9	99.3	11.95	13.83	15.71
14	6.4	4.9	10.4	2	10	100.5	12.03	13.76	14.37
15	5.6	8.2	4.9	2.1	10	54.4	6.79	7.85	15.54
16	8.8	11.6	4	2	12	57.6	7.39	8.17	10.62
17	4.8	12	2.8	2.2	10	39.4	5.16	5.83	12.94
18	12.3	8.8	11.3	0.9	10	111.4	13.18	15.41	16.9
19	9.6	6.6	3.3	2.3	11	41.9	5.35	5.82	8.84
20	11	12.2	3.6	1	11	49.2	5.73	6.37	11.11
21	6.7	7.5	6.6	2	8	55.7	7.11	7.81	9.88
22	8.8	7.5	8	1.1	8	64.6	8	9.24	15.54
23	11.7	11.6	5.2	2.1	10	60.5	7.26	7.85	8.16
24	10.2	10.9	5.2	2.3	11	65.2	7.57	8.26	9.08
25	9.8	8.4	11.3	1.8	11	123.2	13.8	15.82	14.64
26	11.3	10.5	7	1.8	9	68.3	8.18	9.03	10.37
27	8.6	10.2	4.5	2.8	7	40	4.68	5.35	14.32
28	6.1	11.2	8.6	1.2	8	72.6	8.82	9.83	11.45
29	10.8	10.5	7.1	2.1	8	62.3	7.06	7.68	8.77
30	12.4	7	3.3	2.6	11	42.6	5.38	6.18	14.79
31	7.1	7.8	3.2	2.2	8	32.4	3.91	4.27	9.16
32	4.3	5.4	8.4	2.5	8	66.7	7.52	8.75	16.42
33	8.5	4.2	8.1	1.8	12	95.1	10.8	11.82	9.42
34	7.6	11	5.3	1.2	9	54.6	7	8.19	16.99
35	12.5	7.3	9.3	2	9	83.7	9.83	11.32	15.11
36	3.8	10.3	3.4	1.9	8	36	4.4	5.08	15.55
37	12.1	5.7	9.5	2.1	9	83.8	9.59	10.92	13.87
38	12.6	6.1	10	1.3	11	107.4	11.98	13.21	10.3
39	5.5	6	6.3	1.5	12	76.8	9.06	9.95	9.85

40	10.7	5.3	3.6	2.3	9	36.4	4.83	5.47	13.18
41	4.8	6.7	7.4	1.4	12	89.5	10.81	12.05	11.47
42	12.8	11.4	3.5	2.6	8	38.5	4.66	5.38	15.38
43	8.7	5.5	11.4	1.3	12	132.2	14.91	17	14.03
44	7.6	10.7	11.3	0.9	10	113.3	13.17	14.69	11.52
45	5.8	10.4	6.9	2.3	11	81.7	9.99	10.99	10.05
46	8.5	5.2	11.4	2.2	12	132.8	15.52	16.96	9.28
47	4.7	6.4	9.7	2.1	12	115.2	13.36	14.78	10.6
48	10	5	9.5	2.4	8	73.9	8.3	9.32	12.29
49	10.5	4	9.6	1.8	9	82.6	9.59	10.41	8.58
50	7.7	10.9	9.2	2.1	10	95.8	10.67	11.82	10.8
51	8	8	11	2.6	7	76.6	9.34	10.56	13.07
52	5.3	3.9	6	1.6	7	41.5	5.19	5.89	13.53
53	10	12.7	2.8	2.2	11	42.9	5.4	5.86	8.6
54	5.8	7.9	6.9	1	9	64.1	7.55	8.18	8.4
55	8.7	7.4	5	2.3	11	59.7	6.68	7.54	12.8
56	12.3	11.9	11.5	2.7	12	141.1	16.03	18.22	13.66
57	6.9	5.8	9.5	2.8	9	84.6	9.74	10.52	8.02
58	10	12	3.9	1.6	7	37	4.48	4.87	8.68
59	11.2	8.1	4.1	1.5	12	54.7	6.39	7.29	14.08
60	6.9	4.2	8.5	2.4	10	83.1	10.02	11.46	14.37
61	6.2	9.3	6.6	1.1	9	63.2	7.86	8.9	13.28
62	11	7.3	2.9	2.2	11	38.5	5.19	5.89	13.55
63	11.8	5.9	7.6	1.5	8	60.6	7.33	8.51	16.15
64	9.1	11.5	9.3	2.6	9	88.5	10.68	12.01	12.46
65	5	8	10.2	1.8	10	101.6	11.74	13.4	14.11
66	6.7	4.8	6.4	1.4	11	70.2	7.88	8.71	10.53
67	5.9	11.2	5.3	2.2	7	45.2	5.44	6.18	13.6
68	6.1	11.4	9.5	1.3	10	98.2	11.66	12.9	10.64
69	9.9	7.3	10.3	2.5	12	123.1	13.76	15.62	13.52
70	4.1	12.7	7.1	1.1	10	77.7	9.25	10.77	16.43
71	5.9	5.2	8.8	2.3	7	60.3	6.94	8.1	16.71
72	12.5	10.6	10.7	2.2	12	130.5	14.87	16.55	11.27
73	6.4	9.4	4.8	1.3	10	53.9	6.85	7.73	12.83
74	8	10.4	6.9	2.5	12	88.8	10.45	11.49	9.91
75	4.2	4.6	3	2.2	12	39.8	5.04	5.78	14.62
76	10.7	6.8	10.3	1.1	9	90.3	10.52	11.79	12.05
77	12.2	7	4.6	1.2	12	58.8	7.41	8.22	10.94
78	10.7	5.3	6.7	2.2	8	54.4	6.8	7.37	8.37
79	10.6	11.5	8.2	1.3	12	103	11.84	13.54	14.35
80	6.3	12.2	7.2	1	8	63.6	7.85	8.65	10.17

81	7.2	11.2	9.7	2	7	71.4	8.17	9.1	11.37
82	11.8	10.5	3.1	2.3	11	43.8	5.81	6.35	9.22
83	5.6	4.5	8.7	1.2	7	57.9	6.69	7.31	9.22
84	5	7.7	10.4	2.2	8	82.7	9.22	10.06	9.14
85	10.3	6.7	8.1	2.7	7	58	7.16	7.89	10.2
86	6.8	11.1	7.1	2.3	7	56	6.37	7.02	10.25
87	4.8	3.9	7.4	1.8	10	72.3	8.39	9.5	13.25
88	5.6	7.3	4.1	2.6	11	50.9	6.44	7.38	14.54
89	6.4	10.6	9.1	2	8	76.3	9.36	10.91	16.53
90	9.4	9.1	6	1.3	12	76.4	8.95	9.76	9.08
91	11.8	8.5	9	0.9	11	99.4	11.88	13.76	15.83
92	5.6	7.7	11.7	2.6	7	80.5	9.57	10.4	8.67
93	4.9	10.9	8	1.3	7	60.2	7.45	8.42	12.98
94	10.2	9.2	11.3	1.1	7	78.1	9.4	10.27	9.26
95	9.6	9.6	9	1	10	91.6	11.03	12.21	10.67
96	8.6	7.7	9.5	1	12	113.2	13.05	14.34	9.91
97	3.9	9.6	7.6	2.2	9	72.6	8.39	9.53	13.54
98	12.3	6.7	3.2	1	9	33.3	4.25	4.78	12.46
99	6.8	3.9	4.2	1.1	10	42.8	4.88	5.62	15.2
100	4.3	5	3.6	2.2	9	36	4.79	5.38	12.41
101	10.4	10.1	7.2	2.1	9	69.8	8.26	9.54	15.48
102	7.9	12	3.2	1.9	10	42.7	5.59	6.13	9.62
103	7.1	5	6.9	1.4	9	61.6	7.4	8.61	16.39
104	8.5	9.5	3	2.4	7	29.9	4.12	4.61	11.86
105	5.4	10.7	4.2	1.1	12	58	7.1	7.97	12.26
106	7.2	5.1	7.6	1.2	12	89.9	10	10.96	9.6
107	9.7	11.7	8.9	1.3	7	66.4	7.42	8.48	14.27
108	11	11.8	8.7	0.9	11	99.7	11.43	13.1	14.6
109	8.8	3.9	7	1.1	10	68	7.66	8.57	11.88
110	11.8	5.5	4.3	1.4	8	37	4.18	4.55	8.94
111	4.7	9.1	9.9	1.3	10	99.5	11.19	12.99	16.07
112	7.2	6.2	9.4	2.2	8	74.2	8.99	9.89	10.03
113	7.8	12.8	8.6	0.9	11	99.7	11.97	13.05	8.99
114	9.6	11.5	7.2	2.4	9	71.5	8.82	10.27	16.4
115	6.9	12	3.4	0.8	11	46.8	6.09	6.89	13.2
116	11.1	9.5	5.1	2.1	10	57.5	6.61	7.6	15.04
117	9.3	12.2	4.1	1.4	12	58.7	6.76	7.36	8.88
118	5	8.2	7.9	2.5	10	81.8	10.03	11.36	13.27
119	11.4	10.2	6.3	1.2	11	74.4	8.32	9.27	11.43
120	10.1	6.1	3.1	2.7	11	39.8	4.69	5.26	12.06
121	8.1	9.1	6	1.4	11	70.5	8.49	9.92	16.9

