

# مجله روش های محاسباتی در علوم مهندسی

مجله روش های محاسباتی در علوم مهندسی ، جلد 1 ، شماره 3 ، پاییز 1402

شماره پیاپی 3



دانشگاه ایلام

فصل نامه علمی

## فهرست مقالات

اثر میراگرهای جرمی تنظیم شونده ی منفرد و چندگانه بر زمان آرامش ساختمان های بلند فولادی تحت جنبش زلزله  
علیرضا قاسمی ، محمود عدالتی

Comparing the performance of SVC and STATCOM for reactive power compensation in transmission lines  
امیر رضا عزیزی ، عرفان پاریاب

Improvement of flux and torque ripple in direct torque control (DTS) of induction motor using improved switching tables  
رحمت اعظمی ، سامان اسماعیل بیگی ، محمد امین شیرخانی

روش های برآورد تلفات بار سرگردان در ماشین های القایی  
علی یزدانی باغملکی

مدل سازی فازی ریه با هدف تحلیل ناشی از کرونا  
علی رضواند

The spectral characterization of n-generalized skew projections  
سیده سارا کریمی زاد

## The Effect of Single and Multiple Tuned Mass Dampers on Settling Time of Steel Tall Buildings under Earthquake Motion

Alireza Ghasemi <sup>1</sup> and Mahmoud Edalati <sup>1,\*</sup>

1- Department of Civil Engineering, Ilam University, Ilam, Iran  
E-mails: [alirezaghasemi1994.agh@gmail.com](mailto:alirezaghasemi1994.agh@gmail.com) ; [m.edalati@ilam.ac.ir](mailto:m.edalati@ilam.ac.ir)

\* Corresponding Author

### Abstract

Providing novel and effective devices in order to make structures stable under unpredicted natural loads has become a challenging issue for civil engineers. Tuned mass damper (TMD) is one of the effective methods to make structures resistant against the natural dynamic loads such as earthquake and wind. In this paper, the influence of single tuned mass damper (STMD) and multiple tuned mass dampers (MTMDs) on the settling time of tall steel building under seismic loads was evaluated. For this aim, one lumped-mass structure with 20 stories was modelled. The mass ratio, damping ratio and the stiffness of dampers were the variables considered in this study. To model the structure, SAP2000 software was employed. Then, time history analysis scheme was carried out to assess the performance of structure. The obtained outcomes indicated that the displacement of structure strongly depends on the earthquake record. Moreover, the displacement was substantially reduced by using an appropriate TMDs distribution. Generally, TMD has activated after a first maximum applied load amplitude and will become able to reduce subsequent amplitudes. So, it should be stated that the structural responses of the building could be considerably reduced by providing the effective MTMDs in different stories and regulate the characteristics of dampers based on the structural parameters of tall buildings.

### Keywords

Single Tuned Mass Damper, Multiple Tuned Mass Dampers, Settling Time, Steel Tall Building.

## اثر میراگرهای جرمی تنظیم شونده‌ی منفرد و چندگانه بر زمان آرامش ساختمان‌های بلند فولادی تحت جنبش زلزله

علیرضا قاسمی<sup>۱</sup> و محمود عدالتی<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

ایمیل نویسندگان: [alirezaghasemi1994.agh@gmail.com](mailto:alirezaghasemi1994.agh@gmail.com) ; [m.edalati@ilam.ac.ir](mailto:m.edalati@ilam.ac.ir)

### چکیده

از چالش‌ها و دغدغه‌های تأثیرگذار در مهندسی عمران، کشف ابزاری نوین و مؤثر به منظور پایداری و محافظت از سازه‌ها و تجهیزات در مقابل اثرات مخرب نیروهای طبیعی وارد می‌باشد. بهره‌گیری از سیستم میراگر جرم تنظیم شونده از روش‌های مؤثر موجود برای مقابله با پاسخ‌های شدید سازه در برابر تحریکات دینامیکی ناشی از باد و زلزله است. در این مقاله از میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد و چندگانه به منظور بررسی اثر آنها بر زمان آرامش ساختمان بلند فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای استفاده شده است. یک مدل سازه‌ای به صورت جرم فضایی ۲۰ طبقه فولادی مدل‌سازی شده است. پارامترهای میراگرهای جرم تنظیم شونده، شامل نسبت جرمی، نسبت میرایی و سختی هستند که در سازه‌ی ۲۰ طبقه در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده‌اند. سپس تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سازه برای بررسی عملکرد آن انجام گرفته است. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که تغییر مکان سیستم تا حد زیادی به شکل رکورد زلزله ورودی وابسته است. با پراکنش (آرایش) مناسب میراگرهای جرم تنظیم شونده در طبقات مختلف ساختمان؛ تغییر مکان سازه به نحوه مطلوبی کاهش می‌یابد. در اصل میراگر جرمی تنظیم شده پس از وقوع اولین بیشینه بار ورودی (شتاب) فعال شده و توان فرو نشانیدن بیشینه‌های بعدی را دارا است. در صورت مکان‌یابی مناسب میراگرهای تنظیم شونده در طبقات مختلف ساختمان و همچنین تنظیم بهینه پارامترهای مکانیکی میراگرهای الحاق شده به سازه می‌توان پاسخ‌های آن را به نحو رضایت‌بخشی کاهش داد.

**کلمات کلیدی:** میراگر جرم تنظیم شونده منفرد، میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه، زمان آرامش، ساختمان بلند فولادی.

نام نویسنده مسئول: محمود عدالتی

ایمیل نویسنده مسئول: [m.edalati@ilam.ac.ir](mailto:m.edalati@ilam.ac.ir)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

### ۱- مقدمه

هیبریدی و نیمه فعال دارند. میراگرهای جرم تنظیم شونده (TMDs) یکی از انواع میراگرهای غیرفعال است که کاربرد آن در ساختمان‌های بلند روز به روز بیشتر می‌گردد [3,4].

رشد روز افزون ساختمان‌های بلند و اهمیت بسیار زیاد حفظ و نگهداری این نوع سازه‌ها در هنگام رخداد زلزله سبب شده است تا مطالعه و پژوهش در زمینه‌ی روش‌های پایداری آنها زیر اثر بارهای لرزه‌ای به امری ضروری تبدیل گردد. حفظ پایداری سازه‌های بلند رابطه‌ی مستقیمی با جابه‌جایی سازه دارد و یکی از مرسوم‌ترین روش‌های کنترل جابه‌جایی در این سازه‌ها، استفاده از میراگرهای جرم تنظیم شونده است. هرچند پژوهش‌ها و مطالعاتی در رابطه با میراگرهای جرمی در سراسر دنیا و همچنین در کشور انجام شده است، اما به مسئله تأثیرگذاری پراکنش جرم میراگرها در ارتفاع سازه بر زمان آرامش پرداخته نشده است.

استفاده از سیستم‌های میراگر جرم تنظیم شونده (TMD) یکی از روش‌های مؤثر موجود برای کنترل پاسخ‌های شدید سازه در مقابل تحریکات دینامیکی است. با به دست آوردن الگویی مناسب و کاربردی در به‌کارگیری TMDها، می‌توان پاسخ سازه‌ها را در برابر نیروهای لرزه‌ای کاهش داد. در واقع هدف از به‌کارگیری این نوع سیستم غیرفعال، کاهش تقاضای اتلاف انرژی سازه در اثر تحریکات نیروهای خارجی از جمله باد و زلزله است. به طور معمول کاهش تقاضا توسط انتقال بخشی از انرژی سازه به میراگر جرمی تنظیم شونده صورت می‌گیرد [5].

روند کنونی در صنعت ساخت و ساز، تقاضای ساختمان‌های بلندتر و مقاوم‌تر را طلب می‌نماید. این ساختمان‌ها بایستی دارای انعطاف‌پذیری بیشتر و میرایی کمتر باشند. در سال‌های اخیر احداث ساختمان‌های بلند به ویژه در شهرهای بزرگ، که با مشکل کمبود فضای لازم برای ساخت مسکن مواجه‌اند، مورد توجه دولت‌ها و مراجع ذی ربط قرار گرفته است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که اغلب در این ساختمان‌ها از مواد و مصالحی استفاده می‌شود که سبک بوده و از قابلیت انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار باشند [1]. کمبود نسبت میرایی و میزان جذب انرژی این سازه‌ها منجر به ایجاد دامنه ارتعاشات بزرگ حتی در زلزله‌هایی با سطح متوسط می‌گردد. سرمایه‌گذاری بالا در ساخت این نوع سازه‌ها سبب شده است تا با پرداخت هزینه‌ای نه چندان قابل توجه، استفاده از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای را توجیه کند.

فراگیرترین کنترل ارتعاشی استفاده شده در مهندسی عمران، دستگاه میراگر جرم تنظیم شده (TMD) است. بر اساس جزئیات جرم-میراگر- فنر، TMD سختی و میرایی سازه‌ها را افزایش می‌دهد تا برخی از نامطلوب‌ترین ارتعاشات آنها که ناشی از فرکانس تشدید اصلی است را کاهش دهد [2].

در طراحی ساختمان‌های بلند، کنترل پاسخ دینامیکی سازه یا به عبارتی کنترل جابه‌جایی انتهایی سازه از اهمیت بالایی برخوردار است که برای کنترل آن از میراگرها استفاده می‌شود. میراگرها انواع مختلفی مانند فعال، غیرفعال،

ساختمان فلزی، یکی با اسکلت قاب خمشی و با در نظر گرفتن صلبیت کف و دیگری ساختمان متکی بر اسکلت با اتصالات مفصلی به همراه بادبندهای ضربدری در وضعیت‌های مختلف بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میراگر جرمی بعد از اولین شتاب بیشینه‌ی ورودی فعال شده و توان فرونشاندن بیشینه‌ی مقادیر ورودی و خروجی را دارا است [12].

ماتا<sup>۱۰</sup> و دی‌استفانو<sup>۱۱</sup> (۲۰۰۹) در مقاله‌ی خود با عنوان کارایی لرزه‌ای، مفهوم TMD باغ سقف را معرفی کرده‌اند. این سیستم یک جاذب ارتعاش انفعالی نوآورانه برای سازه‌های ساختمانی تلقی می‌گردد که ترکیب قابلیت‌های کاهش واکنش دینامیک TMDها با مزایای محیطی باغ‌های سقفی سنتی مورد نظر باشد. به منظور محدود کردن اثر تنظیم نامناسب و اتلاف کنترل به دلیل تغییرپذیری درونی جرم آن، TMD سقف باغ از نوع آونگ غلتان بوده و با پیوند طبیعی مستقل از جرم توصیه می‌شود. آنها در مطالعه‌ی خود از آونگ غلتان برای پیکربندی سیستم استفاده نمودند تا در مواجهه با شدت لرزه‌ای، غیر حساس بوده و رفتار آن نیز تا حدودی خطی باشد [13]. یک رویکرد جدید و دقیق مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای محاسبه پارامترهای بهینه میراگر جرم متوازن برای کنترل جابجایی‌های سیستم‌های تک درجه آزادی (SDOF) و قاب‌های ساختمانی چند طبقه که در معرض رکوردهای واقعی حرکت زمین قرار دارند، توسط بشارتیان و همکاران پیشنهاد شده است [14]. در سال ۲۰۱۴ جبرایل بکداس<sup>۱۲</sup> و سینان ملیح<sup>۱۳</sup>، در پژوهشی فرایند بهینه‌سازی تمام پارامترهای TMD از جمله جرم، سختی و عامل میرایی را بررسی کردند. آنها با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی و تحلیل دینامیکی سازه با حل زوج معادلات حرکت به این نتیجه رسیدند که روش جستجوی هارمونی و همچنین کاهش پارامترهای کوچک‌تر TMD به ویژه میرایی در کاهش جابه‌جایی نسبت به روش‌های دیگر مؤثرتر است [15]. در سال ۲۰۱۵ لونگ لین<sup>۱۴</sup> و همکاران، در مقاله‌ای بیان داشتند که استفاده از سیستم TMD غیرخطی، عملکرد کنترلی بهتری در سازه‌ها دارد و نسبت به سیستم‌های TMD خطی مناسب‌تر است [16].

