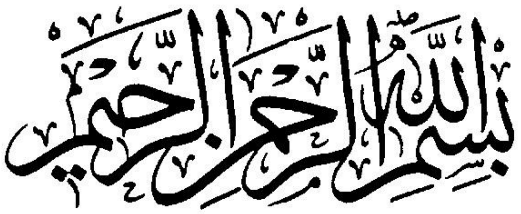

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

مدلسازی دینامیکی سیستمهای ترموهیدرولیکی با استفاده از روش باندگراف

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

سید علیرضا مصطفوی

استاد راهنما

دکتر محسن دوازده امامی

بهار ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک (گرایش تبدیل انرژی)
آقای سید علیرضا مصطفوی

تحت عنوان

مدلسازی دینامیکی سیستمهای ترموهیدرولیکی با استفاده از روش باندگراف

در تاریخ ۸۷/۲/۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر محسن دوازده امامی
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر محمد دانش
۳- استاد داور	دکتر ارجمند مهربانی
٤- استاد داور	دکتر احمد صابونچی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمود اشرفی‌زاده

تقدیم به:

روح پاک و مطهر پدر بزرگوارم

مادر مهربان، صبور و فداکارم

دو خواهر عزیزم

تقدیر وتشکر:

در ابتدا حمد و سپاس خداوند را بجا می آورم که انگیزه و توانایی تلاش را به بنده حقیر خود عطاء فرمود و از آن آستان پاک در مراحل بعدی زندگی یاری و کمک خواستارم. امید است که لیاقت آن الطاف بیکرا ن نیز نصیب اینجانب شود.

بر خود لازم می دانم از زحمات خانواده خود خصوصا مادر عزیزم که تمامی زندگی خود را مدیون زحمات ایشان می باشم، تشکر نمایم. از اساتید محترم دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان که در طول این دوره از آموزشها و تجربیات آنها استفاده کردم، نهایت سپاس و تشکر را دارم. از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر دوازده امامی که با برنامه ریزی و راهنمایی های مدوّن و همچنین ایجاد انگیزه و روحیه تلاش در اینجانب، انجام این پروژه را امکانپذیر و طی این مسیر را هموار ساختند، سپاسگزارم و برای ایشان موفقیت و سلامتی را از درگاه خداوند متعال خواستارم. از زحمات جناب آقای دکتر دانش که متعهدانه بنده را در این پروژه یاری کردند تشکر وقدردانی می نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر مهربانی و دکتر صابونچی که با دقت و ظرافت، پایان نامه بنده را مطالعه نموده و زحمت داوری را برعهده داشتند، سپاسگزارم.

کلیه حقوق مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

فهرست ..... هشت
چکیده ۱
فصل اول ۲
۱-۱- سیستم دینامیکی ۲
۱-۲- مدلسازی سیستمهای دینامیکی ۳
۱-۲-۱- تابع تبدیل ۳
۱-۲-۲- نمودار بلوکی ۳
۱-۲-۳- فضای حالت ٤
۱-۳- باندگراف ۴
۱-۴- کارهای انجام شده در این تحقیق: ۵
۱-۵- مطالب ارائه شده در فصلهای این پایان نامه: ۶
فصل دوم ۷
۲-۱- متغیرهای توان ۷
۲-۲- المانهای استاندارد دربانداگراف ۸
۲-۲-۱- المانهای ورودی (منبع) ۸
۲-۲-۲-I , C , R: ۹
۲-۲-۳- المانهای دو درگاهی TF و GY ۱۱
۲-۲-۴- اتصالات : ۱۲
۲-۳- مراحل ساخت مدل باند گراف ۱۴
۲-۴- علّیت : ۱۸
۲-۴-۱- علّیت در باند گراف ۱۸
۲-۴-۲- قوانین علّیت درالمانها ۱۹
۲-۵- استخراج معادلات سیستم ۲۵
۲-۵-۲- معادلات سیستم ۲٦
۲-۵-۳- معادلات خروجی ۳۳
۲-۶- باند گراف چندگانه ۳۴
فصل سوم ۳۷
۳-۱- شیر کنترل ۳۷
۳-۲- شیرکنترل نئوماتیکی ۳۸
۳-۲-۱- عملگر نئوماتیکی ۳۹
۳-۲-۲- مستقرکننده نئوماتیکی ٤۰