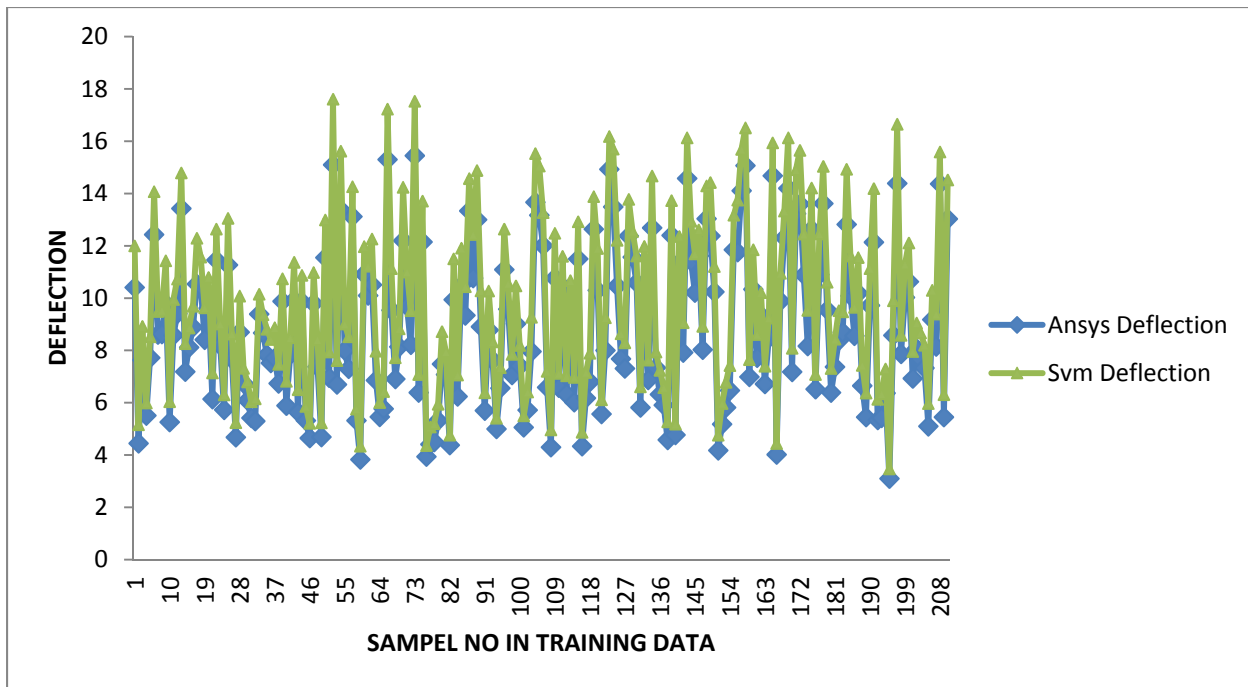
122	10.6	8.3	4.7	0.8	8	42	5.03	5.58	11.03
123	6.7	6.2	4	2.5	12	52.7	6.84	7.69	12.36
124	8.1	4.7	9.7	2.4	12	113.8	12.97	14.98	15.49
125	5.8	7.7	6	1.1	10	62.8	7.72	8.61	11.57
126	11	5.9	8.7	2.7	8	69.5	8.4	9.24	10.03
127	10	12.5	7	2	9	70.5	8.47	9.59	13.22
128	7.9	5.2	3.2	1.4	12	41.8	5.57	6.2	11.24
129	11.1	7.5	9.7	2.3	12	116.5	13.57	15.21	12.1
130	5.4	11.8	7.8	2	8	68.4	8.6	9.78	13.68
131	10.8	8.6	3.1	1.5	9	34.9	4.81	5.6	16.49
132	11	4.3	10.1	1.1	7	66	8.33	9.34	12.09
133	11.6	6	6.2	2.2	9	57.8	6.5	7.5	15.4
134	12.6	10.7	5.3	2.5	10	60.9	7.06	8.02	13.54
135	11.3	4.1	8.9	1.2	7	58.7	7.02	8.14	15.9
136	4.5	8.6	3.5	1	10	41.1	5.44	6.09	11.99
137	4.4	3.9	3.7	2.7	8	32.5	3.8	4.28	12.5
138	11.4	11.4	3.6	1.2	7	34.2	4.12	4.77	15.85
139	4.6	6.5	5.5	2.7	12	69.7	8.59	9.75	13.48
140	11.2	9	9.4	1.4	11	104.4	12.12	13.79	13.81
141	11.6	10.8	4.9	1.7	8	46.8	5.69	6.26	10.1
142	6.3	12.3	7.8	2.6	11	92.9	11.02	12.61	14.44
143	7.5	4	11.2	2.7	11	118.7	13.48	15.56	15.46
144	11.2	4.1	7.9	2.3	8	61.7	7.06	8.05	14.09
145	11.6	9.2	4.1	0.9	12	55.2	6.7	7.45	11.15
146	9.8	4.8	4.6	0.9	7	33.3	3.79	4.38	15.53
147	11.2	10.9	11	1.6	11	122.5	13.79	15.48	12.29
148	10.3	10.8	6	2.3	11	73.1	8.72	9.84	12.82
149	9.4	11.3	3.3	0.9	7	32	3.89	4.21	8.18
150	5.7	7.3	9.4	1.1	8	74.2	8.68	10.09	16.19
151	5.2	12.1	4.3	1.7	11	56.8	6.44	7.51	16.54
152	12.4	11	10.5	1.8	8	86.3	9.92	10.97	10.6
153	10.6	4.9	5.2	1.5	9	48	5.77	6.4	10.93
154	6.7	4	6.4	1.3	8	50.1	5.72	6.43	12.36
155	6.1	11.2	4.7	1.7	11	59.9	7.03	7.88	12.13
156	7.1	4.6	4.2	1.2	9	39.4	5.11	5.91	15.75
157	5.5	9.4	7.7	1.4	8	64.7	7.2	7.88	9.42
158	6.4	5.9	6.3	1.4	11	70.3	8.63	9.35	8.35
159	8.2	10.2	10.2	2.1	11	114.3	13.23	15.1	14.14
160	6.7	11.1	5.9	1.2	7	47.7	5.52	6.02	8.99
161	4.7	7.2	8.4	2.7	7	60.3	6.83	7.85	14.91
162	11.5	10.5	10.6	0.8	10	106.7	11.96	12.98	8.57

163	11.1	4.2	3.9	2.1	8	33.6	4.71	5.3	12.47
164	4.5	12.6	9	1.4	10	95	11.2	12.6	12.5
165	12.2	10.5	9.3	2.3	12	115.1	13.14	14.19	8.02
166	6.4	7.1	3.7	0.8	11	44.9	5.56	6.11	9.88
167	3.9	6.8	5.1	2.1	11	59.9	6.96	7.94	14.01
168	6.8	8.9	10.1	2.1	8	81.7	9.24	10.4	12.58
169	5.5	5.3	11.2	1.2	11	118.5	13.68	15.57	13.79
170	11	9.8	6.7	1.3	8	58	7.2	8.28	15.06
171	7.6	5.2	6.8	2.7	12	82.7	9.54	11.04	15.76
172	7.2	12.4	11.6	2.3	7	84.3	10.13	11.65	15.03
173	6	3.9	10.3	1	8	77	9.49	10.33	8.82
174	6.1	12.6	9.9	1.8	8	83.7	9.5	10.55	11.06
175	8.3	9.4	7.3	0.9	11	83.3	9.43	10.19	8.07
176	6	10.2	6.3	2.4	9	63	7.99	8.91	11.49
177	11.1	7.6	10.4	2.3	10	103.5	12.27	14.13	15.17
178	9.2	11.7	11.7	1.3	9	106.6	12.45	14.17	13.85
179	9.4	11.3	8	2.7	10	86	10.54	11.45	8.67
180	5.8	10.6	10.3	1.9	7	74.3	8.9	9.82	10.35
181	7.6	9.8	3.7	2.7	7	34.7	4.59	5.18	12.95
182	9.4	8.5	6	1.7	9	58.2	7.37	8	8.54
183	12.1	5.9	11.2	1.7	11	119.6	14.07	15.23	8.22
184	9.8	6.9	2.8	1.3	10	33.4	4.33	4.95	14.34
185	7.2	5.2	10.3	1.6	12	120.1	13.92	15.69	12.69
186	4.6	12.7	7.4	0.9	8	65.4	7.89	9.13	15.75
187	10.2	8	10.4	1.8	9	93	11.32	12.96	14.45
188	10.5	7.2	4.3	1.6	12	56.1	7.13	7.93	11.22
189	9.4	12.2	5.3	1.1	9	55.7	6.77	7.61	12.4
190	9	11.4	8.4	0.9	7	62.7	7.87	9.06	15.14
191	8	3.8	9.9	1.7	12	114.4	13.68	15.81	15.56
192	5.4	9.9	7.7	2.6	7	58.7	6.89	7.95	15.4
193	10.8	8.3	11.3	2.7	12	135.3	15.56	17.01	9.3
194	4.9	9.2	7.6	1.6	12	94.4	11.4	12.98	13.9
195	4.5	9.4	3.5	1.1	9	38.5	4.67	5.19	11.13
196	7.8	8.3	6.2	0.8	8	52.5	6.22	7.04	13.11
197	8.3	11.4	9.4	2	10	98	11.02	11.93	8.24
198	11.2	10.3	8.3	1.7	9	78.4	8.94	10.1	13.02
199	8.3	11.8	4.5	1.8	7	40.6	4.55	5.07	11.33
200	6.3	6.7	8.4	2.8	10	85.1	9.88	11.05	11.81
201	4.2	10.4	6.6	1.6	10	71.4	8.88	10.24	15.26
202	6.4	10.2	11.8	1.2	12	141.2	16.11	17.73	10.06
203	12.1	9	9.2	2.6	8	76	8.71	9.82	12.73

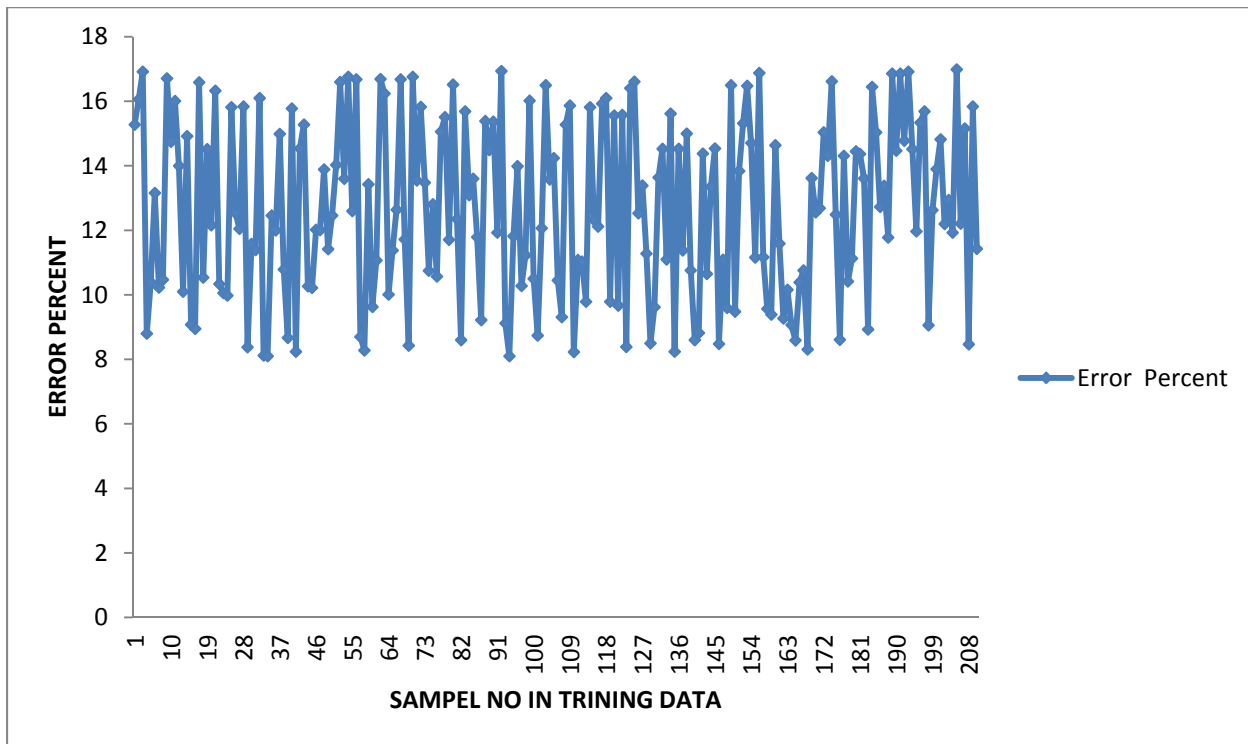
204	12.2	9.1	7.8	2.4	7	58.3	7.35	8.04	9.34
205	6.1	11.4	4.3	2.7	10	52.8	5.95	6.72	12.93
206	9.3	10.5	11.4	1.2	12	137.1	15.74	18.2	15.66
207	7.6	6.1	11	2.2	7	74.3	8.62	9.92	15.03
208	10	9.5	7.9	1.8	9	74.5	8.4	9.53	13.45
209	9.9	4.6	10.6	1.3	8	80.1	8.97	10.43	16.33
210	9.6	11.3	10.6	2.6	12	130.5	14.91	16.18	8.55

جدول ۸-۱: مجموعه داده های آموزش در محاسبه تغییر مکان راس دکل مهاری

با توجه به نتایج جدول ۸-۱ نمودار مقایسه تغییر مکان راس دکل مهاری توسط نرم افزار ANSYS و SVM در شکل ۸-۱ همچنین نمودار در صد خطای حاصل از محاسبه تغییر مکان راس دکل مهاری توسط نرم افزار SVM نسبت به نرم افزار ANSYS در شکل ۸-۲ نشان داده شده است.