گروکو<sup>۱۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶، در مقاله‌ای با عنوان بهینه‌سازی چند معیاره میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد با هدف کنترل ارتعاشات سازه‌ها ناشی از زمین لرزه‌های با شدت کم و متوسط بیان کردند که با تغییر نسبت جرم در مجموعه، پاسخ بهینه رخ خواهد داد. اگر این پارامتر افزایش یابد، بازده پاسخ سازه در اثر نیروهای وارده نیز به طور قابل توجهی بهبود خواهد یافت. همچنین گزارش کردند که بهترین و مطلوب‌ترین عملکرد TMD هنگامی حاصل می‌شود که فرکانس سازه اصلی در نقطه ورودی (شتاب) یا در منطقه رزونانس یا تشدید باشد. در نهایت عنوان شد که تغییر نسبت میرایی سازه موجب تغییرات مطلوب در کارایی TMD حاصل از بهینه‌سازی شده است. آنها دریافتند که استراتژی TMD برای سازه‌هایی که دارای میرایی کم هستند، کارآمدتر است [17]. در سال ۲۰۱۷ گیل<sup>۱۶</sup> و همکاران، به بررسی چند شیوه‌ای کنترل با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMDs) برای تحریک‌های لرزه‌ای سازه‌ها پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که پراکنش میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (D-MTMDs) به دلیل نصب آسان و قرارگیری در طبقات مختلف ساختمان، نسبت به میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد (S-TMD) و میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه‌ی (MTMDs) نصب شده در بام

باید توجه داشت که ساختار و مشخصات فیزیکی میراگرها و مکان قرارگیری آنها در سازه حائز اهمیت بوده و بایستی به طرحی بهینه، جامع و توجیه کننده‌ای در این زمینه دست یافت. پارامترهای میراگر TMD شامل میرایی، جرم و سختی هستند که عواملی کنترل کننده در طراحی به شمار می‌آیند. چنانچه مقادیر مناسبی برای آنها به دست آید، بهره‌وری بالایی در کاهش پاسخ‌های سازه خواهند داشت. محل قرارگیری میراگر نیز عاملی مهم در دریافت پاسخ سازه‌های بلند در برابر نیروهای دینامیکی است که می‌توان با تعبیه مناسب آنها، پاسخ سازه را تا حدودی بهینه نمود.

در سال ۱۹۹۵ کاریم<sup>۱</sup> و کلین<sup>۲</sup>، با بررسی‌هایی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که کارکرد میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMDs) به مقدار جرم، تعداد TMDها، دامنه‌ی فرکانس طراحی و نحوه‌ی توزیع آنها بستگی دارد [6]. در همان سال فنگ<sup>۳</sup> و میتا<sup>۴</sup> عنوان کردند که برای سازه‌های بلند مرتبه، سختی بالای اجزای سازه‌ای و عملکرد خمشی غالب، مانع از استفاده از سایر انواع میراگرها می‌شود. آنها یک سیستم ابتکاری را برای کنترل ارتعاشات چنین سازه‌هایی پیشنهاد دادند. سیستم پیشنهادی آنها از زیر سازه‌هایی که متشکل از کف چند طبقه بوده و به طور توأم در اتلاف انرژی بدون اضافه‌کردن جرم اضافی مشارکت می‌کنند، تشکیل یافته بود. این پژوهشگران از این شیوه برای بررسی رفتار لرزه‌ای یک سازه ساختمان بلند با ارتفاع ۲۰۰ متر و نسبت میرایی ۰/۰۲ استفاده کردند [7].

سادک<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۷، به بررسی و مطالعه‌ی استفاده از TMD برای کاربردهای لرزه‌ای پرداختند. آنها با ارائه‌ی نسبت‌های میرایی مساوی و تحلیل سازه‌های مختلف با حالت ترکیب مدهای ارتعاشی، روش‌هایی را برای انتخاب مناسب پارامترهای TMD پیشنهاد کردند. نتیجه‌ی این کار منجر به کاهش قابل توجهی در پاسخ سازه‌ها به نیروی زلزله بوده است [8]. در سال ۱۹۹۸ هادی<sup>۶</sup> و آرفیادی<sup>۷</sup>، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای میراگر جرمی را برای سه نوع سازه مختلف بهینه نمودند. این پژوهشگران شیوه‌های پیشنهادی که تا آن سال مطرح شده بود را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج بررسی به برتری روش الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های دیگر منجر شد [9]. در سال ۱۹۹۹ چانگ<sup>۸</sup>، با مطالعه بر روی سه نوع از میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMDs) به بررسی کاهش لرزش بیش از حد سازه‌ها پرداخت. این پژوهشگر نتایج پژوهش‌های خود را با عنوان میراگر جرمی تنظیم شونده و طرح‌های مطلوب آن برای ساختار کنترل لرزه‌ای ارائه نمود [10].

لی<sup>۹</sup> در سال ۲۰۰۰، عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMDs) را برای کاهش نوسانات نامطلوب تحت شتاب زمین مورد بررسی قرار داد. طی پژوهش‌های انجام شده به این نتایج دست یافت که به طور متوسط نسبت میرایی بهینه‌ی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه با افزایش تعداد کلی این نوع میراگرها کاهش یافته و با افزایش نسبت جرم افزایش می‌یابد. وی همچنین دریافت که فاصله‌ی مقادیر فرکانس بهینه‌ی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه با افزایش هر دو عامل نسبت میرایی و تعداد میراگرها افزایش می‌یابد. در نهایت گزارش گردید که MTMDs، اغلب برای کاهش نامطلوب سازه‌ها تحت شتاب زمین مناسب هستند [11].

در سال ۲۰۰۸ زهرایی و هاشمی، در پژوهشی به بررسی کنترل ارتعاشات لرزه‌ای قاب‌های فولادی متعارف به کمک میراگر جرمی پرداختند. در این پژوهش دو

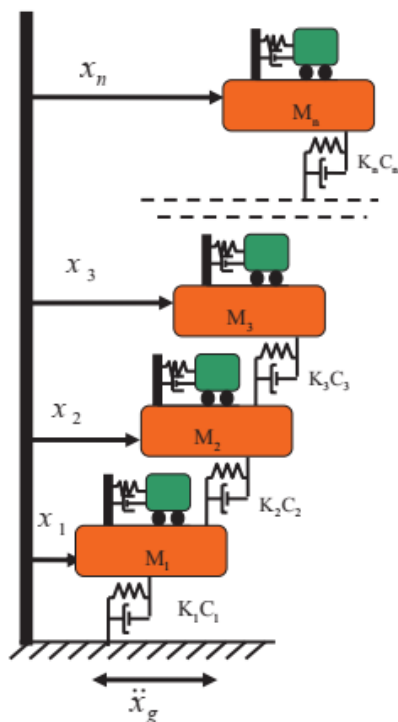
<sup>9</sup> Li, C<sup>10</sup> Matta, E<sup>11</sup> De Stefano, A<sup>12</sup> Bekdas, G<sup>13</sup> Melih, S<sup>14</sup> Long Lin, G<sup>15</sup> Greco, R<sup>16</sup> Gill, D<sup>1</sup> Kareem, A<sup>2</sup> Klein, S<sup>3</sup> Feng, M. Q<sup>4</sup> Mita, A<sup>5</sup> F, Sadek<sup>6</sup> Hadi, MNS<sup>7</sup> Arfiadi, Y<sup>8</sup> Chang, C. C

زمان آرامش ساختمان بلند فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای، مدت زمان انجام تحلیل تاریخچه زمانی به طور تقریب دو تا سه برابر مدت زمان مؤثر زلزله در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که بعد از اتمام زلزله، پاسخ‌های سازه برای حالت ارتعاش آزادی که پس از اتمام رکورد زلزله رخ می‌دهد، تا هنگامی که سازه به حالت سکون تقریبی خود می‌رسد، ادامه می‌یابد.

## ۲- میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه<sup>۱۹</sup>

با توجه به عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی زلزله و همچنین مشخصات دینامیکی سازه مثل فرکانس‌های طبیعی و نسبت استهلاک موده‌های مختلف ارتعاشی، مفیدتر آن است که از تعداد میراگرهای بیشتر استفاده شود. بایستی این میراگرها به نحوی طراحی شوند که دارای فرکانس ارتعاشی نزدیک به هم باشند تا بتوان محدودی بیشتری از فرکانس‌ها را پوشش داد. به این گونه سیستم‌ها، میراگرهای تنظیم شونده چندگانه یا MTMDs گفته می‌شود. در این حالت حساسیت سیستم کنترلی به پارامترهایی مثل تحریک ورودی کاهش می‌یابد. به منظور بهبود عملکرد TMD، می‌توان از مواد کشسان لزج در اتصال جرم آن به سازه بهره برد تا پاسخ لرزه‌ای از طریق استهلاک انرژی به روش‌های دیگر نیز صورت گیرد [21].

میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه به دو صورت در سازه پراکنش می‌یابند. دسته‌ی نخست آن، میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه در یک طبقه (به ویژه در بام ساختمان) هستند. دسته‌ی دیگر میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه در ارتفاع هستند که در طبقات ساختمان توزیع می‌شوند. در شکل ۱ نمونه‌ای از این میراگرها به نمایش در آمده است [22]. بررسی نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که به طور معمول میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه در ارتفاع کارایی بهتری نسبت به میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه در تراز یک طبقه را دارند. از سوی دیگر میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه‌ی توزیع شده در یک طبقه از نظر مکان‌یابی هندسی وضعیت بهتری نسبت به میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه توزیع شده در ارتفاع سازه را دارند.



شکل ۱ میراگر جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) [22]

ساختمان، عملکرد بهتری دارند. آنها همچنین دریافته‌اند که قابلیت اطمینان در حفظ استحکام سازه در حالت سیستم D-MTMDs برای کنترل پاسخ و تغییرمکان متوسط و قابلیت اطمینان آنها در حالت کنترل پاسخ تغییرمکان نسبی طبقات در هنگام عدم اطمینان از سختی سازه‌ی اصلی، مطلوب گزارش شده است. این در حالی است که سیستم S-TMD در تغییرمکان نسبی طبقات و کنترل پاسخ شتاب، بیشترین قابلیت اطمینان را دارا است [18].

بیات و همکاران در سال ۲۰۱۸، در پژوهشی کارایی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMDs) را به منظور کاهش ارتعاش لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن تاریخچه زمانی واقعی بررسی نمودند. آنها به منظور مطالعه مقایسه‌ای، یک میراگر جرمی منفرد تنظیم شونده (S-TMD) را در بالای سازه‌های مشابه نصب کردند. در این مطالعه مشاهده شد که بیشینه‌ی جابه‌جایی با در نظر گرفتن شرایط یکسان برای MTMDs در مقایسه با S-TMD برای همه زلزله‌های واقعی کمتر است. همچنین میزان کاهش برش پایه و تغییرمکان جانبی نسبی طبقات با استفاده از پیکربندی مناسب MTMDs در تمامی حالت‌های زلزله واقعی بهتر از حالت منفرد است. بر اساس مطالعات صورت گرفته می‌توان دریافت که اثربخشی و کارایی MTMDs در مقایسه با S-TMD، بهتر و مناسب‌تر گزارش شده است [19].