۳-۳- مدل باندگراف شیر کنترل ۴۱
۳-۳-۱- معادلات سیستم ٤۲
۳-۳-۲- پارامترهای سیستم ٤۲
۳-۳-۳- نتایج ٤۳
۳-۳-٤- بررسی اثر پارامترها ٤٥
فصل چهارم ٥۳
۴-۱- متغیرهای توان در سیستمهای هیدرولیکی ٥۳
۴-۲- کاربرد در مدارهای هیدرولیکی ٥٥
۴-۳- مقاومت ویسکوز و افت فشار ناشی از لزجت ٥۶
۴-۳-۱- محاسبه افت فشار: ٥۷
۴-۴- ذخیره کننده هیدرولیکی (المان C) ٥۸
۴-۵- منابع *جریان* و *پتانسیل* و TF و GY هیدرولیکی ۶۱
۴-۶- مدلسازی سیستم کنترل سطح و یا کنترل دبی ۶۲
۴-۶-۱- مدل باندگراف سیستم ٦۳
۴-۶-۲- استخراج معادلات سیستم ٦٤
۴-۶-۳- پارامترهای سیستم ٦٥
۴-۶-۴- شرایط اولیه سیستم ٦٥
۴-۶-۵- نمودارها و نتایج ۷۰
فصل پنجم ۷۱
۵-۱- مقاومت حرارتی ۷۱
۵-۲- باندگراف کاذب ۷۳
۵-۳- المانهای چند درگاهی ۷۴
۵-۴- جریان سیال ۷۶
۵-۵- المان R:Reco ۷۷
فصل ششم ۷۹
۶-۱- باند اطلاعات یا باند فعال ۷۹
۶-۲- ساخت گراف گذر سیگنال و استخراج تابع تبدیل از مدل باندگراف ۸۱
۶-۳- مدلسازی کنترل فیدبک PID با استفاده از باندگراف ۸۴
۶-۴- کنترل مدرن ۸٥
فصل هفتم ۸۹
۷-۱- تعلیق فنر و کمک فنر ۹۰

۷-۲- مدل باندگراف سیستم تعلیق فنر وکمک فنر ۹۱
۷-۲-۱- استخراج معادلات حالت سیستم ۹۲
۷-۲-۲- پارامترهای سیستم ۹٤
۷-۲-۳- نتایج ۹٤
۷-۳- تعلیق هیدروپنوماتیک ۹۶
۷-۳-۱- اجزای یک سیستم تعلیق هیدرونیوماتیک ۹٦
۷-۳-۲- ساختمان سیستم مورد نظر ۹۹
۷-۳-۳- مدل باندگراف سیستم ۱۰۱
۷-۴- مدلسازی سیستمهای تعلیق پیشرفته ۱۱۰
فصل هشتم ۱۱۲
۸-۱- انرژی سیال ۱۱۳
۸-۲- معادلات بقاء ۱۱۳
۸-۳- معادلات تعادل ۱۱۴
۸-۴- گسسته سازی میدان حل ۱۱۵
۸-۴-۲- ترانسفرمر بین سرعت و مومنتوم خطی ۱۱۷
۸-۵- روابط سازگاری سیستم و روابط ماکسول ۱۱۷
۸-۶- المان IC چنددرگاهی ۱۱۸
۸-۷- معادلات حالت ۱۱۹
۸-۷-۱ درگاه جرم ۱۱۹
۸-۷-۲- درگاه سرعت ۱۲۰
۸-۷-۳- درگاه انتروپی ۱۲۰
۸-۸- ماتریسهای جفت ۱۲۱
۸-۸-۱- کوپلینگ بین درگاههای سرعت و جرم ۱۲۱
۸-۸-۲- کوپلینگ بین در گاههای جرم و انتروپی ۱۲۲
۸-۸-۳- کوپلینگ بین درگاههای سرعت و انتروپی ۱۲۲
۸-۹- باندگراف سیستم ۱۲۳
۸-۱۰- شرایط اولیه ۱۲۳
۸-۱۱- شرایط مرزی ۱۲۴
۸-۱۱-۱- شرط مرزی تنش ۱۲٤
۸-۱۱-۲- شرط مرزی سرعت ۱۲۵
۸-۱۱-۳- شرط مرزی شار حرارتی مشخص و یا جابجایی در مرز ۱۲۵

۸-۱۱-۴- شرط مرزی خواص ترمو فیزیکی مشخص ۱۲۶
۸-۱۲- تعیین علّیت ۱۲۷
فصل نهم ۱۳۰
۹-۱: نتیجه گیری کلی ۱۳۰
۹-۲- پیشنهادات ۱۳۲
پیوست ۱ ..... ۱۳۴
۱- باند گراف کیفی ۱۳۵
۲- عیب یابی در یک مخزن محتوی سیال ۱۳۵
۳- سیستم خنک کننده و هواساز ۱۳۷
مراجع: ۱۴۰