شکل ۸-۱: نمودار مقایسه تغییر مکان راس دکل مهاری توسط نرم افزار ANSYS و SVM



شکل ۸-۲: نمودار درصد خطای حاصل از محاسبه تغییر مکان راس دکل توسط نرم افزار SVM نسبت به نرم افزار ANSYS

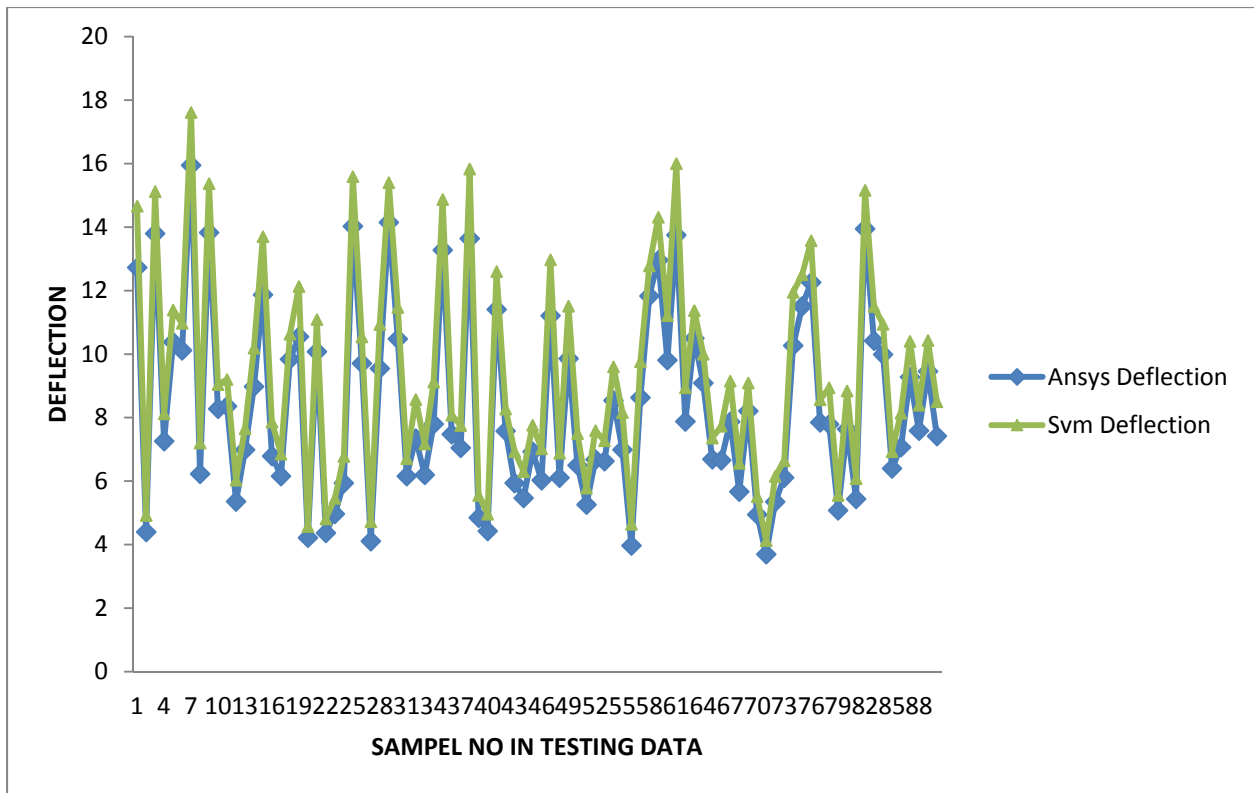
ردیف	x1	x2	x3	x4	n	ارتفاع دکل	Ansys Deflection	Svm Deflection	Error Percent
1	10.5	9.8	3.5	1.1	7	31.9	4.32	4.93	14.03
2	9.7	12.1	7.9	2.4	12	101.4	11.64	13.6	16.84
3	6.3	10.8	5.2	1.6	12	69.6	7.76	8.63	11.18
4	8.2	8.2	7.9	1.6	12	96.7	11.18	12.31	10.1
5	10.6	5.3	4.8	2.4	7	36.5	4.77	5.56	16.52
6	5.1	4.1	9.7	1	7	63.3	7.81	9.03	15.62
7	12.7	5.8	11.6	2.6	7	78	8.78	10.02	14.1
8	7.2	6.6	10.1	1.6	9	89	10.68	11.57	8.34
9	12.6	4.3	4.6	1.9	10	47.6	6.17	7.07	14.52
10	12.7	12.7	11.2	1.6	12	137.5	15.75	17.5	11.12
11	8.6	8.6	11.2	2.2	8	89.2	10.84	12.26	13.12
12	5.2	4.2	3.7	2.5	12	47.4	5.86	6.8	16.06
13	5	6.1	9	1	10	88.1	10.08	10.91	8.22
14	7.8	5.9	5.1	1.3	12	63.3	7.62	8.6	12.83
15	11.8	8.4	9.8	1.2	8	78.2	8.85	9.88	11.65
16	11.8	4	9	1.9	10	86.9	10.37	11.88	14.58
17	11.3	6.5	6.6	2.1	10	68	8.55	9.27	8.39
18	12.7	9.7	7.6	1.1	9	71.6	8.17	9.34	14.27
19	8.7	8	7.9	1.3	7	56.7	6.54	7.07	8.14
20	4.9	7.8	4.4	1.1	10	48.5	5.67	6.29	10.96
21	4.4	8.3	9.3	1.8	10	93.8	10.43	11.47	10.01
22	6.5	10.6	11.2	2.3	8	91.3	10.91	12.48	14.35
23	6.8	9	4.9	2.1	10	55.2	6.4	7.13	11.47
24	4.4	3.8	11.7	1.9	10	111	12.96	14.99	15.69
25	12.3	12.8	9.9	2	10	103.9	12.3	14	13.84
26	10.9	11	4.4	1.6	8	43.4	5.82	6.71	15.23
27	8.9	5.3	5.4	2.2	12	66.9	8.02	9.22	15.01
28	3.8	7.9	3.8	2.7	9	41	5.25	5.7	8.54
29	4.8	5.4	5.3	1.8	10	54.9	6.29	7.3	16
30	5	9.5	10.2	2.6	9	93.7	11.24	12.82	14.07
31	5.3	5	5.3	1.6	8	43.7	5.01	5.5	9.74
32	9.3	11.2	3.6	2.7	8	39.1	4.45	5.07	13.92
33	4.2	5	5.4	0.9	8	43.7	5.8	6.75	16.3
34	8.9	10.6	7.8	1.8	10	82.6	9.85	11.33	15.04
35	9.9	5.2	6.4	1.9	7	45.5	5.75	6.31	9.81
36	4.4	11.1	11.1	1	11	123.1	14.14	16.31	15.37
37	11.1	10.2	6.7	2.8	7	53.2	6.76	7.89	16.77
38	6.6	6.6	11	1.7	10	107.3	12.32	13.73	11.46
39	10.1	9.1	5.5	1.9	7	44	5.11	5.57	8.97

40	10.3	9.7	10.7	2.7	9	98	11.83	13.33	12.69
41	10.3	12.4	4.4	1.7	7	40.5	5.29	5.93	12.18
42	10.2	7.3	6.2	1.6	11	70.9	8.69	9.87	13.58
43	12.7	10.1	10	1	9	91.1	10.76	11.8	9.65
44	11.4	8.6	5	1.1	11	59.7	6.7	7.7	14.96
45	6.5	5.8	4.7	2.2	7	36.2	4.66	5.14	10.34
46	9.3	4.5	5.7	1.7	10	57.5	7.08	8.22	16.15
47	12.7	12	8	1.1	12	101.1	11.57	12.66	9.41
48	10.7	5.9	3.4	1.8	12	45.1	5.19	5.82	12.06
49	8.1	10.9	4.4	1.9	10	52.4	6.14	6.77	10.26
50	12.7	4.6	3.9	2.6	11	46.2	5.63	6.48	15.15
51	8.3	5.2	6.6	1.9	7	46.7	5.45	6.27	15.08
52	7.5	12.5	5.4	1	7	45.9	5.49	6	9.21
53	12.3	10.8	9.5	2.4	9	89.2	10.65	11.8	10.77
54	5.4	5.8	9.8	0.8	10	94.8	10.62	11.86	11.65
55	10.2	8.2	10.2	2.4	10	102.4	11.45	12.41	8.41
56	9	11.1	7.5	2.1	9	73.2	8.2	9.33	13.8
57	7.1	11.7	5.2	1.9	10	60.4	7.66	8.33	8.76
58	6.7	4.3	8.8	1.5	12	102.6	12.11	13.9	14.78
59	8.1	8.4	4.6	1.3	11	55.7	6.61	7.44	12.63
60	10.3	6.8	9.4	1.8	12	112	12.7	14.3	12.56
61	9.4	12.1	10.7	1.3	8	88.3	10.25	11.22	9.46
62	10.4	4.5	8.5	2.3	11	91.8	10.48	11.42	8.99
63	8.5	11.8	8.7	2.4	12	109.9	12.41	13.47	8.58
64	10.9	10.7	8.2	2	7	61.9	7.45	8.54	14.59
65	6.5	9.4	9.9	1	12	119.3	13.4	15.23	13.65
66	10.3	10.1	8.1	1.9	12	101.1	12.13	13.83	13.98
67	11.8	8.1	3.7	1.4	10	42.8	5.3	6.1	15
68	8.2	9.3	3.9	1.1	7	33.8	4.1	4.45	8.46
69	6	11.2	9.7	1	7	70.4	8.05	9.24	14.76
70	7.5	7.3	8.8	2.3	10	88.8	10.74	12.54	16.73
71	5.8	11.9	7.6	0.9	7	58.4	6.69	7.34	9.66
72	10	11.9	9.4	1.4	12	116.7	13.31	14.74	10.78
73	5.8	9.3	11.6	2	7	80.9	9.04	10.41	15.18
74	4.5	12.4	6.4	1.3	11	77.7	8.65	9.68	11.86
75	8.5	4.5	3	2.5	10	34	3.9	4.29	9.92
76	8.7	9.9	7.6	2	10	80.3	9.09	10.25	12.71
77	5.3	12.1	6.4	2.6	8	59.5	7.43	8.16	9.84
78	5.7	5.2	11.6	1.1	7	75.9	8.52	9.37	9.99
79	5.6	4.2	11.1	2.5	9	95.5	11.24	12.94	15.16
80	7.1	6.3	6.9	1.3	12	83.5	9.34	10.1	8.17