سورش<sup>۱۷</sup> و مینی<sup>۱۸</sup> (۲۰۱۹) در پژوهشی اثر بخشی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMDs) را برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های بلند بررسی کردند. آنها گزارش دادند که افزایش تعداد میراگرهای جرمی تنظیم شونده (تنظیم شده با فرکانس‌های طبیعی بالاتر)، کاهش پاسخ‌های بیشینه (مقادیر اوج) را نشان داده و انتخاب محل قرار گیری TMDها (تنظیم شده با فرکانس‌های طبیعی بالاتر)، تحت تأثیر دامنه شکل مودی متناظر با فرکانس تنظیم TMD است. همچنین آنها دریافته‌اند که چیدمان قرارگیری TMDها، در صورت قرار دادن در کف طبقات با بیشینه دامنه‌ی شکل مودی، بیشترین کاهش در پاسخ مقادیر اوج را نشان می‌دهد [20].

هر چند پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران حاکی از گستردگی کارهای انجام گرفته بر روی میراگرهای جرمی تنظیم شونده دارد، اما تاکنون دستورالعمل جامع و یا آئین‌نامه‌ای مدون و مورد پذیرش جامعه‌ی مهندسی برای بکارگیری میراگرها در ساختمان‌ها تدوین نشده است. مشخصات فیزیکی میراگرهای جرمی تنظیم شونده و به طور خاص بحث پراکنش و توزیع این نوع میراگرها در طبقات مختلف ساختمان، نحوه قرارگیری و میزان تأثیر میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه به نسبت میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد در کاهش پاسخ جابه‌جایی، حالت‌های مختلفی را برای بررسی آنها به وجود آورده است. تاکنون در مطالعات انجام شده در یک مدل به تمامی پارامترهای مؤثر در کارایی میراگرها و پاسخ‌های سازه پرداخته نشده است. سه خصوصیت فیزیکی مهم میراگر شامل جرم، میرایی و سختی، در بازده میراگر نقش اساسی ایفا می‌کنند. با توجه به نوع، شدت و همچنین محدوده‌ی فرکانس زمین‌لرزه‌ها این عوامل تأثیرات متفاوتی بر رفتار سازه‌ها دارند. رشد روزافزون ساختمان‌های بلند و اهمیت بسیار زیاد حفظ و نگهداری این نوع سازه‌ها در هنگام رخداد زلزله، مطالعه و پژوهش در زمینه‌ی روش‌های پایداری و کنترل آنها در مقابل بارهای جانبی زلزله و باد را به امری ضروری تبدیل نموده است. استفاده از مستهلک کننده‌های انرژی و میراگرها نیاز به مطالعه و بررسی تمامی عوامل تأثیرگذار بر عملکرد آنها در سازه‌های بلند مرتبه را می‌طلبد.

در این مقاله تأثیر پراکنش (آرایش) ارتفاعی میراگرهای جرمی تنظیم شونده بر رفتار تغییرمکان یک ساختمان بلند ۲۰ طبقه فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای مختلف بررسی شده است. در ادامه برای تعیین تأثیر آرایش این میراگرها بر

<sup>19</sup> Multiple Tuned Mass Dampers

<sup>17</sup> Suresh, L

<sup>18</sup> Mini, M

$M_s$ ،  $C_s$  و  $K_s$  به ترتیب در روابط (۲)، (۳) و (۴) بیانگر ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه (بدون اثر TMD) هستند. از سوی دیگر، در این روابط ماتریس‌های  $M_d$ ،  $C_d$  و  $K_d$  مربوط به ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی TMD می‌باشند.

#### ۴- معیارهای آسایش و آرامش

در مراحل طراحی، حرکت انتقالی یک سازه را می‌توان از طریق آنالیز دینامیکی تخمین زد. در حالتی که سازه غیر متعارف و یا نمادی و سمبولیک باشد، ممکن است لازم شود که بر روی مدل آئروالاستیک آزمایشاتی همچون تحریک لرزه‌ای با استفاده از میز آزمایش لرزان و همچنین آزمایش تونل باد انجام پذیرد. نتایج حاصل در گام بعدی باید با حرکات سازه ساخته شده هماهنگ و اصلاح گردد. در این بین بایستی میزان احتمال بروز مشکلات در شرایط بهره‌برداری نیز پیش‌بینی شود. با مقایسه‌ی شتاب‌ها و پربودهای به‌دست‌آمده برای سازه با منحنی‌ها و محدوده‌های محسوسات می‌توان مسائل احتمالی را مشخص نمود. چنانچه حرکات در محدوده غیرقابل قبول باشند، روش‌های متفاوت و با درجه پیچیدگی مختلف را می‌توان به کار گرفت. اگر چه تغییر مکان‌های استاتیکی را می‌توان با افزایش سختی کاهش داد، ولی این افزایش سختی مؤثر، نقش مهمی بر کاهش شتاب‌ها نخواهد داشت. این مسئله را می‌توان با در نظر گرفتن معادله عمومی حرکت یک سازه به خوبی نشان داد [27,28]:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = P(t) + F(t) \quad (5)$$

از این رابطه می‌توان دریافت که شتاب متناسب با  $\omega^2 x_{\max}$  است. دانستن است که  $x_{\max}$  تغییر مکان اوج و  $\omega$  فرکانس دورانی حرکت می‌باشند. افزایش سختی با ضریب  $\lambda$  باعث کاهش  $x_{\max}$  با همان ضریب می‌شود. در نتیجه حاصل ضرب  $\omega^2 x_{\max}$  و شتاب اوج بدون تغییر می‌مانند. رابطه (۵) بیانگر آن است که افزایش جرم موجب کاهش شتاب می‌گردد. ولی باید توجه داشت که کنترل شتاب‌ها توسط افزایش وزن ساختمان، راه‌حلی پر هزینه و غیر عملی است. به ویژه هنگامی که این روش اثرات نامطلوبی نظیر افزایش بار پی‌ها در سازه را به همراه داشته باشد. یک روش کنترل مناسب شتاب، افزایش میرایی است.

حرکت ناشی از زلزله، از نقطه نظر واکنش انسان‌ها به آن متفاوت با حرکات ناشی از نیروهای باد است. بنابراین افزون بر ایمنی، آسایش ساکنان در هنگام وقوع زلزله از اهمیت بالایی برخوردار است.

#### ۴-۱- دیدگاه افراد از حرکت ساختمان

معمولترین عوامل ارتعاش سازه‌ها عبارتند از: باد، زلزله، ماشین‌آلات، کارخانجات نزدیک و انواع وسایل حمل و نقل. حرکات ناشی از این عوامل دارای شدت و مدت متفاوتی هستند. مکانیزم‌های متعددی برای تشدید آنها نیز وجود دارد. دریافت حرکات ساختمان تا اندازه زیادی به حساسیت سیستم عصبی بستگی دارد. اجزای تعادلی به ویژه گوش داخلی نقش ویژه‌ای در دریافت و حس شتاب‌های خطی و زاویه‌ای دارند. پاسخ انسان به ارتعاش ساختمان تابع عوامل بسیاری، نظیر حرکت اجسام معلق و صدای ناشی از باد و برخورد اجزای ساختمان به یکدیگر می‌باشد [29,30].

#### ۵- زمان آرامش

به طور معمول مشخصات عملکردی سیستم‌های کنترل بر حسب پاسخ گذرا به ورودی پله‌ی واحد بیان می‌شود [31]. سبب بکارگیری ورودی پله برای تعیین مشخصات عملکردی سیستم‌های کنترل در پاسخ گذرا، آن است که به سادگی می‌توان این ورودی و تابع تبدیل مربوطه را ساخت و برای شبیه‌سازی اثرگذاری‌های شدید نیز از آن استفاده نمود. چنانچه پاسخ پله مشخص گردد، از نظر ریاضی می‌توان پاسخ سازه به هر ورودی دیگر را محاسبه کرد [32].

پاسخ گذرای سیستم به ورودی پله‌ی واحد به شرایط اولیه بستگی دارد. در تعیین مشخصات پاسخ گذرای یک سیستم کنترل به ورودی پله‌ای بایستی موارد زیر مشخص شود [32]:

زمان آرامش یک ویژگی بسیار مهم برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها است. این ویژگی به صورت زمان شروع زلزله تا توقف ارتعاش سازه تعریف می‌شود. به عبارت دیگر این خاصیت شامل کل مدت زمان نوسان سازه تحت ارتعاش اجباری و آزاد است [23].

در این پژوهش به سبب آن که پراکنش میراگرها بر زمان آرامش بررسی می‌گردد، بیشتر به کارایی سازه‌های آنها در کاهش تغییر مکان جانبی طبقات توجه می‌شود. چرا که کاهش دادن زمان آرامش سازه به طور مستقیم به تغییر مکان جانبی وابسته است. هر چه تغییر مکان جانبی طبقات سازه در زمان کمتری، کاهش بیشتری را از خود نشان دهند و مقدار این جابجایی به سمت صفر میل نماید، زمان آرامش سازه کمتر شده و ساکنین احساس آرامش بیشتری در حین وقوع زلزله و پس از آن می‌نمایند. به طور مسلم زمان آرامش کمتر در سازه‌های مجهز به میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه توزیع شده در ارتفاع (طبقات) سازه بر حفظ آرامش افراد ساکن در تمامی طبقات مؤثر است. گاهی اوقات بکارگیری این میراگرها به صورت توزیع شده در یک طبقه (به ویژه بام ساختمان)، تنها معیارهای آسایش ساکنین را در بخشی از سازه بلند مرتبه تأمین می‌نماید و سبب عدم اقبال عمومی به استفاده از این ساختمان‌ها می‌گردد. امید است در آینده بتوان زمان آرامش را به عنوان یک معیار مکمل در کنار شتاب و دیگر معیارهای آسایش ساکنین در آئین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها لحاظ نمود.

به طور معمول برای دستیابی به مؤثرترین سیستم MTMD، پارامترهای زیر تعیین می‌گردند:

- تعداد بهینه TMDها
- توزیع محدوده فرکانسی TMDها
- ضرایب میرایی TMDها

میراگرهای جرمی چندگانه در کاهش پاسخ‌های سازه از میراگر جرمی منفرد مؤثرتر هستند. زیرا با استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه می‌توان گستره‌ی وسیع‌تری از حوزه‌ی فرکانسی را پوشش داد. افزون بر آن، چون مشخصات دینامیکی سازه تحت زلزله تغییر می‌کند، بنابراین کارایی میراگر جرمی غیرفعال منفرد با تغییر در نسبت فرکانس و میرایی بهینه کاهش می‌یابد. در نتیجه میراگرهای منفرد نسبت به میراگرهای جرمی چندگانه کارایی بالایی ندارند [24].

سیستم‌های کنترل فعال به طور عمده برای افزایش میرایی مؤثر سازه طراحی شده‌اند، بدون اینکه تأثیر عمده‌ای در سختی مؤثر سازه داشته باشند. حسگرهای آنها را می‌توان در موقعیت‌های مختلف سازه قرار داد تا تحریکات خارجی را بر حسب متغیرهای پاسخ سیستم میراگر جرمی توزیع شده (یعنی سرعت‌ها، جابجایی‌ها، شتاب‌ها و نیروهای کنترلی) اندازه‌گیری کند [25].