چکیده

رفتاریک سیستم در شرایط کاری مختلف توسط یک مدل ریاضی بیان می شود. عملکرد سیستمهای دینامیکی نیز توسط یک مجموعه معادله دیفرانسیل توصیف می شوند. باندگراف بیانی گرافیکی از دینامیک سیستمهای فیزیکی است که مستقل از محدوده های فیزیکی می باشد. بدین معنی که سیستمهایی با محدوده های فیزیکی مختلف مانند سیستمهای الکتریکی، مکانیکی، هیدرولیکی، آکوستیک، حرارتی، ترمودینامیک و غیره با یک زبان توصیف می شوند. در این روش که بر پایه انرژی وتبادل انرژی بین اجزای مختلف سیستم بنا نهاده شده است، با استفاده از مجموعه ای از اجزاء، دینامیک سیستم بیان می شود. همچنین این روش وسیله ای برای ایجاد معادلات حاکم و پیش بینی رفتار سیستم می باشد. در این پایان نامه روش باندگراف در مدلسازی سیستمهای دینامیکی عملگر شیر کنترل نئوماتیکی، سیستم هیدرولیکی(کنترل سطح- دبی) و سیستم تعلیق هیدروپنوماتیکی، استفاده شده است. نتایج بدست آمده تطابق خوبی را در مقایسه با نتایج قبلی از خود نشان می دهد. کاربرد این روش در سیستمهای هیدرولیکی، سیستمهای ترموهیدرولیکی، سیستمهای کنترل، مسائل دینامیک سیالات محاسباتی و عیب یابی سیستمهای دینامیکی نیز توضیح داده شده است. با توجه به تعدد و تفاوتهای سیستمهای بررسی شده در این پروژه، می‌توان چنین استنباط کرد که روش باندگراف روشی مناسب در مواردی است که نیاز به تحلیل و بررسی محدوده های مختلف فیزیکی می باشد.

فصل اول

مقدمه

۱-۱- سیستم دینامیکی

سیستم دینامیکی، سیستمی است که دارای یک یا چند مولفه متغیر با زمان باشد. از جریان ماسه در داخل یک ساعت شنی گرفته تا یک موشکی که باید در هر لحظه با دقت کنترل وهدایت شود، همگی نمونه ای از سیستمهای دینامیکی اند.

تحلیل دینامیکی در بسیاری از زمینه های علوم، مهندسی، اقتصاد و فعالیتهای تجاری مهم و قابل کاربرد است که در زیر به نمونه هایی از آن اشاره می شود:

سیستمهای هوا و فضا : تعیین مسیر، هدایت، کنترل از راه دور، کنترل وضعیت

اتوماسیون: روند ساخت وتولید، حسابداری و تخمین

تجهیزات پزشکی و دارویی: تجهیزات ارگانیسم، رفتار دینامیکی سیستمهای حیاتی، تحقیقات بالینی

سیستمهای تجاری: دینامیک اقتصاد منطقه ای، سیستمهای بانکداری، صورت اموال و کنترل تولید

سیستمهای مخابراتی: کنترل از راه دور، انتقال اطلاعات

سیستمهای کامپیوتری و پردازش اطلاعات: حل مسائل تحلیلی پیچیده، ذخیره و بازیابی اطلاعات، کنترل کامپیوتری سیستمهای پیچیده

سیستمهای دفاعی: کنترل پرتاب موشک، سیستمهای پیگیری رادار، پایداری آیرودینامیکی، بازرسی انفجار هسته ای، سیستمهای جنگ افزار

سیستمهای تولید توان و پیش رانش: سیستمهای تولید توان بخار، کنترل راکتورهای هسته ای، مگنتو هیدرودینامیک، نیروی محرکه یونی
روانشناسی: دینامیک عملکرد افراد، دینامیک گروهی، فرآیندهای یادگیری
سازه: طراحی پل، رفتار دینامیکی ساختمانها، سازه وسائل پرواز
سیستمهای انتقال ونقلیه: کنترل هواپیما وسیستمهای ترمز، اداره توان،کنترل سرعت، پایداری کشتی، سیستمهای ذخیره آب، توزیع مواد
از آنجایی که سیستمهایی که اکثرا با آنها سروکار داریم دینامیک می باشند و همچنین در نظر نگرفتن بارهای بیشینه درهنگام راه اندازی، بهره برداری و توقف باعث تسلیم تجهیز خاص در سیستم مورد نظر خواهد شد بنابراین تحلیل دینامیکی سیستمها از اهمیت بالایی برخوردار است[۱].

۱-۲- مدلسازی سیستمهای دینامیکی

رفتار سیستمهای دینامیکی توسط یک مجموعه معادله دیفرانسیل توصیف می شوند. بنابراین یافتن یک مدل ریاضی مناسب، مهمترین بخش تحلیل است. البته برای یک سیستم معین، مدل ریاضی یکتا نیست و بسته به نوع کاربرد و دیدگاه شخص، مدلهای ریاضی متفاوتی برای یک سیستم وجود دارد.
در یافتن مدل ریاضی باید مصالحه ای بین سادگی مدل و دقت نتایج تحلیل صورت دهیم. در یافتن مدل ریاضی، سادگی معقول مدل نیازمند نادیده گرفتن بعضی ویژگی های ذاتی سیستم می باشد. اگر اثر این ویژگی های چشم پوشی شده بر پاسخ سیستم کم باشد، بین نتایج حاصل از تحلیل مدل ریاضی ونتایجی که از بررسی تجربی سیستم فیزیکی به دست می آید، توافق خوبی برقرار خواهد بود. مثلا در فرکانس پائین ممکن است بتوان جرم فنر را نادیده گرفت ولی در فرکانسهای بالا این جرم به خاصیت مهمی تبدیل می شود.
چندین روش برای ارائه یک سیستم دینامیکی وجود دارد که سه روش مهم تر آن عبارتند از[۲]:

۱-۲-۱- تابع تبدیل[1]

تابع تبدیل یک معادله دیفرانسیل خطی مستقل از زمان، نسبت تبدیل لاپلاس خروجی به تبدیل لاپلاس ورودی است به شرطی که تمام شرایط اولیه صفر باشد.تابع تبدیل، مشخصه ای از سیستم و مستقل از اندازه و طبیعت ورودی ویا تحریک است که اطلاعات مختصری راجع به ساختار فیزیکی سیستم در اختیار می گذارد.

۱-۲-۲- نمودار بلوکی[2]

نمودار بلوکی، نمایش ترسیمی از کار هر عنصر و عبور سیگنالهاست. مهم این است که سیگنالهایی که با هم جمع ویا از هم کم می شوند دارای بعد یکسان و واحد یکسانی باشند. وقتی خروجی برای مقایسه با ورودی به نقطه جمع فیدبک می شود، باید شکل آن نیز به شکل سیگنال ورودی در آید. مثلا در یک سیستم کنترل دما، خروجی سیستم معمولا دمای تحت کنترل است، سیگنال خروجی که دارای بعد دماست باید به نیرو یا وضعیت و یا ولتاژ تبدیل شود،

1- Transfer Function
2- Block Digram

تا بتوان آنرا با سیگنال ورودی مقایسه کرد. بنابراین نقش عنصر فیدبک، تصحیح خروجی قبل از مقایسه با ورودی است .

۱-۲-۳- فضای حالت[۱]

حالت: منظور از حالت یک سیستم دینامیکی، کوچکترین مجموعه ایی از متغیرهاست که اگر در زمان $t = t_0$ همراه با ورودیها در زمانهای $t \geq t_0$ معلوم باشد، رفتار سیستم را در زمانهای $t \geq t_0$ به طور کامل مشخص می شود.
متغیرهای حالت : متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی، متغیرهایی هستند که کوچکترین مجموعه تعیین کننده حالت سیستم را تشکیل می دهند. البته متغیرهای حالت لازم نیست کمیات فیزیکی قابل مشاهده و قابل اندازه گیری باشند، ولی بهتر است به طوری انتخاب شوند که در صورت امکان قابل اندازه گیری هم باشند.
در تحلیل فضای حالت با سه نوع متغیر سروکار داریم، متغیرهای ورودی، متغیرهای خروجی و متغیرهای حالت. قابل توجه است که نمایش فضای حالت یک سیستم نمایش یکتایی نیست و تنها تعداد متغیرهای حالت در تمام نمایشهای فضای حالت سیستم یکسان است.
در سیستم های کنترل پیوسته با زمان، انتگرالگیر عنصر حافظه به حساب می آید. خروجی انتگرالگیرها را می توان متغیرهایی در نظر گرفت که حالت داخلی سیستم را به طور کامل توصیف می کنند. بنابراین تعداد انتگرالگیرهای موجود در سیستم با تعداد متغیرهای حالت سیستم برابر است و متغیرهای حالت، خروجی انتگرالگیرها هستند.

۱-۳- باندگراف[۲]

انرژی به عنوان یک پارامتر مشترک در تمامی محدوده های فیزیکی می تواند نقش مهمی در مدلسازی سیستمهای دینامیکی داشته باشد. درهر سیستم فیزیکی مقداری از انرژی ورودی سیستم تلف شده و مقداری نیز در سیستم ذخیره می شود. در روش باندگراف با استفاده از این مفهوم، اجزایی تعریف شده که با استفاده از این اجزاء سیستم مدل شده و معادلات آن استخراج می شود. در این پروژه قصد داریم به مدلسازی سیستمهای دینامیکی با استفاده از روش باند گراف بپردازیم.
در صنعت همواره با چندین محدوده فیزیکی (الکتریکی، مکانیکی، هیدرولیک،آکوستیک، حرارت، ترمودینامیک وغیره) در یک سیستم مواجهیم، بنابراین روشی که قابلیت کاربرد در تمامی محدوده های فیزیکی را داشته باشد دارای مزیت ویژه ای خواهد بودکه روش باندگراف چنین قابلیتی را دارد. باندگراف یک بیان گرافیکی از دینامیک سیستمهای فیزیکی است که مستقل از محدوده های فیزیکی می باشد. بدین معنی که سیستمهایی با محدوده های مختلف فیزیکی با یک زبان توصیف می شوند.
روش باندگراف در سال ۱۹۶۱ توسط پینتر[۳] در دانشگاه M I T ابداع شد[۳]. دانشجویان او کارناپ[٤] (دانشگاه UC Davis) و روزنبرگ[٥] (دانشگاهMichigan) در دهه شصت به بسط وتوسعه روش در مسائل مختلف پرداختند و