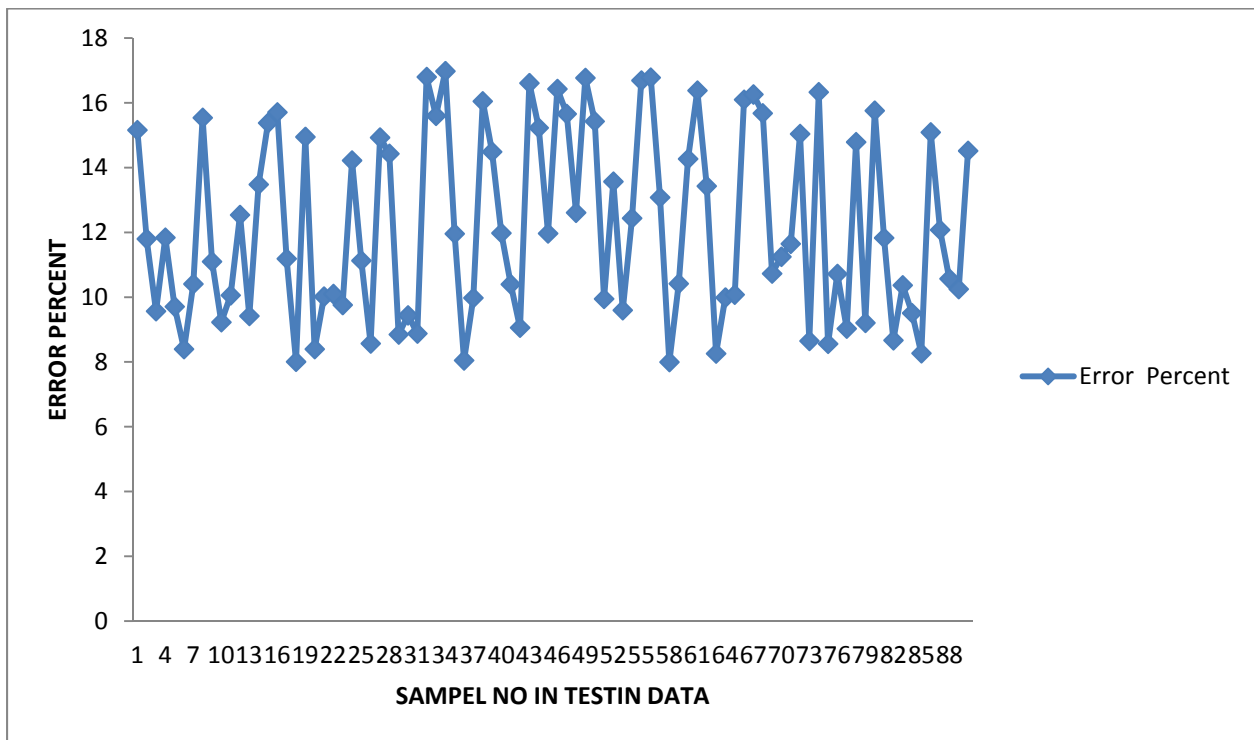
81	11.1	9.6	2.8	2.8	7	29.2	3.61	4.15	14.98
82	6.3	6.9	5.4	1.1	11	62	7.74	9.01	16.45
83	11.8	12.3	4.2	1.6	7	39.1	4.41	5.14	16.45
84	4.3	5.9	10.9	1.5	10	105.5	12.22	13.71	12.23
85	6.2	12.5	8.5	1	11	98.5	11.19	12.55	12.16
86	3.9	5.6	6.3	1.1	8	50.8	6.12	7.08	15.71
87	3.8	7.2	8.6	1.7	9	77.7	9.54	10.4	9
88	9.8	5.2	6.2	1	12	74.4	8.59	9.65	12.3
89	9.7	5.9	10.8	2.3	10	105.4	11.94	13.36	11.87
90	10.2	6	4.3	1.7	11	50.7	6.44	7.2	11.79

جدول ۲-۸: مجموعه داده های ارزیابی در محاسبه تغییر مکان راس دکل مهاری

با توجه به نتایج جدول ۲-۸ نمودار مقایسه تغییر مکان راس دکل مهاری توسط نرم افزار ANSYS و SVM در شکل ۳-۸ همچنین نمودار در صد خطای حاصل از محاسبه تغییر مکان راس دکل مهاری توسط نرم افزار SVM نسبت به نرم افزار ANSYS در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۸-۳: نمودار مقایسه تغییر مکان راس دکل مهاری توسط نرم افزار ANSYS و SVM



شکل ۸-۴: نمودار درصد خطای حاصل از محاسبه تغییر مکان راس دکل توسط نرم افزار SVM نسبت به نرم افزار ANSYS

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز داده های آموزش و ارزیابی در جداول ۸-۱ الی ۸-۲ نتایج بدست آمده از مدل های تولیدی بر اساس ترکیب های متفاوتی از پارامترهای ζ ، ϵ و C را نشان میدهد.

ζ	Training Data		Testing Data	
	CC	RMSE	CC	RMSE
.۵	.۷۴۳۲	.۱۹۹۸	.۷۳۱۱	.۲۱۵۱
۱	.۷۹۱۱	.۱۸۸۰	.۷۸۱۵	.۱۹۹۰
۱۰	.۸۹۱۲	.۱۴۱۱	.۸۸۳۱	.۱۶۲۰
۵۰	.۹۵۳۲	.۱۸۴۹	.۹۴۱۰	.۱۹۵۱
۱۰۰	.۹۶۲۰	.۱۰۱۲	.۹۵۱۵	.۱۲۱۴
۲۰۰	.۹۴۴۰	.۱۷۱۳	.۸۷۱۳	.۱۹۳۵
۳۰۰	.۹۰۱۵	.۱۹۱۲	.۸۸۴۷	.۱۷۱۸
$\epsilon = .001$ $C=۱۵۰$				

جدول ۸-۳: ارزیابی مدل به ازای مقادیر مختلف پارامتر ζ تابع کرنل

ϵ	Training Data		Testing Data	
	CC	RMSE	CC	RMSE
.۰۰۰۱	.۹۰۸۱	.۱۳۲۰	.۸۷۳۸	.۱۹۱۰
.۰۰۱	.۹۵۳۲	.۰۸۴۹	.۹۴۱۰	.۰۹۵۱
.۰۰۵	.۹۳۲۰	.۰۹۱۲	.۹۱۵۰	.۱۰۱۸
.۰۱	.۷۹۸۰	.۱۹۱۰	.۷۸۷۰	.۱۹۹۸
.۰۵	.۸۹۴۰	.۱۵۲۰	.۸۸۳۱	.۱۶۱۴
.۱	.۷۵۳۰	.۲۰۰۱	.۷۴۲۱	.۲۰۹۱
$\zeta = 50$ $C=۱۵۰$				

جدول ۸-۴: ارزیابی مدل به ازای مقادیر مختلف پارامتر ϵ تابع کرنل

C	Training Data		Testing Data	
	CC	RMSE	CC	RMSE
.۱	.۷۳۴۱	.۲۱۸۵	.۷۲۲۵	.۲۲۱۱
۱	.۷۹۴۰	.۱۹۴۰	.۷۸۷۱	.۱۹۹۰
۱۰	.۸۳۴۱	.۱۷۱۲	.۸۱۳۰	.۱۸۲۰
۵۰	.۹۰۱۲	.۱۱۱۰	.۸۹۱۱	.۱۱۸۸
۱۰۰	.۹۲۱۳	.۰۹۸۰	.۹۱۴۰	.۱۰۱۱
۱۵۰	.۹۵۳۲	.۰۸۴۹	.۹۴۱۰	.۰۹۵۱
۲۰۰	.۹۳۱۵	.۰۹۰۴	.۹۲۷۵	.۱۶۱
$\varepsilon = .001 \quad \zeta = 5.0$				

جدول ۸-۵: ارزیابی مدل به ازای مقادیر مختلف پارامتر C تابع کرنل

۸-۳-ارائه مدل SVM برای محاسبه فرکانس طبیعی دکل مهاری در مود اول

برای تولید و ارزیابی مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان جهت پیش بینی فرکانس طبیعی دکل مهاری در مود اول از تعداد ۲۱۰ نمونه دکل مهاری (مجموعه داده های آموزش) و ۹۰ نمونه دکل مهاری (مجموعه داده های ارزیابی) که توسط نرم افزار ANSYS آنالیز شده اند استفاده میشود (جدول ۸-۶، ۸-۷). لازم به ذکر است تمام ابعاد موجود بر حسب متر است.

ردیف	x1	x2	x3	x4	n	ارتفاع دکل	Ansys Frequency	Svm Frequency	Error Percent
1	3.9	5.2	10.7	1.3	11	113.5	5.08	6.23	22.56
2	5.2	8.9	9.1	2.4	11	102.3	4.37	5.23	19.63
3	6.5	9.8	10.3	2.2	11	115	11.58	14.22	22.78
4	12.3	10.2	5	1	11	61.2	3.36	3.69	9.85
5	5.7	5.4	4.5	1.4	12	56.3	6.08	6.94	14.15
6	6.2	8.6	7.5	0.8	11	84.4	9.33	10.31	10.52
7	11.5	11.1	8	1	12	100.1	9.68	11.78	21.73
8	6.5	4.7	9.4	2	9	81.9	4.14	4.72	14.12
9	6.2	7.2	8.7	2.4	11	96.6	9.96	11.28	13.29
10	10.5	11.8	3.6	2.7	12	54.1	4.4	5.29	20.19
11	8.3	12.4	2.9	1.5	11	42.9	7.9	9.6	21.5
12	4.1	12.2	9.9	2.4	9	93.8	6.78	7.59	11.92
13	12.8	7.5	6.8	0.9	9	62.8	4.17	4.64	11.35
14	10.4	10.6	7.3	2.4	7	56.8	8.16	9.16	12.22
15	7.5	7.2	5.5	1.5	8	47.2	5.01	5.65	12.84
16	6.7	12.3	3.3	2.5	10	44.5	11	13.39	21.72
17	11.9	4.8	9.8	1.6	8	75	3.47	4.06	17.03
18	11.7	7.9	8.6	1	12	103.5	8.27	9.51	14.99
19	5	8.8	4.1	1.3	12	55.2	6.28	7.31	16.47
20	7.2	5.1	10.8	2	10	104.3	5.07	5.66	11.66
21	9.2	7.6	5.5	1.5	9	53.1	9.73	10.86	11.66
22	12.3	5.8	2.8	2.6	9	30.8	5.14	5.56	8.17
23	5.8	3.8	9.5	1.3	12	109.6	5.39	6.57	21.81
24	4.1	10.2	8.5	1.7	12	105.4	11.23	12.9	14.88
25	6.3	5.1	7.8	0.9	9	68.4	11.91	13.46	12.99
26	8.6	11.3	9	1.6	12	111.9	5.63	6.29	11.67
27	7.5	5.6	9.5	2.3	10	93.4	7.45	8.36	12.24
28	9.1	12.7	3.1	1.6	10	42.2	10.53	11.97	13.66
29	4.1	11	7.8	2.6	7	60.4	7.75	8.59	10.81
30	12	6.1	11.7	1	9	100.7	6.78	7.53	11.08
31	4.4	11	9	2.1	12	112.1	7.06	7.88	11.58
32	9.9	12.6	8.6	0.9	8	73.7	11.63	13.85	19.11
33	8.8	5.4	3.1	1.6	11	38	10.82	12.66	16.98
34	8.9	4.9	10.5	1.9	8	80.3	11.44	13.04	13.96
35	9.8	8.7	4.1	2.5	10	48.1	9.14	10.98	20.08
36	4.1	6	3.4	2.1	7	28.5	3.53	4.04	14.56
37	12.4	5.9	7.5	2.2	8	60.6	4.34	4.9	12.85
38	7.1	8.7	4.5	2.6	10	51.8	3.48	4.14	19.08
39	11.7	4.4	8.2	2.7	9	72.7	5.04	5.93	17.66