#### ۳- معادلات حاکم بر MTMDs

معادله‌ی دینامیکی حرکت سازه‌ی شکل ۱ برای یک ساختمان n طبقه با در نظر گرفتن تعداد  $n_d$  میراگر جرمی تنظیم شونده که در طبقات مختلف ساختمان توزیع شده‌اند را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [26]:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = F \quad (1)$$

در این رابطه بردار  $F$  بیانگر بردار نیروی وارد بر تراز طبقات سازه، بردارهای  $\ddot{x}$  و  $\dot{x}$  نیز به ترتیب نشانگر بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب در ترازهای مختلف سازه می‌باشند. همچنین در رابطه (۱)، ماتریس‌های  $M$ ،  $C$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی کل سازه با تأثیر TMD هستند. این ماتریس‌ها را می‌توان به صورت کلی زیر تعریف نمود:

$$M = M_s + M_d \quad (2)$$

$$C = C_s + C_d \quad (3)$$

$$K = K_s + K_d \quad (4)$$

برای مدل سازی TMD در SAP2000 پارامترهای اصلی طراحی TMD عبارتند از:

- جرم میراگر
- فرکانس میراگر
- ضریب (نسبت) میرایی میراگر

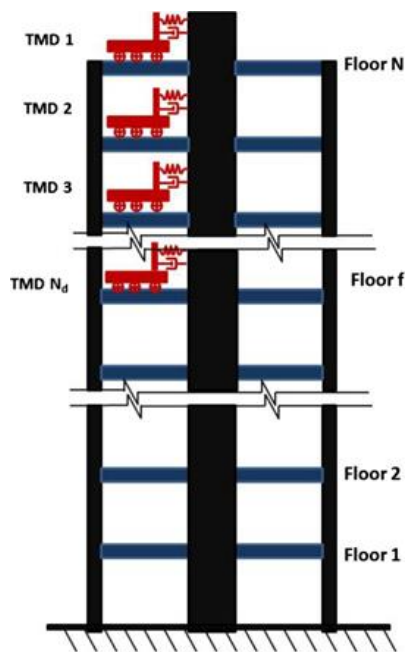
در مدل های سازه ای، مد غالب، اغلب مد اول می باشد. بنابراین مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شونده برای این مد تنظیم می گردد. شمای کلی مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شونده و پراکنش آن در طبقات در شکل ۲ نشان داده شده است [33].

برای مدل سازی میراگر در نرم افزار SAP2000 [34] ابتدا مشخصات المان Link در نرم افزار تعریف می شود. برای این کار به ترتیب به منوی زیر مراجعه می شود: Define > Section Properties > Link/Support Properties سپس add new properties را انتخاب کرده و مشخصات المان Link را در درجه آزادی U2 وارد می نمایند.

در قسمت Directional Properties با انتخاب گزینه Modify/Show for all پنجره Linear Link/Support Directional Properties شده و سختی و میرایی میراگر را وارد می شود. به منظور تخصیص دادن جرم میراگر از منوی زیر اقدام می گردد:

Assign > Joint > Masses > Translation1

همچنین تمام درجات آزادی جرمها اعم از جرم سازه و میراگر بجز جهت Translation1 بایستی بسته باشند.



شکل ۲ شمای کلی پراکنش میراگر جرمی تنظیم شونده [33]

- i. زمان تأخیر  $t_d$  (Time delay): زمانی است که طول می کشد تا پاسخ برای بار اول به نصف مقدار نهایی اش برسد.
- ii. زمان صعود  $t_r$  (Rise time): زمانی است که طول می کشد تا پاسخ از ۱۰٪ به ۹۰٪، یا از ۵٪ به ۹۵٪، یا از ۰٪ به ۱۰۰٪ مقدار نهایی اش برسد. برای سیستم های مرتبه دوم فرومیرا (زیر بحرانی) به طور معمول زمان صعود ۰٪ تا ۱۰۰٪ ملاک عمل قرار می گیرد. در سیستم های فرامیرا (فوق بحرانی) به طور معمول زمان صعود ۱۰ تا ۹۰ درصد به کار می رود.

- iii. زمان اوج  $t_p$  (Peak time): زمان لازم برای رسیدن به اولین اوج فراجش است.

- iv. بیشینهی فراجش  $M_p$  (Maximum Overshoot): بیشینهی فراجش مقدار اوج فراجش است که نسبت به مقدار مبنا (صفر یا یک) اندازه گیری می شود. در سیستم های سازه ای مبنا صفر و در سیستم های الکتریکی مبنا عدد یک است. در مواردی که مقدار حالت ماندگار پاسخ یک نیست، به طور معمول درصد فراجش به کار برده می شود. این مقدار به صورت زیر تعریف می شود:

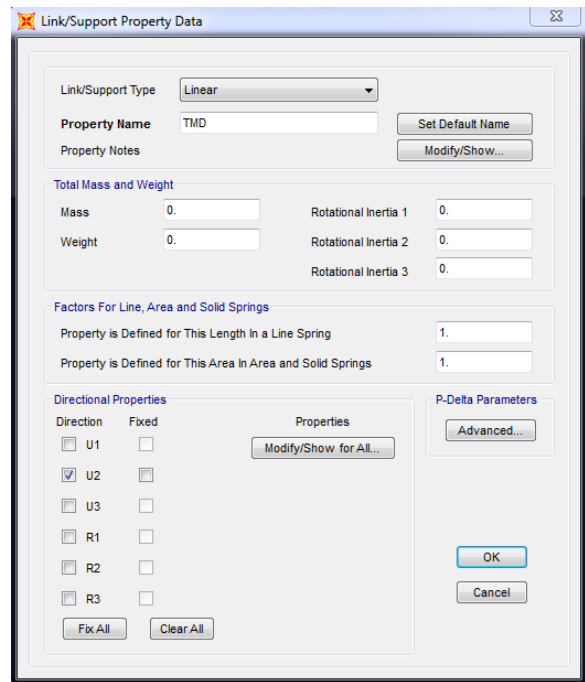
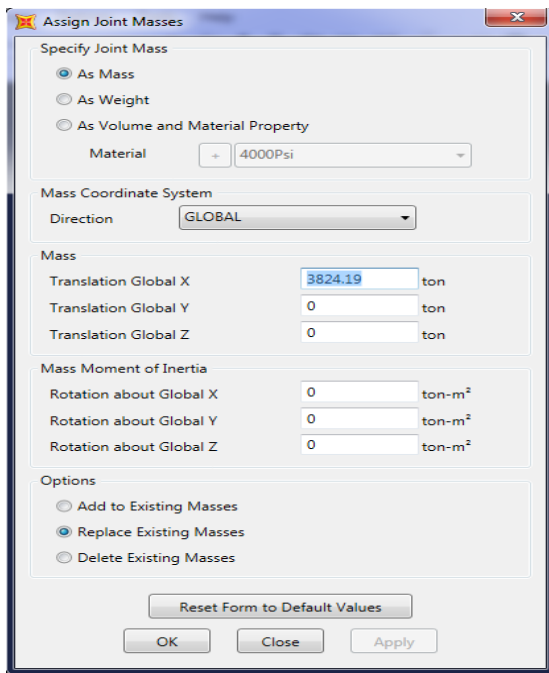
$$C(t_p) - C(\infty) = \frac{C(t_p) - C(\infty)}{C(\infty)} \times 100 \quad (۶)$$

که در آن  $C(t)$  پاسخ زمانی کمیت مورد نظر (مانند تغییر مکان یا سرعت یا ...) است.  $C(\infty)$  را به طور معمول مقدار بسیار کوچکی اختیار می نمایند.

- v. زمان آرامش (نشست)  $t_s$  (Settling time): زمانی است که طول می کشد تا منحنی پاسخ به گستره ی معینی حول مقدار نهایی اش برسد و در آن گستره بماند. این گستره به طور معمول بر حسب درصد مطلق از مقدار نهایی آن (بین ۲٪ تا ۵٪) بیان می شود.

اکثر سیستم های کنترل به ویژه سیستم های کنترل سازه ای، سیستم های حوزه ی زمان هستند. به سخن دیگر باید پاسخ زمانی قابل قبولی داشته باشند. یعنی سیستم کنترل را باید آنقدر تنظیم کرد که پاسخ گذرای آن رضایتبخش شود.

در بررسی پاسخ های سازه، معیارهای مختلفی وجود دارد. یکی از معیارها، بررسی مدت زمانی است که ارتعاش سازه به طول می انجامد. به طور معمول این زمان برابر است با بازه ی زمانی شروع وقوع زلزله (شروع ارتعاش سازه) تا زمان توقف ارتعاش سازه [3,4]. به عبارت دیگر این بررسی شامل مجموع مدت زمان نوسان سازه تحت ارتعاش اجباری و آزاد است. به طور معمول در طی وقوع زلزله سازه دچار نوسان می شود. این نوسان در دو مرحله ادامه پیدا می کند. مرحله اول مربوط به زمانی است که زلزله در حال وقوع می باشد که به آن ارتعاش اجباری می گویند. مرحله ی دوم زمانی است که زلزله باز ایستاده ولی سازه همچنان نوسان می کند. این مرحله به ارتعاش آزاد معروف است. به سخن دیگر، زمان آرامش بیانگر مدت زمانی است که طول می کشد تا سازه بعد از زمان وقوع زلزله به آرامش و سکون برسد. هر عاملی که باعث شود در عین حفظ شکل پذیری و مقاومت سازه، این زمان را کاهش دهد می تواند باعث بهبود رفتار سازه هنگام وقوع زلزله شود [3]. با توجه به توضیحات فوق می توان ارتعاش سازه را در دو مرحله ی ارتعاش آزاد و اجباری به دست آورد. در بررسی ارتعاش آزاد شرایط مرزی در لحظه حذف بار را به عنوان شرایط ابتدایی ارتعاش آزاد در نظر می گیرند. سپس با استفاده از روش های مختلف از جمله روش انتگرال دوهمامل یا دیگر روش های مرسوم، پاسخ های سیستم را بعد از حذف بار تا اتمام کامل نوسانات سازه ای محاسبه می نمایند.



شکل ۵ تعریف جرم TMD در نرم افزار SAP2000

برای این منظور، سه زوج شتاب‌نگاشت از زلزله بم در سال ۲۰۰۳ انتخاب شده است [35]. شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم [36] به مقیاس در آمده‌اند. برای بررسی اثر پراکنش میراگرهای جرم تنظیم شونده (منفرد و چندگانه) بر زمان آرامش ساختمان‌های بلند فولادی زیر اثر تحریک‌های لرزه‌ای، مدت زمان انجام تحلیل تاریخیچه زمانی دو برابر مدت زمان مؤثر زلزله در نظر گرفته شده است. به سخن دیگر، بعد از اتمام زلزله، تحلیل ارتعاش آزاد همچنان ادامه داشته و پاسخ‌های سازه ثبت می‌گردد.

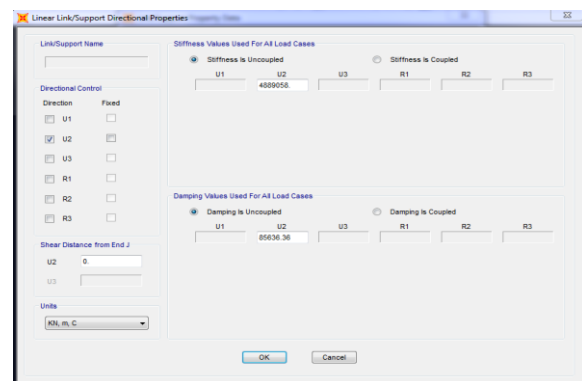
مشخصات سازه بیست طبقه در جدول ۱ درج شده است [21]. در این جدول، جرم طبقات مختلف ساختمان (به کیلوگرم) و سختی هر طبقه (بر حسب نیوتن بر متر) به ترتیب در ستون‌های ۲ و ۳ جدول ارائه شده است. برای بررسی مدت زمان آرامش ساختمان ۲۰ طبقه مورد مطالعه در این مقاله، برای هر تحلیل، مدت زمانی برابر با ۲ برابر مدت زمان زلزله تداوم زلزله در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال برای زلزله ایستگاه Golbaf که مدت زمانی برابر ۶۳.۹۹ ثانیه دارد، مدت زمان تحلیل برابر ۱۲۷.۹۸ ثانیه در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مقادیر زمان تحلیل تاریخیچه زمانی با توجه به مدت شتاب‌نگاشت‌های زلزله آورده شده است. در این جدول، مقادیر زمانی برای تحلیل تاریخیچه زمانی معادل دو برابر مدت زمان شتاب‌نگاشت زلزله فرض شده است.