2- State Space
3- Bond Graph
1- Henry M. Paynter
4- Dean C.Karnopp
5 - Ronald C.Rosenberg

بعدها در دانشگاههای مذکور مشغول به تحقیق و مطالعه در این زمینه شدند[۴،۵،۶ و۷]. در دهه هفتاد نیز ون دیکسهرن[۱] (دانشگاه Twente) و توما[۲] (دانشگاه Waterloo) در اروپا روش باندگراف را به کار گرفتند[۸،۹،۱۰،۱۱و۱۲]. بریدولد[۳] در سال ۱۹۷۹ به مدلسازی سیستمهای پیچیده تر، خصوصا سیستمهای هیدرولیکی پرداخت ودر سال ۱۹۸۴ دکترای خود را در این زمینه اخذ نمود[۱۳،۱۴و۱۵]. برو نینک[۴] نیز در سال ۱۹۹۰ در دانشگاه Twente پایان نامه دکترای خود را در این زمینه گذراند[۱۸،۱۷،۱۶و۱۹].

گرند[۵] [۲۴،۲۳،۲۲،۲۱،۲۰و۲۵]، دافین تانگوی[۶] [۲۷،۲۶،۲۸و۲۹] و سیلیئر[۷] [۳۰،۳۱،۳۲و۳۳] نیز در دهه نود از این روش در سیستمهای ارتعاشاتی، کنترلی و شیمیایی استفاده کردند.

مقالات موجود در این زمینه اکثرا در Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control و Journal of the Franklin Institute چاپ می شوند.

تاریخچه کاملی از کارهای انجام شده در این زمینه مانندکتب منتشرشده ومقالات چاپ شده در WWW.ece.arizona.edu/cellier موجود می باشد.

علیرغم کاربرد این روش در اکثر سیستم های فیزیکی متاسفانه هنوز در ایران به طور جدی از این روش جهت مدلسازی سیستمهای دینامیکی استفاده نمی شود. تنها عرشی و طباطبایی در گروه مهندسی پزشکی دانشگاه امیرکبیر از این روش در مدلسازی سیستمهای حیاتی و تحقیقات بالینی استفاده می کنند. که بعنوان مثال می توان به مدلسازی ریاضی سامانه های موثر بر سرنوشت دارو در بدن[۸] اشاره که در آن فرآیندهای موجود در هضم وجذب و دفع دارو در بدن به روش باندگراف مدل می شوند[۳۴].

۱-۴- کارهای انجام شده در این تحقیق:

۱- تدوین، گردآوری و تشریح روش باندگراف و همچنین استخراج معادلات برای مسائل متعدد

۲- مدلسازی شیر کنترل نئوماتیکی و بحث و بررسی روی اثر پارامترها بر پاسخ سیستم

۳- جایگذاری ضریب اصطکاک غیر دائم در معادلات ناویراستوکس سیال تراکم ناپذیر و ارائه مدل باندگراف برای سیستمهای هیدرولیکی، مدلسازی و تحلیل سیستم کنترل سطح - دبی موجود در آزمایشگاه مهندسی شیمی دانشگاه اراک.

۴- مدلسازی یک سیستم تعلیق فنر و کمک فنر و همچنین یک سیستم تعلیق هیدروپنوماتیک (مدل یک چهارم خودرو) با استفاده از روش باندگراف و بحث و بررسی روی نتایج. در نهایت بسط مدل یک دوم و همچنین کاربرد المان C چنددرگاهی[۹] و امکان مدلسازی انتقال حرارت اتلافی از روغن به گاز

---

1 - Jan J.Van Dixhoorn
2- Jean U.Thoma
3- Breedveld.P.C.
4- Broenink
5- Grand .J.J
6- Dauphin –Tanguy G.
7- Cellier F.E.
1- Pharmacokinetic
9- C-Field

۱-۵- مطالب ارائه شده در فصلهای این پایان نامه:

در پایان این قسمت، توضیح مختصری در مورد فصلهای آتی ارائه می شود. در فصل دوم بـه معرفـی روش، المانهـای موجود، علّیت، بیان کاربردها، قابلیت آن در مدلسـازی سیسـتمهای دینـامیکی و اسـتخراج معـادلات سیسـتم پرداختـه می شود. با استفاده از این اصول یک سیستم شیر کنترل نئوماتیکی در فصل سوم مدل می شـود و پـس از مدلسـازی و بررسی نتایج، روی اثر پارامترها بر پاسخ سیستم بحث و بررسی مـی گیـرد. در فصـل چهـارم، بـا جایگـذاری ضـریب اصطکاک غیر دائم در معادلات ناویراستوکس سیال تراکم ناپذیر، مدل موجود برای سیستمهای هیدرولیکی تصـحیح می شود. در ادامه، سیستم کنترل سطح - دبی موجود در آزمایشگاه مهندسی شیمی دانشگاه اراک با اسـتفاده از مـدل ارائه شده در این فصل، مدلسازی شده و مورد بررسی قرار می گیرد.