40	9.3	8.2	10.9	2.2	10	108.5	3.92	4.42	12.68
41	9.9	8.5	9.2	2.3	11	102.8	5.26	6.43	22.2
42	5.4	10.5	9.5	0.9	11	106.4	11.94	13.95	16.87
43	8.3	5.4	7.8	1.8	8	61.8	11.86	13.47	13.61
44	5.5	11	6	1.1	11	72.1	4.37	5.27	20.62
45	5.3	6	3.9	2.5	7	31.9	7.49	8.4	12.14
46	10.5	12.5	7.8	1.4	12	99.7	9.91	10.73	8.3
47	6.4	8.9	6.7	0.9	9	63.4	8.59	9.28	8.08
48	6.3	12.8	3.3	2.2	12	51.3	7.99	9.22	15.45
49	6.1	6.5	2.9	1.4	11	36.9	5.32	5.95	11.92
50	8.1	5	6	2.7	7	43.7	11.83	12.87	8.77
51	6.4	9.8	7.2	1.1	7	54.1	7.4	8.39	13.37
52	9.6	11.1	3.3	2.1	11	46.2	10.85	12.21	12.57
53	10	7	11.3	2.8	7	77.6	9.62	11.41	18.62
54	7.6	11.3	4.1	1.2	7	37.1	5.48	6.46	17.93
55	9.4	12.1	8.8	1.8	11	101.9	3.68	4.44	20.57
56	5.7	6.5	11.5	1.1	7	76.6	9	10.6	17.83
57	4.4	9.6	7.2	1.2	10	75.6	7.86	9.43	19.94
58	6.9	10.8	6.1	1.2	10	66.9	10.65	11.6	8.93
59	11.8	10.9	7	2.1	11	83	4.67	5.42	16.08
60	12.5	11.2	4.3	1.3	11	55.5	7.03	8.32	18.33
61	6.7	4.8	3.6	1.2	10	38.4	4.28	4.94	15.39
62	4.1	10	3.6	1.4	9	40.2	8.76	9.77	11.54
63	4.3	11.7	10.6	1.6	11	119.3	9.59	10.92	13.87
64	6.2	4.4	6.1	0.9	12	72.4	3.21	3.48	8.5
65	11.6	5.5	3.4	0.9	7	26.8	8.83	10.41	17.84
66	7.5	10.7	5.7	1	10	63	11.17	13.49	20.78
67	6.3	4.2	8.1	1.5	10	78.6	3.59	4.18	16.36
68	6.3	4.2	5.5	1.4	10	55.1	3.85	4.65	20.68
69	10.9	6	9.8	2.8	8	77.4	6.4	7.65	19.59
70	4.5	9.9	11.3	2	11	124.9	5.91	6.64	12.28
71	12.7	5.3	7.9	2.7	12	94.9	3.32	3.66	10.34
72	9.1	6.8	4.7	1.2	10	50.3	6.9	7.8	13.04
73	8.7	4.3	11.2	2.5	7	74	3.14	3.59	14.19
74	7.8	6.3	7.4	1.6	11	81.9	11.64	13.64	17.15
75	6.2	8.2	8.6	1.5	11	95.7	11.55	14.19	22.89
76	9.4	9.3	6.2	1.9	8	54.6	6.84	8.06	17.87
77	8.1	10.1	5.4	1.2	12	70.7	10.43	12.78	22.57
78	8	10.5	8.1	1.9	7	61	10.65	12.17	14.23
79	12.1	7.6	6.9	1.1	8	57	10.18	11.29	10.86
80	11.2	12.4	3.7	0.8	10	46.5	10.2	12.13	18.96

81	12.6	8.5	9.4	1.2	10	94.3	7.28	8.78	20.62
82	10.4	11.5	2.9	1.8	9	36.5	9.16	10.93	19.36
83	7.7	7	10.5	1.5	10	103	11.69	12.96	10.85
84	9.5	5.1	10.7	1.4	9	92.1	10	10.96	9.55
85	11.9	12.6	4.9	1.8	9	53.6	5.5	6.44	17.04
86	5.2	8.4	10.4	1.5	7	72.3	4.74	5.15	8.6
87	7.6	5.2	11.4	1.2	9	97.6	7.42	8.75	17.9
88	11.3	10.2	7.1	1.4	8	61.3	8.3	9.1	9.58
89	9.4	9.6	10.5	2.4	9	96	9.08	11.16	22.96
90	6.2	7.2	4.4	1.5	8	39.5	11.12	12.36	11.11
91	12.1	12.5	11.2	1.8	9	103.9	6.56	7.95	21.14
92	6.9	4	5.5	1.4	9	49.4	7.97	9.09	14.07
93	9.5	5.8	2.8	1	7	23.6	6.56	7.44	13.42
94	6.9	12.3	7.1	2.3	11	85.6	7.8	8.93	14.43
95	12.6	9.5	8.8	1	9	80.9	7.68	8.73	13.65
96	6.2	6.1	11.2	1.9	11	120	9.55	10.76	12.64
97	5.5	5.7	5.3	0.9	7	38.4	8.32	9.63	15.75
98	12.1	9.9	6.8	1.8	7	52.5	8.88	10.85	22.16
99	4	10.5	5.7	2	11	69.5	6.46	7.03	8.79
100	9.3	7.4	7.8	2.2	8	64.2	10.82	12.37	14.36
101	12.3	12.1	4.2	1.7	7	39	11.71	13.88	18.51
102	5.8	12.7	6.5	0.9	11	78.6	3.84	4.6	19.74
103	9.7	4.1	10.8	1	8	80.7	9.03	10.43	15.55
104	7.4	5	6.6	0.9	8	52.1	7.9	9.48	19.96
105	6.6	6.5	8	0.9	9	71.4	3.84	4.6	19.88
106	9.9	6.1	6.3	2.4	12	77.8	7.77	9.24	18.97
107	10.8	5.5	10.9	2.4	7	73.3	7.56	9.21	21.76
108	9.7	9.9	10.2	1.8	7	72.9	9.42	11.55	22.57
109	4	9	4	2	11	51	3.3	4.02	21.73
110	4.8	12.7	4.9	1.3	10	58.1	7.16	8.42	17.64
111	5.1	8.8	5.9	2.6	9	58.6	3.59	4.31	19.93
112	10.1	10.4	4.4	2.6	8	43.8	3.6	4.24	17.71
113	5.1	12.6	5.7	2.4	11	72	9.38	11.41	21.67
114	12.4	11.7	3.1	1.9	7	32.2	9.54	11.09	16.24
115	7.9	6.3	4.4	2	12	56.7	4.53	5.24	15.67
116	3.9	12.6	9.8	1	9	92	11.22	13.29	18.48
117	10.3	7.1	8.9	0.8	9	79.1	3.58	4.15	15.9
118	12.1	12.6	4.4	2	10	54.2	8.84	9.55	8.06
119	12.6	9.3	9.8	2.3	12	119.4	11.79	13.47	14.24
120	12.7	9	4.7	1.8	10	53.1	7.6	8.97	18.05
121	6.7	4.1	5.7	1.2	11	62.3	11.55	12.7	9.94

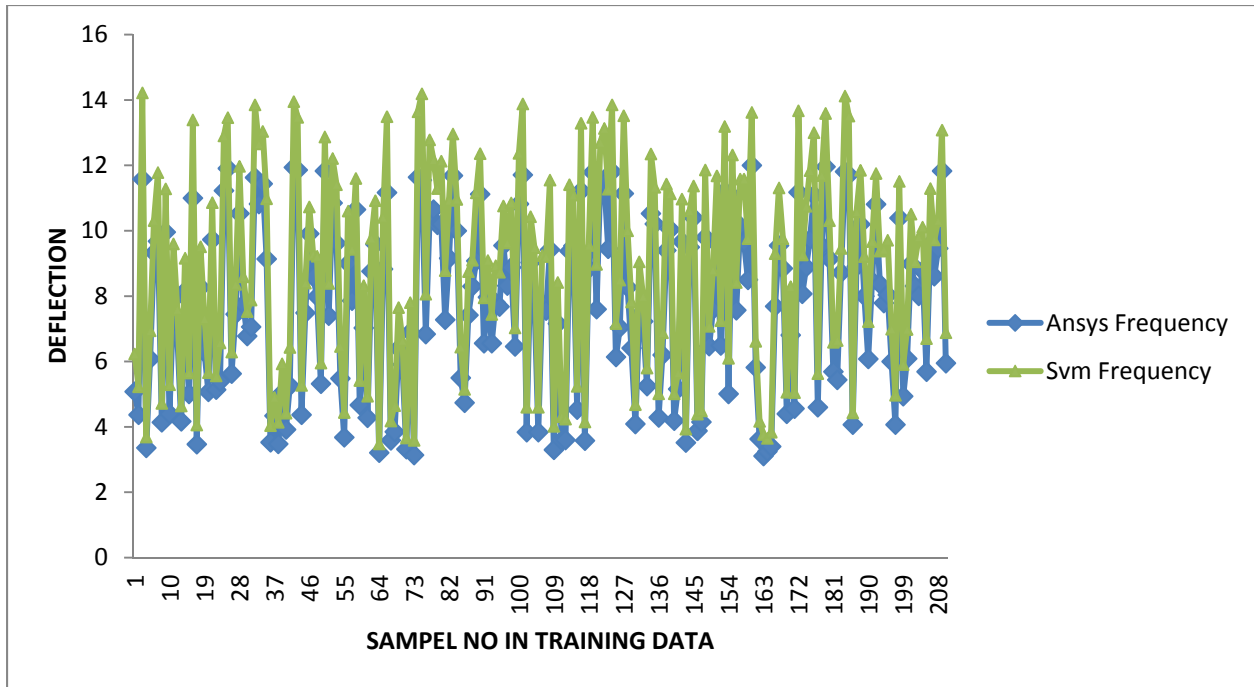
122	5.4	5.9	11.6	1.9	12	135.4	11.46	13.13	14.57
123	6.3	6.1	9.9	1.7	12	116.7	9.45	11.27	19.28
124	3.9	11.2	5.8	1.6	11	70.8	11.81	13.85	17.24
125	10.3	11.4	7	1.9	12	90.3	6.14	7.16	16.69
126	11.3	11.7	5.3	2.6	9	56.7	7.04	8.49	20.58
127	4.4	7.3	3.2	1.9	10	38	11.14	13.52	21.38
128	7.4	10.4	3.7	0.9	10	44.6	8.27	10	20.88
129	5.3	8.9	11.1	2.1	12	133.1	6.41	7.82	22
130	11.1	9.6	3.3	1.3	12	47.2	4.09	4.68	14.42
131	12.6	10.8	6.1	2.2	8	55.7	7.42	9.05	21.92
132	12.4	4	3.3	1.6	10	35.3	7.23	7.99	10.58
133	8.7	8.5	8.6	1.8	12	104.9	5.25	5.8	10.55
134	11.9	7.9	5	0.9	11	58.8	10.53	12.35	17.25
135	9.3	12.4	4.8	1.2	8	47.2	10.21	11.33	10.99
136	10.3	8.1	10.1	2.1	8	80.9	4.29	5.01	16.81
137	10.7	11.9	4.1	1.7	11	54.6	6.2	6.88	10.95
138	7.5	6.7	8.4	2.3	8	67.8	9.4	11.43	21.61
139	8.5	12.6	5.8	2	11	72.6	10.04	11.13	10.9
140	7.7	6.7	10.6	2.2	11	114.9	4.19	5.01	19.46
141	6.7	6.1	3.6	1.3	8	32.6	5.16	5.65	9.57
142	4.2	9.5	4.9	1.2	12	64.6	9.67	10.97	13.48
143	5	5.4	6.5	0.8	12	77.7	3.52	3.93	11.66
144	9.3	4.2	5.4	2.6	11	60.8	9.5	10.61	11.68
145	5.9	5.5	7.1	2	10	71.4	10.4	11.37	9.36
146	7	9	5.1	0.9	12	66	3.88	4.39	13.02
147	8.6	10.6	6.4	1.5	12	82.5	4.15	4.49	8.24
148	8.7	12.6	10.8	2.2	11	122.8	9.8	11.86	21.04
149	8.7	9	7.1	1.3	8	60	6.47	7.08	9.49
150	8.6	8.4	5.1	1.8	8	45.9	7.59	8.8	15.97
151	11	8.1	3.2	0.8	11	40.9	9.6	11.68	21.7
152	9.9	10.1	3.8	2	8	38.7	6.49	7.25	11.66
153	7.7	8.4	3	1	8	30.4	11.21	13.19	17.63
154	8.4	8.9	5.4	1	9	53.1	5.01	6.1	21.83
155	8.5	10	6.8	1.8	11	79.8	11.05	12.32	11.46
156	11.1	11.6	9.7	2.4	7	72.2	7.57	8.42	11.27
157	10.4	5.3	3.4	2.6	10	38.5	10.15	11.58	14.07
158	6.8	4.9	11.4	2.3	11	121.2	9.66	11.58	19.83
159	5.7	11.6	10.1	2.3	12	125	8.5	9.76	14.88
160	11.7	10.6	8.7	2.8	12	109.1	12	13.62	13.54
161	9.2	8.7	10.2	2.1	12	123	5.82	6.62	13.7
162	8.9	10.2	9.5	2.6	10	98.3	3.63	4.17	14.99