مدت زمان آرامش به صورت فاصله زمانی بین شروع زلزله (آغاز ارتعاش اجباری) تا پایان ارتعاش آزاد سازه (خاتمه‌ی ارتعاش سازه پس از پایان تحریکات زلزله) محاسبه می‌گردد. نتایج بررسی و مقایسه‌ی مدت زمان آرامش سازه‌ی ۲۰ طبقه تحت زلزله‌های مختلف با استفاده از مطلوب‌ترین مشخصات پراکنش مختلف میراگر (حالت پنجم یا (MTMD-C5) (ببینید جدول پیوست و همچنین مرجع [26])، حالت میراگر جرم تنظیم شونده منفرد (STMD) و بدون وجود میراگر جرم تنظیم شونده (Non TMD) در جدول ۳ آورده شده است. نسبت جرمی میراگر به جرم سازه (۵ درصد) و نسبت میرایی میراگر (۱۰ درصد) فرض شده‌اند. نتایج مربوط به سازه‌ی ۲۰ طبقه در جدول مذکور و شکل‌های ۶ تا ۱۱ آورده شده است. از نتایج ارائه شده در جدول ۳ آشکار است که میزان زمان تحریک سازه در زلزله گلباف (بم) در حالت بدون میراگر برابر ۲۴/۵۰ ثانیه، در حالت استفاده از یک میراگر در طبقه فوقانی سازه، زمان تحریک برابر ۸/۲۰

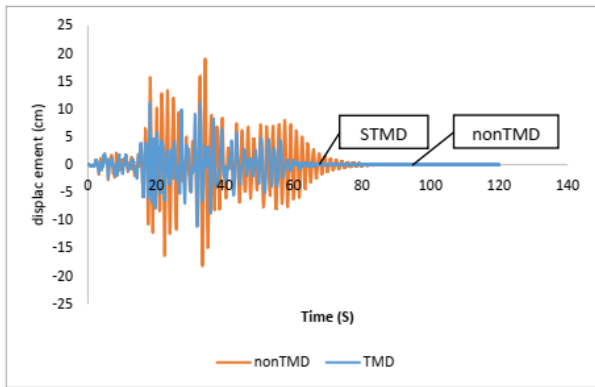
شکل ۳ تعریف مشخصات Link در نرم افزار SAP2000

#### ۷- مطالعه عددی

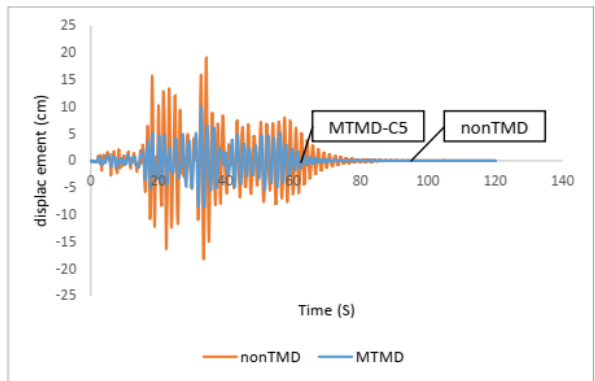
در بررسی پاسخ‌های سازه، معیارهای مختلفی وجود دارد. یکی از معیارها، بررسی مدت زمانی است که ارتعاش سازه به طول می‌انجامد. به طور معمول این زمان برابر است با بازه‌ی زمانی شروع وقوع زلزله (شروع ارتعاش سازه) تا زمان توقف ارتعاش سازه. به عبارت دیگر این بررسی شامل مجموع مدت زمان نوسان سازه تحت ارتعاش اجباری و آزاد است. به سخن دیگر، زمان آرامش بیانگر مدت زمانی است که طول می‌کشد تا سازه بعد از زمان وقوع زلزله به آرامش و سکون تقریبی بر اساس معیار تعریف شده برسد. هر عاملی که باعث شود در عین حفظ شکل‌پذیری و مقاومت سازه، این زمان را کاهش دهد می‌تواند باعث بهبود رفتار سازه هنگام وقوع زلزله شود.



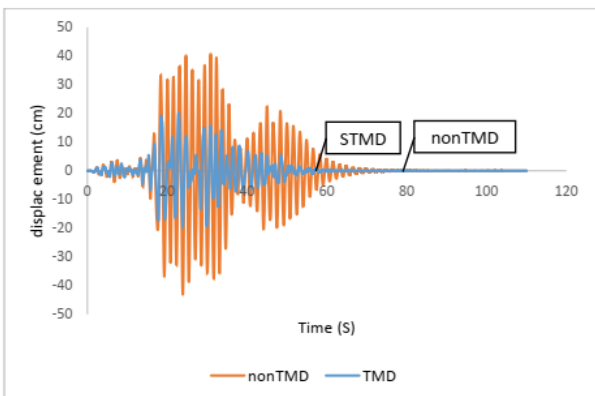
شکل ۴ تعریف مشخصات سختی و میرایی TMD در نرم افزار SAP2000



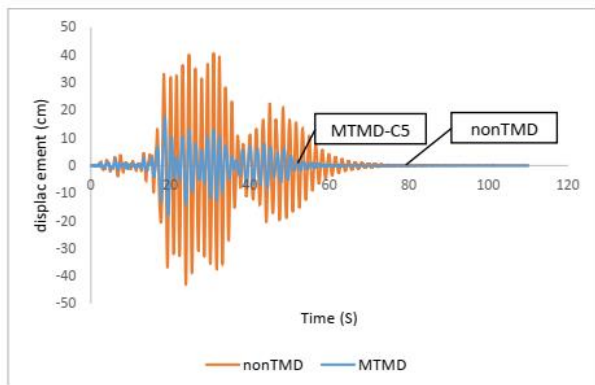
شکل ۶ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با و بدون میراگر منفرد تحت زلزله Golbaf



شکل ۷ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با میراگر چندگانه و بدون میراگر تحت زلزله Golbaf



شکل ۸ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با و بدون میراگر منفرد تحت زلزله Kerman



شکل ۹ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با میراگر چندگانه و بدون میراگر تحت زلزله Kerman

ثانیه و در حالت آرایش مطلوب برای میراگرهای چند گانه، این کمیت به ۵/۱۰ ثانیه کاهش می‌یابد که به طور قطع از نگرانی ساکنین سازه به مقدار قابل ملاحظه‌ای چه در هنگام وقوع زلزله و چه پس از آن کاسته می‌شود. کاهش زمان تحریک سازه در دو زلزله دیگر نیز مشابه زلزله گلباف می‌باشد. بنابراین جدول ۳ بکارگیری میراگرها و از آن مهم‌تر چینش آنها بر زمان آرامش سازه را به خوبی نشان می‌دهد. چینش میراگرها در طبقات مختلف سازه در جدول پیوست آمده است.

جدول ۱ مشخصات سازه بیست طبقه\* [21]

طبقه	جرم (کیلوگرم)	سختی (نیوتن بر متر)
۱	2.82E+05	430820723
۲	2.76E+05	1147963450
۳	2.76E+05	1147963450
۴	2.76E+05	1147963450
۵	2.76E+05	737959948.4
۶	2.76E+05	737959948.4
۷	2.76E+05	737959948.4
۸	2.76E+05	737959948.4
۹	2.76E+05	737959948.4
۱۰	2.76E+05	737959948.4
۱۱	2.76E+05	603996113.6
۱۲	2.76E+05	603996113.6
۱۳	2.76E+05	603996113.6
۱۴	2.76E+05	603996113.6
۱۵	2.76E+05	603996113.6
۱۶	2.76E+05	603996113.6
۱۷	2.76E+05	341399184.7
۱۸	2.76E+05	341399184.7
۱۹	2.76E+05	228642427.5
۲۰	2.92E+05	228642427.5

\* میرایی سازه ۲۰ طبقه برابر ۱ درصد فرض شده است.

جدول ۲ مقادیر زمان تحلیل تاریخیچه زمانی با توجه به مدت شتاب‌نگاشت‌های زلزله

نام ایستگاه	مدت زمان زلزله (sec)	مدت زمان تاریخیچه زمانی (sec)
BAM, 2003, Golbaf	63.99	127.98
BAM, 2003, Kerman	55.03	110.06
BAM, 2003, Zarand	42.23	84.46

جدول ۳ مدت زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله‌های BAM, 2003 (ثانیه)

نام ایستگاه	Non TMD	STMD	MTMD-C5
BAM, 2003, Golbaf	24.5	8.2	5.1
BAM, 2003, Kerman	21.8	6.4	5.8
BAM, 2003, Zarand	18.2	11.1	7.9

کاهش می‌یابد، در حالی که این کاهش در میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در مقایسه با حالت بدون میراگر به ۵۶.۶۰ درصد می‌رسد.

#### ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله از میراگرهای جرمی تنظیم شده برای بررسی اثر پراکنش میراگرهای جرم تنظیم شونده بر زمان آرامش ساختمان بلند فولادی ۲۰ طبقه تحت تحریک‌های لرزه‌ای مختلف استفاده شده است. نخست مدل سازه‌ی ۲۰ طبقه فولادی مدل‌سازی شده است. پارامترهای میراگرهای جرم تنظیم شونده، شامل نسبت جرمی، نسبت میرایی و سختی، در سازه‌ی ۲۰ طبقه در نرم‌افزار SAP2000 اعمال شده‌اند. سپس تحلیل تاریخچه زمانی بر روی مدل مربوطه انجام گرفته است. برای این منظور، سه جفت رکورد از زلزله بم در سال ۲۰۰۳ انتخاب شدند. با هدف بررسی اثر پراکنش میراگرهای جرم تنظیم شونده بر زمان آرامش ساختمان بلند فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای، مدت زمان انجام تحلیل تاریخچه زمانی به طور تقریب دو تا سه برابر مدت مؤثر زلزله در نظر گرفته می‌شود (بعد از اتمام زلزله، تحلیل همچنان ادامه یافته و پاسخ‌های سازه ثبت می‌گردد). در ادامه مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش ذکر می‌شوند.

پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) تحت اثر فقط یک زلزله نمی‌تواند قابل اطمینان باشد و ممکن است پاسخ‌های حاصل از سازه مجهز به یک TMD تحت اثر برخی زلزله‌های دیگر نسبت به سازه کنترل نشده افزایش یابد.

مقایسه پراکنش میراگرها بر جابه‌جایی سازه بین دو حالت ۲ و حالت ۳، در سازه ۲۰ طبقه، از میان سه رکورد زلزله موجود، حالت ۲ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۳.۱۲ درصد کاهش داده است در حالی که حالت ۳ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۴.۲۴ درصد کاهش می‌دهد.

مقایسه پراکنش میراگرها بر جابه‌جایی سازه بین دو حالت ۲ و حالت ۴، در سازه ۲۰ طبقه، از میان سه رکورد زلزله موجود، حالت ۲ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۳.۱۲ درصد کاهش داده است در حالی که حالت ۴ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۴.۲۴ درصد کاهش می‌دهد.