در فصل پنجم به بررسی کاربرد باندگراف در مدلسازی سیستم های حرارتـی و ترموهیـدرولیکی پرداختـه مـی شـود. المان Rs وکاربرد آن در مدلسازی سیسـتمهای حرارتـی، بانـدگراف کـاذب و المـان C چنـددرگاهی در مدلسـازی سیستم های ترموهیدرولیکی معرفی می شوند .

در فصل ششم ابتدا چگونگی مدلسازی حسگرها و سیگنالها توسط باندهای فعال بیـان مـی شـود. سـپس تئـوری هـای مختلف کنترل مانند گراف گذر سیگنال، تابع تبدیل و کنترل کننده PID با استفاده از روش باندگراف مورد بررسـی قرار می گیرند. در ادامه توضیحاتی در مورد کنترل مدرن ارائه می شود که هدف ما در این قسمت بیان امکان استفاده از کنترل مدرن در کنترل سیستمهایی است که باندگراف مدل شده اند.

فصل هفتم به سیستم تعلیق اختصاص داده شده است. ابتدا توضیح اجمالی در مورد سیستمهای تعلیق خصوصـا، تعلیـق فنر و کمک فنر و تعلیق هیدروپنوماتیک، ارائه می شود. سـپس یـک سیسـتم تعلیـق فنـر و کمـک فنـر سـاده از روش باندگراف مدل می شود. سپس یک سیستم تعلیق هیدروپنوماتیک (مدل یک چهارم خودرو) با روش باندگراف مدل شـده، نتـایج مـورد بحـث و بررسـی قـرار مـی گیـرد. در نهایـت بسـط مـدل یـک دوم و همچنـین کـاربرد المـان C چنددرگاهی و امکان مدلسازی انتقال حرارت اتلافی از روغن به گاز بررسی می شود.

در فصل هشتم مدل باندگراف موجود برای مسائل دینامیک سیالات محاسباتی[1] ارائه می شود که تنهـا بـه توضـیح در این زمینه اکتفا می شود. در نهایت نیز به بیان دیدگاه خود در مورد کاربرد روش باندگراف در این زمینه می پردازیم.

فصل نهم نیز به طور اختصار کاربرد روش باندگراف در عیب یابی سیستمهای دینامیکی[2] بیان می شود.

1- Computational Fluid Dynamic
2- Fault Detection and Diagnosis

فصل دوم
روش باندگراف

باندگراف یک بیان گرافیکی از دینامیک سیستمهای فیزیکی است که مستقل از محدوده های فیزیکی می باشد. بدین معنی که سیستمهایی با محدوده های فیزیکی مختلف مانند سیستمهای الکتریکی، مکانیکی، هیدرولیکی، آکوستیک، حرارتی، ترمودینامیک و غیره با یک زبان توصیف می شوند. در واقع باندگراف ابزاری قدرتمند برای مدلسازی سیستمهای مهندسی است، خصوصا هنگامی که سیستم شامل محدوده های فیزیکی مختلف باشد.در این روش با استفاده از مجموعه ای از اجزاء، دینامیک سیستم بیان می شود. همچنین این روش وسیله ای برای ساخت معادلات و پیشگویی وضعیت سیستم می باشد. در ادامه به بیان کلیات این روش خواهیم پرداخت[۱۷].

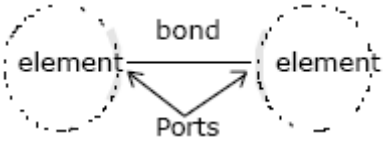
۲-۱- متغیرهای توان[1]

اصول این روش بر پایه انرژی وتبادل انرژی بین اجزای مختلف سیستم است. در این روش ابتدا باید سیستم به مجموعه ای از اجزای مورد نظر، به عنوان واحدهای دینامیکی کوچک، شکسته شده و در نهایت اجزای موجود با استفاده از ساختارهایی، جهت ساخت مجدد سیستم و تبدیل به زبان مدل کنار هم چیده شوند.

المانهای روش، یکسری المانهای واردکننده، ذخیره کننده وتلف کننده انرژی می باشند. بطوری که انرژی ورودی به سیستم از طریق المانهای ورودی، به سیستم وارد شده، بخشی از آن در المانهای تلف کننده، تلف شده و مابقی آن در المانهای ذخیره کننده، ذخیره می شود.