163	11.7	12.1	3.6	2.5	8	39.8	3.11	3.77	21.28
164	8	5.8	5.6	1	9	51.6	3.25	3.65	12.4
165	8.6	5	5.2	1.4	11	58.4	3.4	3.84	12.98
166	12.7	6.9	8.7	2.4	12	105	7.69	9.3	21
167	7.3	4.9	5.6	2.3	7	40.8	9.55	11.31	18.4
168	11	10.3	5.6	1.6	11	67.9	8.85	9.76	10.28
169	5.2	11.3	4.1	2.2	7	38.1	4.4	5.06	14.93
170	8.5	9.1	3.8	1.9	7	33.8	6.81	8.29	21.67
171	8.9	10	10.1	2.4	11	113.4	4.56	5.05	10.67
172	7.1	8	7	2.3	11	80.3	11.18	13.67	22.3
173	10.4	6.7	7.9	1.3	10	79.1	8.07	9.26	14.69
174	4.6	4.7	8.8	1.3	9	76.4	8.89	10.75	20.9
175	4	8.6	3.2	1	11	41.6	9.74	11.84	21.54
176	12.7	5.9	5.2	1	11	58.9	11.09	13	17.2
177	12.5	9.1	3.2	1.5	9	36.2	4.6	5.63	22.49
178	11.4	4.8	3.7	2.6	11	44.4	9.54	11.69	22.54
179	6.8	9.3	6.8	0.9	11	78.2	11.96	13.59	13.61
180	4.2	12.2	11.8	1.1	11	131.3	9.14	10.31	12.81
181	9.7	4.6	10.6	2.4	8	81.2	5.69	6.59	15.76
182	11.4	5.4	3.6	1.5	10	39.3	5.44	6.64	22.13
183	6.2	5.3	6	0.8	7	42.1	8.72	9.46	8.45
184	11.2	4.9	4.4	2.3	9	42.4	11.81	14.12	19.6
185	6.4	9.2	2.9	2.5	11	40.7	11.71	13.51	15.33
186	5.6	7.7	5.6	1.7	10	59.8	4.07	4.43	8.75
187	12.4	5.9	11.5	2.1	9	100	8.91	10.58	18.71
188	10.9	4.8	9.7	2.5	8	75.2	10.2	11.85	16.13
189	4.1	12.8	5.7	1.8	11	71.6	8	9.21	15.14
190	11.4	11.2	4.9	2.4	7	43	6.08	7.22	18.79
191	8.5	4.3	10.4	1.1	11	109.4	8.46	9.67	14.35
192	4.7	7	10.1	1.4	9	89.2	10.81	11.75	8.68
193	3.8	10.8	7.4	1.5	12	93.7	8.37	9.38	12.07
194	5.6	5.5	9.2	2.5	12	109.2	7.79	9.43	21.1
195	7.9	5.1	4	2	10	43.1	8.04	9.71	20.74
196	6.7	11.9	8.1	2.5	10	87.3	6	6.99	16.43
197	4.8	7.6	7.1	1.9	7	52.1	4.07	4.97	22.23
198	9.8	12.7	4.5	1.6	7	41.3	10.39	11.51	10.8
199	4.1	7.7	10.5	1.4	11	114.1	4.94	5.91	19.69
200	11.9	6.5	3.3	2.3	10	38.5	6.09	6.98	14.54
201	9.9	5.4	8.5	1.6	9	75	8.99	10.51	16.94
202	7.8	4.1	4.2	2.4	7	31.7	8.31	9.05	8.96
203	6	9.4	8.1	2.7	7	60.7	8.01	9.81	22.53

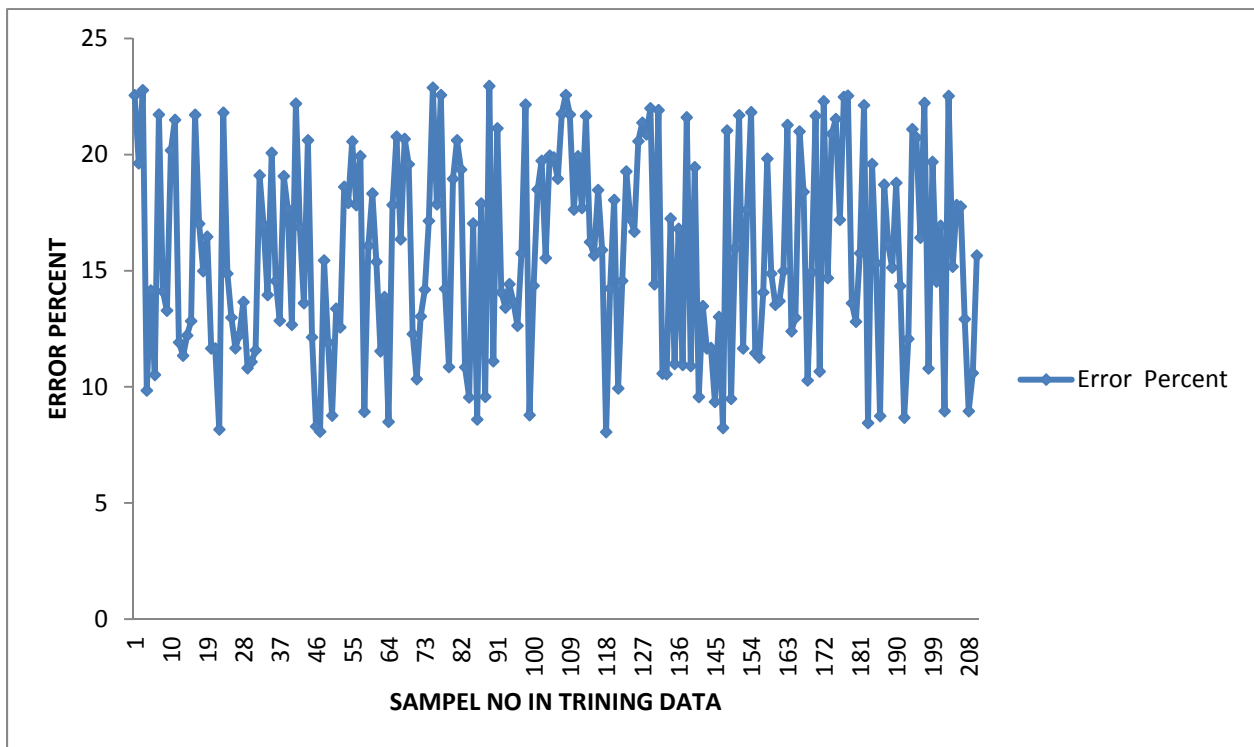
204	12.7	5.6	7.8	2.6	11	86.2	8.78	10.11	15.18
205	4.1	10	7.3	2.5	8	63.6	5.69	6.7	17.83
206	11.3	11.1	9.9	2.2	8	82.6	9.59	11.29	17.77
207	8.2	6.8	9.3	1.3	9	82.5	8.61	9.72	12.92
208	5	6.5	5.5	2.6	10	58.6	9.46	10.31	8.96
209	7.7	5.7	3.2	2	9	33.3	11.83	13.08	10.6
210	5.2	12.7	9.4	1.4	10	98.7	5.95	6.88	15.66

جدول ۸-۶: مجموعه داده های آموزش در محاسبه فرکانس طبیعی دکل مهاری

با توجه به نتایج جدول ۸-۶ نمودار مقایسه فرکانس طبیعی دکل مهاری توسط نرم افزار ANSYS و SVM در شکل ۸-۵ همچنین نمودار در صد خطای حاصل از محاسبه فرکانس طبیعی دکل مهاری توسط نرم افزار SVM نسبت به نرم افزار ANSYS در شکل ۸-۶ نشان داده شده است.