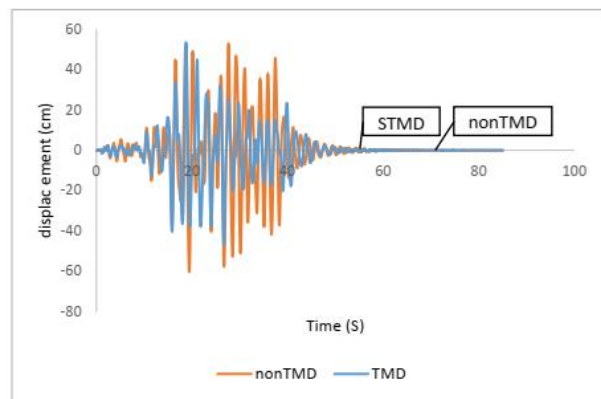
مقایسه پراکنش میراگرها بر جابه‌جایی سازه بین دو حالت ۲ و حالت ۵، در سازه ۲۰ طبقه، از میان سه رکورد زلزله موجود، حالت ۲ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۳.۱۲ درصد کاهش داده است در حالی که حالت ۵ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۸.۹۵ درصد کاهش می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که مناسب‌ترین حالت پراکنش، پراکنش در تمام طبقات است.

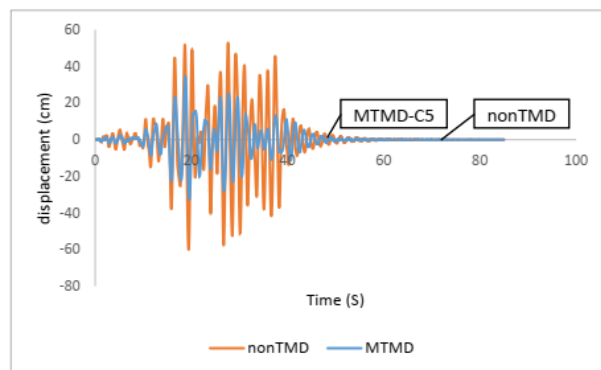
با بررسی مدت زمان آرامش سازه‌ی بیست طبقه تحت زلزله‌های مختلف می‌توان دریافت که مدت زمان آرامش با پراکنش میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) رابطه مستقیمی دارد. پراکنش این میراگرها در تمامی طبقات، موجب کاهش بهتر پاسخ دینامیکی سازه شده و ساختمان در زمان کمتری به آرامش و سکون باز می‌گردد.

#### ۹- مراجع

- [۱] بارانی، مهدی، بررسی پراکنش میراگرهای جرم متوازن (TMDs) بر پاسخ سازه‌های شبکه قطری ساختمان‌های بلند فولادی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی، استاد راهنما: محمود عدالتی، کرمانشاه: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه، ۱۳۹۴.
- [2] López-Romero, M. A., Peñas, M. S., "A Positive Position Feedback controller for vibration control of wind turbines," Energy Reports, 9, 1342-1353, 2023.
- [۳] داورپناه، سعید، بررسی زمان آرامش ساختمان‌های فولادی سه بعدی مجهز به PTMD با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی، استاد راهنما: محمود عدالتی، قزوین: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، ۱۳۹۶.



شکل ۱۰ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با و بدون میراگر منفرد تحت زلزله Zarand



شکل ۱۱ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با میراگر چندگانه و بدون میراگر تحت زلزله Zarand

از بررسی نتایج شکل‌های ۶ تا ۱۱ می‌توان دریافت که:

همان‌طور که در نمودارها مشخص است، تغییر مکان سیستم تا حد زیادی به شکل رکورد زلزله ورودی وابسته است. در صورت الحاق میراگر به سازه، میراگر می‌تواند تغییر مکان سازه را به نحو مطلوبی کاهش دهد. به طور معمول میراگر جرمی تنظیم شده بعد از وقوع اولین بیشینه بار ورودی (شتاب) فعال شده و توان فرونشاندن بیشینه‌های بعدی را داراست.

با بررسی مدت زمان آرامش سازه‌ی بیست طبقه تحت زلزله‌های مختلف می‌توان دریافت که مدت زمان آرامش با پراکنش میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) رابطه مستقیمی دارد. پراکنش این میراگرها در تمامی طبقات، موجب کاهش پاسخ دینامیکی سازه شده و ساختمان در زمان کمتری به آرامش و سکون باز می‌گردد. با مقایسه‌ی عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده و پراکنش آن می‌توان دریافت که با بکارگیری این نوع سیستم، سازه از پایداری مطلوبی پس از وقوع زلزله برخوردار شده و تأثیر آن بر زمان ارتعاش سازه و در نهایت آرامش ساکنان مثبت ارزیابی می‌گردد.

مدت زمان آرامش در سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله Golbaf، تجهیز شده با میراگرهای جرمی تنظیم شده در مقایسه با حالت بدون میراگر ۶۶.۵۳ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که این کاهش در میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در مقایسه با حالت بدون میراگر به ۷۹.۱۸ درصد می‌رسد.

مدت زمان آرامش در سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله Kerman، تجهیز شده با میراگرهای جرمی تنظیم شده در مقایسه با حالت بدون میراگر ۷۰.۶۴ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که این کاهش در میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در مقایسه با حالت بدون میراگر به ۷۳.۳۹ درصد می‌رسد.

مدت زمان آرامش در سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله Zarand، تجهیز شده با میراگرهای جرمی تنظیم شده در مقایسه با حالت بدون میراگر ۳۹.۰۱ درصد

- [25] Koutsoloukas, L., Nikitas, N., and Aristidou, P., "Passive, semi-active, active and hybrid mass dampers: A literature review with associated applications on building-like structures," *Developments in the Built Environment*, 12, 100094, 2022.
- [۲۶] قاسمی، علیرضا، اثر پراکنش میراگرهای جرم متوازن بر زمان آرامش ساختمان‌های بلند فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای، استاد راهنما: محمود عدالتی، ایلام: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ایلام، ۱۳۹۸.
- [۲۷] آقاجانین، سعید، مهندسی کنترل ارتعاشات سازه، اصفهان: انتشارات ارکان دانش، ۱۳۹۷.
- [28] Connor, J., Laflamme, S., *Structural Motion Engineering*, Springer International Publishing, Switzerland, 2014.
- [29] Smith, B. S., and Coull, A., *Tall Building Structures: Analysis and Design*, New York: Wiley, 1991.
- [۳۰] حاجی کاظمی، حسن، آنالیز و طراحی سازه‌های بلند، مشهد: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۶.
- [31] Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, London: Pearson, 5th ed., 2010.
- [۳۲] محمود، دیانی، مهندسی کنترل، تهران: انتشارات نص، ۱۳۹۵.
- [33] Sakr, T. A., "Vibration control of building by using partial floor loads as multiple tuned mass dampers," *HBRC Journal (Housing and Building National Research Center)*, vol. 13, no. 2, pp. 133-144, 2017.
- [۳۴] افضلی، محمد، و سروش نیا، سهیل، کامل‌ترین مرجع کاربردی طراحی سازه با SAP2000 (سازه‌های فولادی)، تهران: انتشارات نگارنده دانش، ۱۳۹۵.
- [35] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Ground Motion Database, <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>.
- [۳۶] کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، چاپ چهارم، فروردین ۱۳۹۴.
- [۴] رستمی، سارا، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی میراگرهای جرم متوازن پاندولی (PTMDs) بر زمان آرامش قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی، استاد راهنما: محمود عدالتی، کرمانشاه: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۵.
- [۵] مرادنژاد، بابک، بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکان‌یابی هندسی مناسب توزیع جرم TMD بر پاسخ ساختمان‌های بلند فولادی با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی، استاد راهنما: محمود عدالتی، ملایر: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر، ۱۳۹۵.
- [6] Kareem, A. and Klein, S., "performance of multiple tuned mass dampers under random loadings," *Journal of structural engineering*, vol. 121, no. 2, pp. 348-361, 1995.
- [7] Feng, M. Q. and Mita, A., "Vibration control tall building using mega sub-configuration," *J. eng. Mech., ASCE*, vol. 121, pp. 1082-1088, 1995.
- [8] Sadek, F., Mohrez, B., Taylor A. W., and Chung, R. M., "A Method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications," *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, vol. 26, pp. 617-635, 1997.
- [9] Hadi, M. N. S., and Arfiadi, Y., "Optimal design of absorber for MDOF structures," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, pp. 1272-1280, 1998.
- [10] Chang, C. C., "Mass dampers and their optimal designs for building vibration control," *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 454-463, 1999.
- [11] Li, C., "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration," *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, vol. 29, pp. 1405-1421, 2000.
- [۱۲] زهرابی، س. م، هاشمی، س. ف، "کنترل ارتعاشات لرزه‌ای قاب‌های فولادی متعارف به کمک میراگر جرمی"، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۱۹، شماره ۲، ۱۳۸۷.
- [13] Matta, E., and DeStefano, A., "Seismic performance of pendulum and translational roof-garden TMDs," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, pp. 908-921, 2009.
- [14] Besharatian, B., Riahi, H. T., Garcia, R., and Hajirasouliha, I., "Particle swarm optimization of friction tuned mass dampers subjected to ground motion records," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 172, 107995, 2023.
- [15] Bekdas, G., and Melih, S., Nigdeli, "Mass ratio factor for optimum tuned mass damper strategies," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 71, pp. 68-84, 2014.
- [16] Long Lin, G., Chang Lin, C., Cheng Chen, B., and Teh Soong, T., "Vibration control performance of tuned mass dampers with resettable variable stiffness," *Engineering Structures*, vol. 83, pp. 187-197, 2015.
- [17] Greco, R., Carlo Marano, G., and Fiore, A., "Performance-cost optimization of tuned mass damper under low-moderate seismic actions," *The Structural Design of Tall Building and Special Buildin*, 2016.
- [18] Gill, D., Elias, s., Steinbrecher, A., Schröder, C., Matsagar, V., "Robustness of multi-mode control using tuned mass dampers for seismically excited structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 15, pp. 5579-5603, 2017.
- [19] Bayat, A., Beiranvand, P., and Ashrafi, H., "Vibration Control of Structures By Multiple Mass Dampers," *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 12, no. 3, 2018.
- [20] Suresh, L., and Mini, K. M., "Effect of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in High-Rise Buildings," *Practice Periodical on Structural, Design and Construction, ASCE*, 2019.
- [۲۱] کامرانی‌مقدم، ب، کنترل سازه‌ها با رفتار خطی و غیرخطی توسط میراگر جرمی تنظیم شده تحت اثر زلزله، تهران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، ۱۳۸۶.
- [22] Debbarma, R. and Das, D., "Vibration control of building using multiple tuned mass dampers considering real earthquake time history," *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 696-704, 2016.
- [23] Ebrahimi, A., Edalati, M., Valizadeh M., and Karimipour, A., "Increase the effectiveness of AMTMDs and PMTMDs on the seismic behaviour of structures case study: Ten-stories short period concrete building," *Engineering Structures*, 237, 112122, 2021.
- [24] Fredy Picaulya, Hrc. Priyosulistiyob, Bambang Suhendrob; Andreas Triwiyonob, "Tuned Mass Damper On Reinforced Concrete Slab With Additional X-Shaped Metal Absorber," *Procedia Engineering*, vol. 95, pp. 204-212, 2014.