1- Power Variables

المانهای فوق مطابق شکل (۲-۱) توسط خطوطی به نام باند[1] به هم متصل می شوند که بیانگر مسیر انتقال انرژی می باشند.



شکل (۲-۱) جریان انرژی بین دو باند[۱۹]

انرژی نیز بصورت حاصلضرب دو متغیر *جریان*[2] و *پتانسیل*[3] تعریف می شود:

$$P = e * f \qquad (۱-۲)$$

جدول (۲-۱) متغیرهای توان را در محدوده های مختلف فیزیکی معرفی می کند[۱۵].

جدول (۲-۱) متغیرهای توان در محدوده های مختلف فیزیکی

جریان	***پتانسیل***	**سیستم**
سرعت (v)	نیرو (F)	مکانیکی
سرعت زاویه ای (ω)	گشتاور (T)	
جریان الکتریکی (i)	ولتاژ (V)	الکتریکی
دبی حجمی ($\dot{Q}$)	فشار (P)	هیدرولیکی
نرخ تغییرات انتروپی ($\dot{S}$)	دما (T)	حرارتی
دبی حجمی ($\dot{Q}$)	فشار (P)	
دبی جرمی ($\dot{m}$)	پتانسیل شیمیایی (μ)	شیمیایی
دبی جرمی ($\dot{m}$)	آنتالپی (h)	
شار مغناطیسی ($\dot{\varphi}$)	نیروی محرکه مغناطیسی (e_m)	مغناطیسی

۲-۲- المانهای استاندارد دربانداگراف

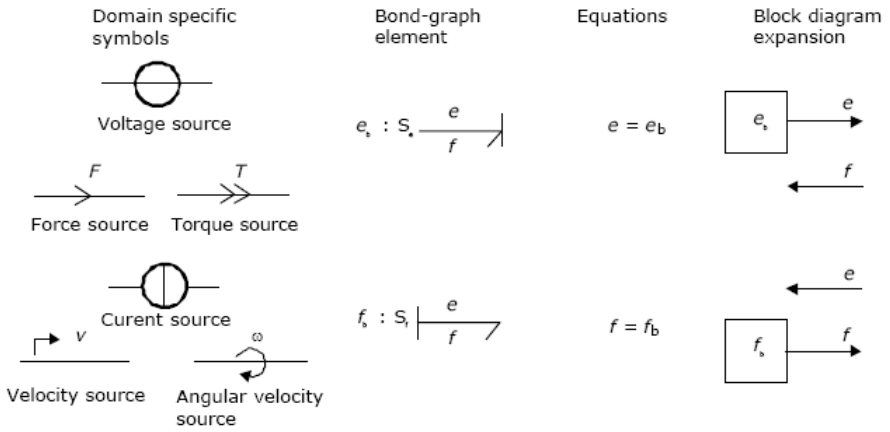
باندگراف دارای ۹ المان اصلی است که در زیر به معرفی و ارائه روابط سازگاری آنها خواهیم پرداخت[۱۹،۱۵و۳۵].

۲-۲-۱- المانهای ورودی (منبع)

الف)منبع *پتانسیل*[4] (SE): دارای یک درگاه انرژی است که *پتانسیل* در آن از پیش تعیین شده و بصورت تابعی از زمان و یا حالات سیستم می باشد. مقدار *جریان* در این المان تابع سیستم است.

1- Bond
2- Flow
3- Effort
4- Source of Effort

ب)منبع *جریان*[1] (SF): مانند منبع *پتانسیل*، دارای یک درگاه انرژی است و *جریان* در آن از پیش تعیین شده و بصورت تابعی از زمان و یا حالات سیستم می باشد، *پتانسیل* آن نیزتابع سیستم می باشد. در شکل (۲-۲) المانهای منبع نمایش داده شده اند.



شکل (۲-۲) المانهای ورودی[۱۹]

۲-۲-۲-۲ ,R ,C ,I:

هر سه دارای یک درگاه انرژی اند و از طریق باندهایشان با متغیرهای *جریان* و *پتانسیل* در ارتباطند.

الف) المان I : این المان ذخیره کننده انرژی می باشد و وجود آن از نقطه نظر مادی (جرم) در مکانیک نشات گرفته است. رابطه *جریان* و *پتانسیل* در یک المان خطی ساده، مطابق زیراست:

$$e(t) = \frac{d[m(t)\,f]}{dt} \quad \text{یا} \quad f(t) = \frac{1}{m(t)}\int_{-\infty}^{t} e(\xi)d\xi \qquad (۲-۲)$$

تابع جرم m(t) به صورت تابعی از زمان بیان شده است. در مکانیک ذره ای نیوتون، جرم با زمان تغییر نمی کند ولی در حرکت دورانی یا در مدار الکتریکی جرم کلی I با زمان تغییر می کند.