شکل ۸-۵: نمودار مقایسه فرکانس طبیعی دکل مهاری توسط نرم افزار ANSYS و SVM



شکل ۸-۶: نمودار درصد خطای حاصل از محاسبه فرکانس طبیعی دکل توسط نرم افزار SVM نسبت به نرم افزار ANSYS

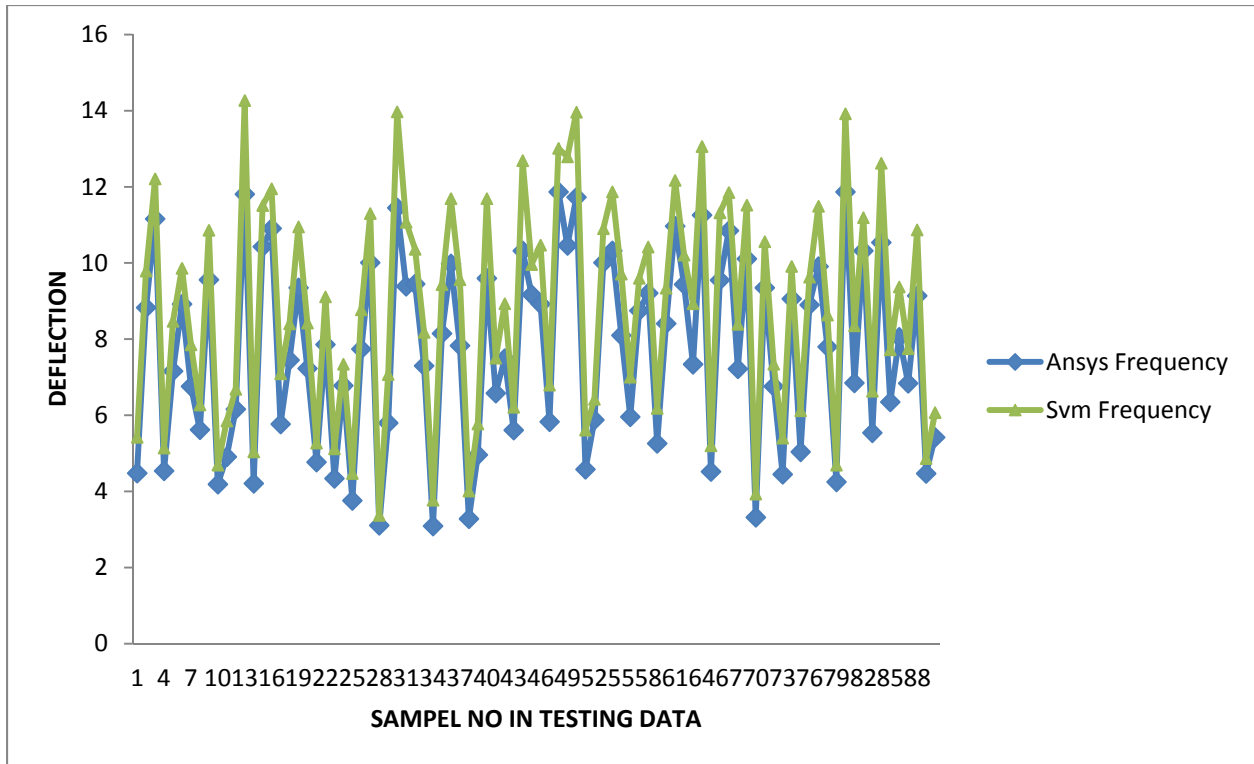
ردیف	x1	x2	x3	x4	n	ارتفاع دکل	Ansys Frequency	Svm Frequency	Error Percent
1	4.1	4.8	4.9	1.7	12	60.4	4.48	5.42	20.9
2	6	11.8	9.9	2.2	12	122.9	8.83	9.79	10.9
3	4.6	10.5	9.7	1	12	118.2	11.16	12.21	9.42
4	9.5	8.9	6.2	2.1	11	73	4.54	5.14	13.17
5	6.2	6.2	8.9	2.6	11	97.8	7.16	8.47	18.27
6	8.5	4.3	7	2.5	9	62.8	8.92	9.86	10.59
7	8.1	8.2	5.2	2.7	12	68.1	6.76	7.85	16.16
8	6	11.2	4.9	2.1	12	67.2	5.62	6.27	11.64
9	11	4.9	9	1.7	11	96.6	9.56	10.86	13.57
10	10	8.2	11	2.6	8	87.8	4.19	4.69	11.86
11	11.7	10.1	7.9	2.8	7	60.3	4.91	5.85	19.2
12	7.9	11	3.2	2.5	9	39.1	6.16	6.68	8.41
13	10.4	6.8	3.8	1.6	9	38.8	11.81	14.27	20.84
14	7.1	9.4	11.1	1.5	7	77.5	4.21	5.04	19.82
15	8.9	11.4	10.1	2.5	8	84.6	10.43	11.51	10.36
16	12.2	6.2	7.9	1.5	12	94.6	10.91	11.95	9.5
17	12.6	5.5	7.5	1.6	12	89.6	5.77	7.09	22.83
18	7.4	11.8	3	2	10	40.8	7.45	8.4	12.76
19	6.8	4.5	6.8	2.7	9	61.6	9.35	10.95	17.1
20	8.4	11.8	9.2	2.4	12	115.4	7.23	8.42	16.41
21	12	12.6	8.7	2.1	12	110.4	4.77	5.27	10.39
22	7	5.4	9.6	2.4	9	84.6	7.86	9.11	15.87
23	10.1	10.9	5.8	2.5	7	48.2	4.34	5.12	18.07
24	8.1	11.1	2.8	2.8	8	33.5	6.78	7.34	8.2
25	5.5	8.2	9.3	1.6	12	112.1	3.76	4.47	18.91
26	10.7	9.7	4.2	2.3	8	41.4	7.74	8.77	13.33
27	11.9	7.4	11.3	2.4	9	100.2	10.01	11.3	12.89
28	10.5	10	9.5	2.1	11	107.1	3.11	3.37	8.52
29	4.7	6.8	7.4	2.3	12	90.5	5.8	7.07	21.91
30	8.5	4	10.4	2.3	12	120.7	11.45	13.97	22
31	8.9	12.6	3.7	2.1	12	55.4	9.39	11.07	17.94
32	9.9	8.2	6.3	1.6	11	72.8	9.45	10.36	9.67
33	12.5	9.7	9.5	2.1	11	106.8	7.3	8.18	12.12
34	10.6	9.3	6.4	1.7	7	49.4	3.09	3.77	22.05
35	8.2	7.4	10.2	1.9	11	111.3	8.15	9.43	15.66
36	10.3	8.2	3.1	2	9	35	9.98	11.69	17.15
37	11.5	6	5.7	2	9	53.6	7.83	9.56	22.05
38	6.6	11.3	10.4	2.2	12	127.9	3.28	4.01	22.31
39	11.6	10.6	11.3	2	8	91.7	4.96	5.77	16.25

40	6	6.9	11.3	2.1	9	99.4	9.6	11.69	21.76
41	12.1	8.9	3.9	1.8	9	41.9	6.58	7.5	14
42	9.5	10.3	11.3	2.5	11	125.8	7.49	8.93	19.25
43	11.1	5	7.9	0.9	10	77	5.61	6.21	10.75
44	4.4	12.5	10.1	1.9	12	125.5	10.32	12.69	22.97
45	11.1	10.2	4.5	2.3	7	39.5	9.17	9.96	8.66
46	11.8	9.1	7.8	2.1	11	89.2	8.92	10.47	17.37
47	9.5	8.9	11.2	2	9	100.5	5.83	6.79	16.46
48	5.1	6	10.1	1	10	97.9	11.87	13.01	9.64
49	7.1	11.6	7	1.8	10	76.4	10.46	12.79	22.31
50	11.7	9.4	8.9	2.3	12	109.6	11.73	13.96	19
51	11.2	6.6	5	2.2	7	38.8	4.58	5.61	22.57
52	11.3	12.2	6.2	2.8	7	52.2	5.88	6.42	9.11
53	9.1	9	4.7	2.3	12	63	10.01	10.9	8.9
54	10.2	11.4	11.5	1.9	7	82.3	10.32	11.87	15.01
55	9	5.2	4.5	2.8	8	39.5	8.1	9.71	19.85
56	5	7	4.1	1.1	8	36.8	5.96	7	17.44
57	7.8	12.6	5.1	1.2	9	54.6	8.75	9.6	9.67
58	10.6	10.6	7.7	2.3	10	82.2	9.21	10.42	13.15
59	6.6	6.2	7.5	1.5	10	75.2	5.26	6.18	17.54
60	5.6	6.6	9.5	1.9	9	84.5	8.41	9.34	11.08
61	6	7.5	7.3	2.5	11	83	10.97	12.17	10.9
62	9.8	11.1	7.4	1.6	8	64.5	9.44	10.21	8.2
63	12.5	12.6	3.2	1.1	9	39.3	7.34	8.93	21.71
64	12.1	7.5	5.8	2.8	12	74.1	11.26	13.06	16.02
65	12.2	3.9	6.6	2.6	12	79.1	4.52	5.2	15.11
66	4.7	12.6	3.7	1.7	7	36.5	9.55	11.32	18.55
67	10.1	9.7	11.3	1.2	12	135.2	10.85	11.85	9.21
68	12.5	9	9.8	1.3	8	78.9	7.22	8.39	16.27
69	6.8	7.1	9.9	1.2	9	87.5	10.11	11.52	13.9
70	6.8	11.5	3.6	1.1	9	41.4	3.32	3.93	18.33
71	9.6	11.5	10.1	2.6	8	84.8	9.35	10.56	12.91
72	6.8	9.4	9.9	1.4	8	80.1	6.76	7.34	8.57
73	11	7.7	4.8	1.8	11	57.5	4.45	5.4	21.32
74	6.4	5.6	10.5	2.3	9	91.9	9.06	9.91	9.33
75	11.8	7.2	3.7	1.6	11	45.8	5.04	6.12	21.45
76	9	6.7	4.3	2.6	8	39.4	8.9	9.63	8.23
77	5.6	8.6	6.5	0.8	9	61.4	9.91	11.49	15.98
78	5	5.2	3.3	2.2	7	27.2	7.8	8.63	10.7
79	9	6.5	10.2	1.6	11	110.1	4.25	4.69	10.26
80	4.3	3.9	6.3	2.5	12	75.7	11.87	13.92	17.27