جدول پیوست: حالت های پراکنش مختلف میراگرها در سازه ی ۲۰ طبقه

طبقات		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
حالت *۱	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$K_d$ (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$C_d$ (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
حالت **۲	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$K_d$ (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$C_d$ (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
حالت †۳	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$K_d$ (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$C_d$ (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
حالت ††۴	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8
	$K_d$ (N/m)	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8
	$C_d$ (N.s/m)	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0
حالت ‡۵	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9
	$K_d$ (N/m)	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4
	$C_d$ (N.s/m)	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0
ادامه طبقات		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
حالت *۱	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$K_d$ (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$C_d$ (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
حالت **۲	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28258.2
	$K_d$ (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3998427.8
	$C_d$ (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	210519.8
حالت †۳	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-	-	9419.4	9419.4	9419.4
	$K_d$ (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	1332809.3	1332809.3	1332809.3
	$C_d$ (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	70173.3	70173.3	70173.3
حالت ††۴	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8
	$K_d$ (N/m)	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8
	$C_d$ (N.s/m)	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0
حالت ‡۵	$M_d$ (kg.m/s <sup>2</sup> )	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9
	$K_d$ (N/m)	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4
	$C_d$ (N.s/m)	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0

\* سازه ی بدون میراگر، \*\* سازه ی با یک میراگر در طبقه بیستم، † سازه ی با سه میراگر در طبقه های هجدهم، نوزدهم و بیستم، †† سازه ی با ۱۰ میراگر در طبقه های زوج و ‡ سازه ی با ۲۰ میراگر در تمام طبقه های سازه ی ۲۰ طبقه

# Comparing the performance of SVC and STATCOM for reactive power compensation in transmission lines

Amirreza Azizi<sup>1,\*</sup> and Erfan Paryab<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran: [amirreza.azizi@shahed.ac.ir](mailto:amirreza.azizi@shahed.ac.ir)

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Amirkabir University Of Technology, Tehran, Iran: [erfan.paryab@aut.ac.ir](mailto:erfan.paryab@aut.ac.ir)

\* Corresponding Author

Received: 11/10/2023, Revised: 22/11/2023, Accepted: 27/11/2023.

## Abstract

The stability of power systems is an important and vital challenge. The instabilities created in power networks are due to the existence of factors such as short circuit, switching, or error, which causes loss of generator synchronism and thus leads to interruption in the process of power generation. Today, by using FACTS tools and reactive power compensation, it helps to stabilize systems against such problems. In this paper, SVC and STATCOM are investigated and analyzed in order to maintain network synchronism and increase the dynamic stability and transient stability of the system against the mentioned factors, in reactive power compensation. The presented simulations were performed in the MATLAB/Simulink environment and the results were fully checked.

## Keywords

Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS), SVC, STATCOM, Reactive Power Compensation, Voltage Stability

## 1. Introduction

The electrical system is among the most important and basic parts of daily life. Therefore, the generation and transmission of electrical energy is one of the main tasks of electrical networks, and maintaining the reliability of energy distribution is one of the quality indicators of the supplier's resources. In recent years, due to the growth of power demand and the high cost of constructing power plants and transmission lines, power grids are sometimes operated close to the margin of their voltage stability, and therefore this form of stability has received much attention in recent years. Today, the largest share of power consumption in distribution networks goes to industrial loads such as fans, pumps, metal melting furnaces and such loads. Due to the relatively low power factor, these loads cause more reactive power to flow in the transmission and distribution lines. Lack of suitable control over reactive power leads to increased losses in feeders and also reduces the ability of lines to transmit active power. Due to the ever-increasing demand for energy and limitations in the structure of traditional networks, these networks are under increasing load pressure, and This issue causes voltage instability as well as errors and losses in system performance [1-5].

Voltage instability is one of the main challenges in the transmission network. In recent years, the issue of "grid stability" has become one of the most important challenge in power generation and transmission lines. Any imbalance in energy distribution due to disturbances can make the system unstable. The main reason for voltage instability is the inability of the power system to

supply the required reactive power. For this reason, reactive power compensation in power networks in order to prevent voltage collapse and reduce losses is an important issue that can be investigated. As a result, to solve these challenges, the design of compensators is one of the important topics in the design of transmission lines. On the other hand, due to the existence of some limitations in AC transmission lines, the use of compensators can solve these limitations. The use of controllable compensators has a great impact on the quality of power distribution. One of the solutions to eliminate voltage instability in power grids is to provide reactive power in the suitable position. The use of power electronic devices can be a suitable answer to solve this challenge. By compensating for reactive power in the transmission network, power electronic tools eliminate system instability, voltage drops and fluctuations. Meanwhile, flexible alternating current transmission systems (FACTS) are a suitable solution for reactive power compensation in order to establish voltage stability [6-9].

In [1] with the aim of planning and controlling the reactive power of FACTS devices, investigations have been done by implementing a new algorithm in SVC (shunt) and thyristor controlled series compensator (TCSC). In the proposed method, the Whale Optimization Algorithm (WOA) shows its superiority in

this method by minimizing the reactive power loss and the total operating cost of the system including the cost of the real devices by maintaining the voltage profile within the permissible limit. The proposed algorithm is an accurate and reliable method for the optimal coordination of facts devices compared to other sources of reactive power supply in the network. In [2], a new method of the SVC model developed with the thyristor firing angle law to improve the transient performance of frequency and voltage has been introduced and compared with the controlled thyristor static VAR compensators (CSVC) model. In reviewing the obtained results, the ESVC model performs better than the CSVC model because, in addition to only requiring local measurements without prior knowledge of the power system parameters, it directly calculates the law of the thyristor firing angle and applies the desired susceptance, and is also resistant in different operating conditions. Non-linear loads with the consumption of reactive power make the need to apply SVC in the transmission network inevitable. On the other hand, using SVC itself causes destructive harmonics in the lines. In order to solve this challenge, a method has been designed in [3] that limits these harmonics with the help of APF (active power filter). They are solved during reactive power compensation in SVC. Considering that the presence of APF in the SVC structure for medium voltages brings a lot of costs, in the next study, a new model called hybrid active power filter (HAPF) is designed for SVC, which provides a cost-effective method for compensation. heavy loads in medium voltage applications; Thus, when the HAPF is used to provide harmonic power as well as partial reactive power compensation, the SVC section provides and compensates the reactive power dynamically [4]. In [6], a new model has been presented to investigate the uncertainty in reactive power forecasting that can be compensated by SVC. The presented method tries to compare the traditional forecasting models of uncertainty analysis and the new probabilistic forecasting model. replace point-to-point prediction with optimal prediction intervals (PI). In this method, lower upper bound estimation (LUBE) is used to train Artificial Neural Network (ANN) to make high quality PI. A reactive power compensation technique with SVC compensator for a four-wire system is presented in [7], which, in addition to reactive power compensation, balances the load and also compensates the neutral current. In this technique,  $\Delta$ -TCR structures with TSC-Y and  $\Delta$ -TSC are combined. In this method, thyristor controlled reactor (TCR) is a thyristor-controlled reactor connected to  $\Delta$ -shaped structure and a number of thyristor switch capacitors are connected to  $\Delta$  and Y. In [8], to improve the quality of power in transmission lines, by combining an instantaneous compensator and SVC, a suitable and optimal design has been analyzed. Considering that the instantaneous compensator needs an independent power source, which itself imposes a lot of cost on the network, but in the new method, by combining it with SVC, it solves the decrease in the independent power capacity of the instantaneous compensator. In the final results, it was found that this combined method reduces the cost of creating a separate power supply to supply the compensation current and maintains the power factor. In

[9], a method has been investigated that investigates the reactive power consumption in wind turbines (WT). The induction generator consumes a lot of reactive power, so as a result, it causes fluctuation and imbalance in the output voltage for consumers. Therefore, SVC-WT can be used for power balancing. In this study, the power that is compensated by SVC static compensator is done with the help of neural network (NN) based model and using lower upper bound estimation (LUBE) method. In [10], with the aim of reducing light flicker (LF) in projects that use electric arc furnaces, a method for reactive power compensation based on optimized statcom has been proposed. Instability, harmonics, and voltage imbalance are among the main disadvantages of LF. In the proposed method, by modifying the classical algorithm that is based on the park transformation for statcom control by introducing a selective inter-harmonic filter, it enables the reactive power that is only between harmonics in a suitable band around the fundamental frequency that It mainly affects the LF to be compensated. In the next research, using the low voltage ride through (LVRT) strategy for cascaded h-bridge (CHB)-Statcom operation, the operator can control the reactive power of positive and negative sequences in the condition that the network is unbalanced, and other degrees of CHB Statcom for Apply capacitor voltage balancing. In this method, balancing is achieved by a combination of zero sequence voltage injection and negative sequence active current control [11]. In [12], an operational strategy is proposed under the title of analyzing the use of PWM in emergency situations to prevent overcurrent and the occurrence of fluctuations and power outages, in which during the recovery of faults such as line-to-ground (LG), line-to-line (LL) and three-phase fault, this scenario is exploited. This strategy provides system reactive power to prevent SVC overcurrent, which brings high efficiency when power system faults and disturbances occur. In [13], a comparison has been made between svc and statcom in order to compensate the reactive power of a wind farm connected to the grid. According to the results, it can be seen that statcom produces more reactive power in addition to having the same compensation capacity. From an economic point of view, due to the fact that the compensation capacity is reduced in statcom, it is more economical for investment than svc. In [14], a comparison is made between Double-Star Chopper Cell (DSCC) and Single-Delta Bridge Cell (SDBC) topology multi-level converters for statcom. According to the tests, we see that SDBC topology requires less energy storage than to DSCC. Less power loss was observed during positive sequence compensation and sdbc losses increased during negative sequence execution, as a result of which dsc has shown better performance. In [16], the performance and characteristics of power switches in the transmission network have been investigated. In the investigation, it is clear that the series compensation and hvdc loading level do not have much effect on the oscillation frequency as well as the magnitude of the oscillation, so that the effect of the number of standby statcoms is greater than other available factors. Also, in an AC network that is weakened by instabilities The use of several statcoms in the connected state causes instability and has a high effect on increasing the effective short circuit ratio

(ESCR), reducing the oscillation frequency, and improving the damping. In statcom, in addition to the power operating modes, there is an adaptive compensation operation mode that has the ability to compensate for the voltage imbalance, which is mentioned in the research [17].) is done sporadically in network connected mode and the used synchronous machine model is described as s-statcom with the concept of derived vectors that leads to a model in the (alpha and beta) framework.

## 2. FACTS DEVICES

In an ideal power system network, the voltage should be in its balanced state and the amplitude and phase of the voltage should be 120 degrees different. The network current may be unbalanced and disturbed and make the network unstable. One of the most important reasons for imbalance in a transmission system is the non-uniformity of single-phase loads such as frictional single-phase networks, rural networks and loads that cause partial imbalance and mild instability is transmitted in the network. On the other hand, the occurrence of imbalance and large short-term instabilities can occur due to power system errors such as single-phase to ground error, three-phase connection, etc. The occurrence of unbalanced voltage in the network can cause an increase in losses in the power transmission network and inappropriate performance of power electronics converters and induction drivers. Accordingly, the issue of reactive power control is raised, because reactive power control is one of the basic factors in increasing stability and improving power quality in power systems; In such a way that the lack of supply of sufficient amount and the lack of a suitable control method of re-active power causes an increase in transmission losses, a decrease in power transfer capability, and a decrease in voltage regulation at the end of the lines and at the load location [18-22].

Currently, various types of FACTS devices are used in power transmission networks, the most important of which are:

- SVC: Static Var compensator
- TCSC: thyristor control series capacitor
- STATCOM: static compensator

In the past, most of the reactor controlled with TCR thyristor and switched capacitor with TCSC thyristor were used for reactive power compensation. But nowadays, SVC and STATCOM are used as one of the newest generations of the second generation of FACTS devices with suitable dynamic performance, and in this research, the investigation and comparison of these two compensators in power transmission lines has been done.

### 2.1. Static Var Compensator (SVC)

SVC is one of the most important elements of FACTS, which has been used for many years due to its technical and economic advantage in solving the problem of voltage dynamics. The accuracy, accessibility and fast response of SVC compared to classical parallel compensators make it a very efficient device in controlling the transient and mode voltages. The figure

below shows the structure of SVC and its I-V characteristic.

SVC is connected in parallel to the network and as shown in the figure, it can appear in two modes of reactive power compensation in the form of inductance or capacitance. In the capacitive current greater than  $I_{Cmax}$ , the SVC becomes a capacitor and its reactive power changes as a function of the grid voltage. The slope of the  $V-I$  graph between  $I_{Cmax}$  and  $I_{rmax}$  is usually considered to be 2% to 5%.