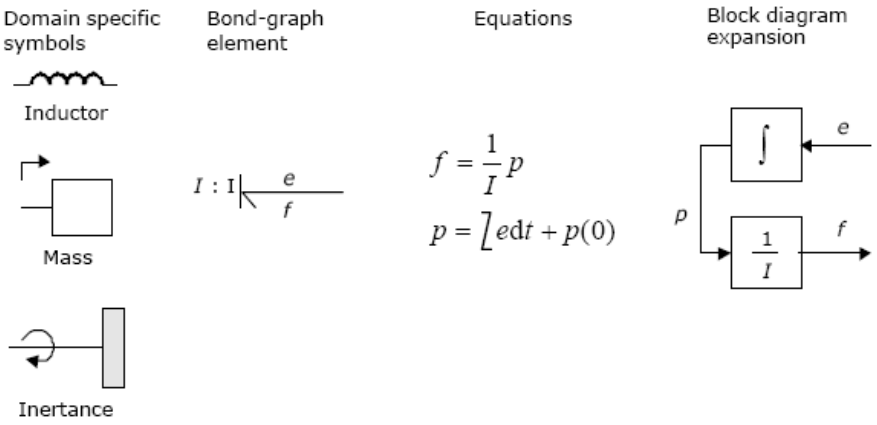
در این المان مومنتوم جرم دارای نقش اساسی است، بطوری که روابط فوق را می توان بر حسب مومنتوم بیان کرد. شکل (۲-۳) معرف یک المان I می باشد.

$$e(t) = \frac{dp}{dt} \quad \text{یا} \quad p(t) = \int_{-\infty}^{t} e(\xi)d\xi \qquad (۲-۳)$$

ب) المان C : فنر هوک و خازن الکتریکی را می توان با المان C مدل کرد. این المان هم ذخیره کننده انرژی است و روابط آن به شکل زیر است:

$$e(t) = F\left(t, \int_{-\infty}^{t} f(\xi)d\xi\right) \quad \text{یا} \quad f(t) = \frac{dG(t,e(t))}{dt} \qquad (۲-۴)$$

1- Source of Flow



شکل (۲-۳) المان I [۱۹]

در روش باندگراف، انتگرال جریان، جابه جایی تعمیم یافته[1] یا شارژ المان C[2] نامیده می شود.

$$Q(t) = \int_{-\infty}^{t} f(\xi)d\xi \qquad (۲-۵)$$

بر طبق این تعریف روابط فوق را می توان بازنویسی کرد:

$$e(t) = F\big(t, Q(t)\big) \quad \text{یا} \quad \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dG\big(t, e(t)\big)}{dt} \quad \text{یا} \quad Q(t) = G\big(t, e(t)\big) \qquad (۲-۶)$$

که تابع G یک تابع تک مقداری است.

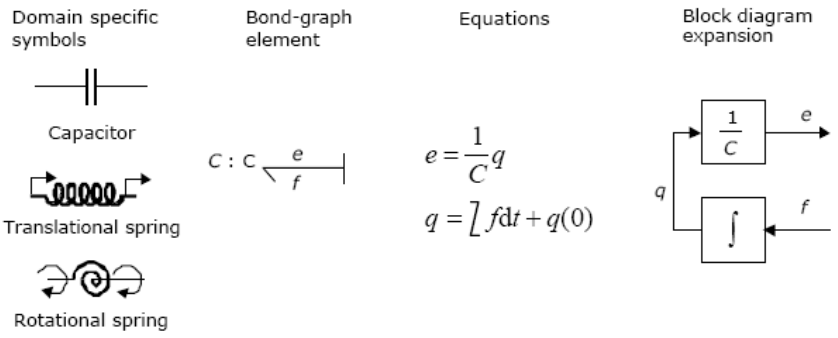
در فنر هوک :

$$e(t) = K(t)\int_{-\infty}^{t} f(\xi)d\xi = K(t)Q(t) \quad \text{یا} \quad f(t) = \frac{d\big(e(t)/K(t)\big)}{dt} \qquad (۲-۷)$$

و برای ذخیره کننده های الکتریکی ،حرارتی و سیالاتی :

$$e(t) = \frac{1}{C(t)}\int_{-\infty}^{t} f(\xi)d\xi = Q(t)/C(t) \quad \text{یا} \quad f(t) = \frac{d\big(C(t)e(t)\big)}{dt} \qquad (۲-۸)$$

در مدل خطی، K و C تنها تابعی از زمانند ولی اگر تابعی از متغیرها و حالات سیستم باشند، آنگاه مدل غیر خطی خواهد شد. شکل (۲-۴) چند المان C را نمایش می دهد.



شکل (۲-۴) المان C [۱۹]

1- Generalized Displacement
2- Charge of C Element