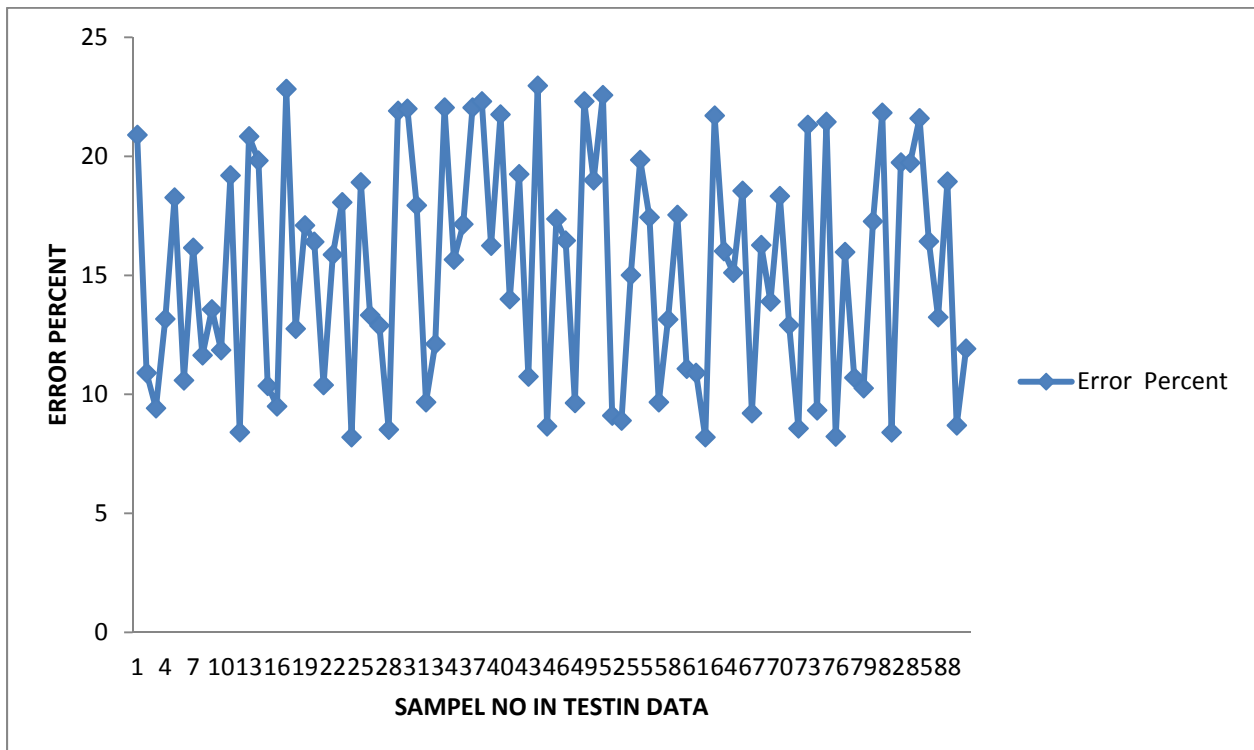
81	11.3	7	8.8	2	12	105.8	6.85	8.35	21.83
82	7.6	7	4.5	2.4	12	58.9	10.32	11.19	8.4
83	10.9	12.7	6.6	1	7	53.3	5.54	6.63	19.74
84	8.5	4.9	9.9	1.2	11	105.1	10.54	12.62	19.73
85	10	12.6	6.1	2.8	9	64.2	6.35	7.72	21.6
86	11.9	5	6.1	2.2	11	68.2	8.05	9.37	16.43
87	6.8	11.7	5.9	1.6	10	66.4	6.84	7.75	13.24
88	11.2	7.4	10.1	2.7	12	121.2	9.14	10.87	18.94
89	11.8	4.1	5.3	1.5	12	63.9	4.47	4.86	8.7
90	5.9	6.6	8.5	1.5	12	101.6	5.42	6.07	11.92

جدول ۷-۸: مجموعه داده های ارزیابی در محاسبه فرکانس طبیعی دکل مهاری

با توجه به نتایج جدول ۷-۸ نمودار مقایسه فرکانس طبیعی دکل مهاری توسط نرم افزار ANSYS و SVM در شکل ۷-۸ همچنین نمودار در صد خطای حاصل از محاسبه فرکانس طبیعی دکل مهاری توسط نرم افزار SVM نسبت به نرم افزار ANSYS در شکل ۸-۸ نشان داده شده است.



شکل ۸-۷: مقایسه فرکانس طبیعی دکل مهاری توسط نرم افزار ANSYS و SVM



شکل ۸-۸: نمودار درصد خطای حاصل از محاسبه فرکانس طبیعی دکل توسط نرم افزار SVM نسبت به نرم افزار ANSYS

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز داده های آموزش و ارزیابی در جداول ۸-۸ الی ۸-۱۰ نتایج بدست آمده از مدل های تولیدی بر اساس ترکیب های متفاوتی از پارامترهای ζ ، ϵ و C را نشان میدهد.

ζ	Training Data		Testing Data	
	CC	RMSE	CC	RMSE
.۵	.۸۴۹۲	.۱۴۳۲	.۸۳۱۱	.۲۳۵۱
۱	.۸۱۱۱	.۱۴۲۱	.۸۸۱۵	.۲۹۹۰
۱۰	.۸۴۵۸	.۱۴۱۱	.۸۸۳۱	.۲۶۲۰
۵۰	.۸۷۶۵	.۰۹۸۷	.۸۴۱۰	.۱۹۵۱
۱۰۰	.۸۹۰۷	.۰۹۷۷	.۸۰۱۵	.۲۲۱۴
۲۰۰	.۸۹۱۲	.۰۹۱۲	.۸۷۱۳	.۲۱۳۵
۳۰۰	.۸۹۶۷	.۰۹۰۱	.۸۸۴۹	.۱۹۱۸
$\epsilon = .001$ $C=150$				

جدول ۸-۸: ارزیابی مدل به ازای مقادیر مختلف پارامتر ζ تابع کرنل

ϵ	Training Data		Testing Data	
	CC	RMSE	CC	RMSE
.۰۰۰۱	.۹۱۸۱	.۱۱۲۰	.۹۱۳۹	.۱۳۱۰
.۰۰۱	.۹۲۳۲	.۰۸۷۹	.۹۴۱۰	.۱۲۵۱
.۰۰۵	.۹۲۲۰	.۰۹۱۷	.۹۲۵۰	.۱۳۱۸
.۰۱	.۸۹۸۰	.۰۹۱۰	.۹۴۷۰	.۱۴۹۸
.۰۵	.۸۹۴۰	.۰۹۲۰	.۹۲۳۱	.۱۶۳۴
.۱	.۹۵۳۰	.۰۸۷۱	.۹۴۹۱	.۱۰۹۱
$\zeta = 50$ $C=150$				

جدول ۸-۹: ارزیابی مدل به ازای مقادیر مختلف پارامتر ϵ تابع کرنل

C	Training Data		Testing Data	
	CC	RMSE	CC	RMSE
.1	.۸۳۴۱	.۱۱۸۵	.۹۲۲۵	.۱۲۲
۱	.۸۱۴۰	.۱۳۴۰	.۹۶۷۱	.۱۴۵
۱۰	.۷۳۴۱	.۱۴۱۲	.۹۱۳۰	.۱۸۲
۵۰	.۸۰۱۲	.۱۲۳	.۹۱۱۱	.۱۸۸
۱۰۰	.۸۲۱۳	.۰۹۱۰	.۸۱۴۰	.۱۱۵
۱۵۰	.۸۵۳۲	.۰۸۴۹	.۹۸۱۰	.۱۱۲
۲۰۰	.۷۳۱۵	.۰۹۲۴	.۹۷۷۵	.۱۶۱
$\varepsilon = .001 \quad \zeta = ۵۰$				

جدول ۸-۱۰: ارزیابی مدل به ازای مقادیر مختلف پارامتر C تابع کرنل

REFERENCE

- [1]Amiri, G. G., Zahedi, M., and Jalali, R. S. (2004). "Multiple-support seismic excitation of tall guyed telecommunication towers." 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada, August 1-6, 2004, Paper No.
- [2] Moossavi Nejad, S. E. (1996). "Dynamic response of guyed masts to strong motion earthquake." Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, Paper No. 289.
- [3]Kahla, N. B. (1994). "Dynamic analysis of guyed towers." Engineering Structures, 16, 293-301.
- [4]Madugula, M. K. S., ed. (2002). Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [5]Amiri,G. G. (1997). Seismic Sensitivity of Tall Guyed Telecommunication Towers, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada.
- [6]BSI. (1994). British Standard: Lattice Towers and Masts: Part 4, Code of Practice for Lattice Masts. BS 8100 Part 4, British Standards Institution, London, UK.
- [7]CEN. (1997). European Pre-Standard ENV 1993-3-1:1997: Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 3-1: Towers, Masts and Chimneys – Towers and Masts, Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- [8]CSA. (2001), Antennas, Towers, and Antenna-Supporting Structures. Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada.
- [9]Hussam, M.M. (2005), Dynamic analysis of guyed towers for seismic loads, PhD dissertation, University of Windsor, Ontario, Canada.
- [10]Madugula, M.K.S. (2002), Dynamic response of lattice towers and guyed masts, American Society of Civil Engineers.
- [11]Sackmann, V. (1996). Prediction of natural frequencies and mode shapes of self supporting lattice telecommunication towers. Project Report- Diplomarbeit-Nr.76, 165 Department of Civil Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Canada.
- [12]Wahba, Y.M.F. (1999), Static and dynamic analysis of guyed antenna towers, PhD dissertation, University of Windsor, Ontario, Canada.
- [13]Ahmadi-Kashani, K., Ove Amp and Partners, London, 1989, "Three Dimensional Cable Elements," CIVIL-COMP 89, Proceedings of the Fourth hitemational Conference on Civil and Stmctural Engineering Computing, 2: 7-14.
- [14]Cheng, S.P., and Perkins, N.C., 1992, "Closed-Form Vibration Analysis of Sagged Cable/Mass Suspensions," J. Appl. Mech., 59: 923-928.
- [15]Chisalita, A., 1984, "Finite Deformation Analysis of Cable Networks," J. Eng. Mech.,110(2): 207-223.
- [16]Davenport, A.G., and Sparling, B.F., 1992, "Dynamic Gust Response Factors for Guyed Towers," J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics, Elsevier Science Publishers. 41-44: 2237-2248.

- [17]Flachsbart, O., 1997, "Wind Loadings on Lattice Girder Structures." BRE library Translation 2202.
- [18]Gerstoft, P., and Davenport, A.G., 1986, "A Simplified Method for Dynamic Analysis of a Guyed Mast," J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics, Elsevier Science Publishers, 487-499.
- [19]Huddleston, J.V., 1989, "The Extensible Cable as a Limiting Case of a Very Flexible Rod," J. Appl. Mech., 56: 439-443.
- [20]Nello Cristianini and John Shawe-Taylor .An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods .Cambridge University Press, 2000 .ISBN 0-521-87622-3 .SVM Book
- [21]Huang T.-M., Kecman V., Kopriva I. (2006), Kernel Based Algorithms for Mining Huge Data Sets, Supervised, Semi-supervised, and Unsupervised Learning ,Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 260 pp. 96 illus., Hardcover
- [22]Vojislav Kecman: "Learning and Soft Computing — Support Vector Machines ,Neural Networks, Fuzzy Logic Systems", The MIT Press, Cambridge, MA, 2001
- [23]Vladimir Vapnik, S.Kotz "Estimation of Dependences Based on Empirical Data "Springer, 2006 .ISBN 0-387-28833-0 , 2-30865-387-0 pages [this is a reprint of Vapnik's early book describing philosophy behind SVM approach. The 2006 Appendix describes recent development
- [24]Dmitriy Fradkin and Ilya Muchnik "Support Vector Machines for Classification" in J. Abello and G. Carmode (Eds) "Discrete Methods in Epidemiology", DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, volume 70, pp. 13–20, 2006 .Succinctly describes theoretical ideas behind SVM.
- [25]Kristin P. Bennett and Colin Campbell, "Support Vector Machines: Hype or Hallelujah?", SIGKDD Explorations, 2,2, 2000, 1–13 .Excellent introduction to SVMs with helpful figures
- [26]Ovidiu Ivanciuc, "Applications of Support Vector Machines in Chemistry", In :Reviews in Computational Chemistry ,Volume 23, 2007, pp. 291–400. Reprint available