One of the most important applications and advantages of using SVC in the transmission network can be mentioned: stabilizing voltage in weak networks, reducing transmission losses, increasing power transmission capacity, increasing damping of small disturbances, improving voltage stability and eliminating power fluctuations. SVCs are divided into different types according to the elements used in their construction, the most common of which are: TCR thyristor control reactor, TSC thyristor switch capacitor, TSR thyristor switch reactor and MSC mechanical switch capacitor, which are usually used for their installation Points in the vicinity of major and large loads (wide urban areas), near voltage-sensitive loads or in the vicinity of industrial loads are suggested. In fact, the installation of SVC in these three places has the greatest impact on power network loads. As mentioned earlier, if the SVC approaches its reactive power limit, it becomes a fixed capacitor and its reactive power generation becomes a function of the network voltage. This phenomenon is considered one of the disadvantages of SVC.

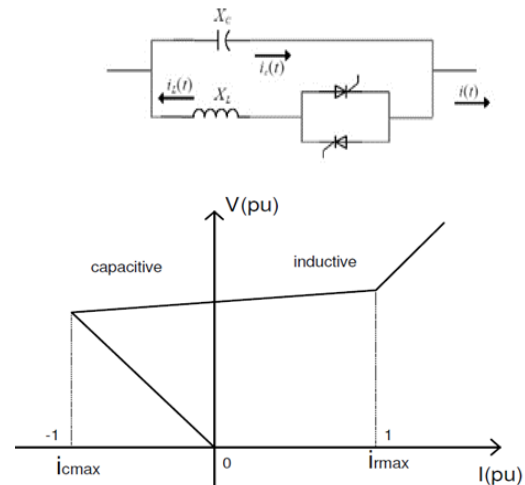


Fig. 1 SVC structure and its V\_I characteristic.

### 2.2. Static Var Compensator (SVC)

Static compensators or statcom are connected in parallel to the network and have the ability to inject and absorb reactive load. statcom (static synchronous reactive power compensator) is one of the important FACTS tools that plays an effective role in voltage stability. The main role of STATCOM is actually voltage support at critical points.

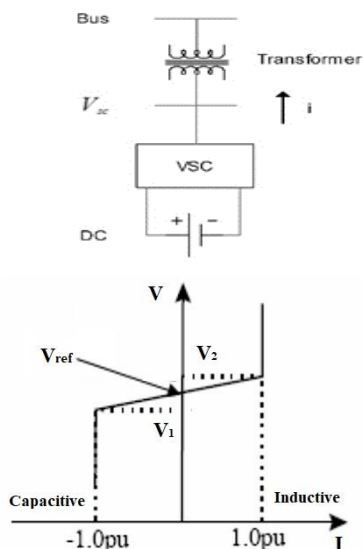


Fig. 2 STATCOM and its V\_I characteristic.

The basis of operation of STATCOM is similar to synchronous condenser. Since power electronics are used in the construction of this device, it is called a static compensator. The converters used in this compensator provide the required reactive power locally at the connection point of the STATCOM to the network and its output can be continuously adjusted, for this reason in cases where the power network voltage has wide changes (in the event of a disturbance or after fixing error) this compensator is used. Figure (2-3) shows a diagram of STATCOM and its V\_I characteristic. Generation or absorption of reactive power is done by the voltage source converter (VSC) by adjusting the  $V_{ref}$  voltage.

**Table 1.** Comparison of V\_I characteristic of SVC and STATCOM [3] and [2].

feature	STATCOM	SVC
Characteristic V_I	Current source with good performance in low voltage conditions	Impedance with proper performance in
Control range	symmetrical	High voltage conditions
response time	1 to 2 cycles	Adjustable in any range of CR/TSR/TSC branches
required space	40-50% compared to SVC	1 to 3 cycles
Accessibility	98-96%	100%
Investment cost	120-150%	more than 99%

According to the structure of STATCOM, one of its most important applications can be mentioned: dynamic voltage control, improvement of transient stability, elimination of power fluctuations in the transmission

network and control of real and reactive power. There are various methods for extracting the reference current in STATCOM, one of these methods is the reactive power theory is instantaneous. This theory can be used in other compensators, such as active filters. This theory was proposed for the first time by Akagi and is also known as instantaneous reactive power theory, instantaneous power theory or p-q theory. The basis of this theory is based on the conversion of the three-phase to two-phase quantity in the  $\alpha - \beta$  device and the calculation of instantaneous active and reactive powers.

### 3. COMPARISON OF STATCOM AND SVC:

STATCOM and SVC are very similar in terms of compensation functionality, but their working principles are fundamentally different. The STATCOM acts as a synchronous voltage source, while the SVC acts as a controlled reactive admittance. This difference makes the STATCOM have better performance characteristics and more flexibility than the SVC. Figure 4-2 compares STATCOM and SVC voltage-current specifications. As can be seen from the figure, in the linear performance range of V-I characteristic, the compensation performance of STATCOM and SVC is similar. By

considering the non-linear performance range, the STATCOM is able to control its output current within the maximum capacitive and self-compensation range independently of the system's AC voltage. While the maximum compensation current that can be obtained using SVC decreases linearly with the system voltage. Therefore, in supplying voltage under large system disturbances during which the system voltage is out of the linear range, STATCOM works much more effectively than SVC. STATCOM's ability to maintain full capacitor output current in low system voltage conditions makes STATCOM more effective than SVC in maintaining system transient stability. When active power compensation is needed, STATCOM is able to take power from an energy storage source (battery, capacitor bank, etc.) using its DC terminal and inject it into the network from its AC terminal. While SVC does not have this capability.

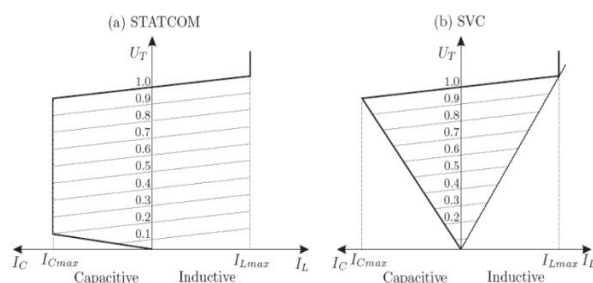


Fig. 3. Comparison of V\_I characteristic of SVC and STATCOM

In dealing with a lot of uncertainties, the performance and efficiency of type-1 fuzzy systems is not suitable. The membership degree of type-1 fuzzy sets is a crisp number while the membership degree of type-2 fuzzy sets is a type-1 fuzzy number.

#### 4. COMPARISON OF STATCOM AND SVC:

##### 4. 1. SVC simulation

SVC is a parallel reactive power compensator that includes TSC and TCR as shown in the figure below. The stability and control equations of the system are performed by the linearized models of the power network.

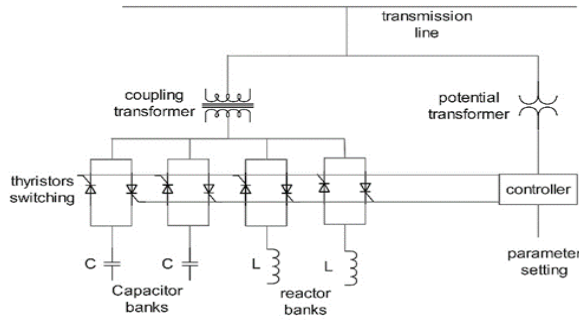


Fig. 4. SVC structure [4]

Figure 4 shows a single machine model with an infinite bus. This system can be described by nonlinear differential equations from the Heffron-Phillips linear model which is given below.

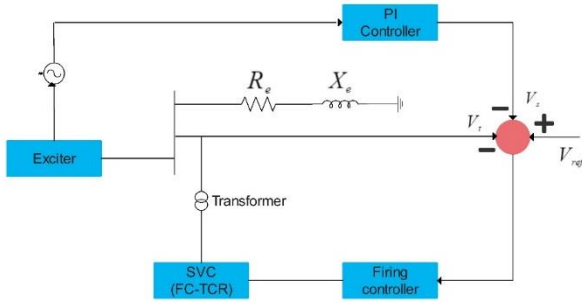


Fig. 5. single machine to infinite bus model with SVC.

In the following section, the network equations without the presence of SVC are placed:

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega \quad (1)$$

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{(P_m - P_e - D\Delta\omega)}{2H} \quad (2)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{(-E'_q - E_{qe})}{T'_{do}} \quad (3)$$

$$E_{qe} = K_A \frac{(V_{t0} - V_t)}{1 + sT_A} \quad (4)$$

$$P_e = \frac{E'_q V_b \sin \delta}{X'_{d\Sigma}} - \frac{V_b^2 (X_d - X'_d) \sin 2\delta}{2X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \quad (5)$$

$$E_q = \frac{X_{d\Sigma} E'_q}{X'_{d\Sigma}} - \frac{(X_d - X'_d) V_b \cos \delta}{X'_{d\Sigma}} \quad (6)$$

$$V_{td} = \frac{X_q V_b \sin \delta}{X_{d\Sigma}} \quad (7)$$

$$V_{tq} = \frac{X_L E'_q}{X'_{d\Sigma}} + \frac{V_b X'_d \cos \delta}{X'_{d\Sigma}} \quad (8)$$

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_L \quad (9)$$

$$X_{d\Sigma} = X_q + X_L \quad (10)$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_L \quad (11)$$

When an SVC is installed in the system, the above equations should be changed and the effect of the installed SVC with “XSVC” reactance on the performance of the whole system should be seen. The equations with SVC are expressed as follows:

$$C = 1 - \frac{X_L}{X_{SVC}} \quad (12)$$

$$X_{TL} = \frac{X_L}{C} = \frac{X_L}{1 - \frac{X_L}{X_{SVC}}} \quad (13)$$

$$P_e = \frac{E'_q V_b \sin \delta}{C X'_{d\Sigma}} - \frac{V_b^2 (X_d - X'_d) \sin 2\delta}{2C^2 X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \quad (14)$$

$$E_q = \frac{X_{d\Sigma} E'_q}{X'_{d\Sigma}} - \frac{(X_d - X'_d) V_b \cos \delta}{C X'_{d\Sigma}} \quad (15)$$

$$V_{td} = \frac{X_q V_b \sin \delta}{C X_{d\Sigma}} \quad (16)$$

$$V_{tq} = \frac{X_L E'_q}{X'_{d\Sigma}} + \frac{V_b X'_d \cos \delta}{C X'_{d\Sigma}} \quad (17)$$

By linearizing the above equations in operating conditions, the linearized Heffron-Phillips model of the system with SVC can be obtained from the following figure.

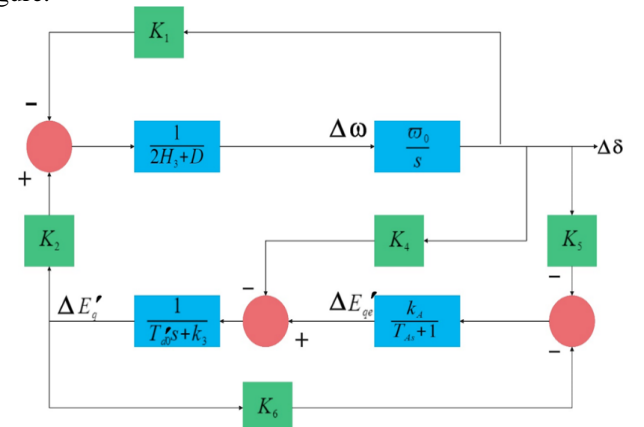


Fig. 6. block diagram of single machine control to infinite bus without SVC [3].

When the SVC is connected to the infinite bus, its control system is initially determined. Although there are many effective control patterns for the operation of this compensator, only one PI controller is selected for it. The

structure of the PI controller is shown in the figure below, which has two parameters,  $K_p$  and  $K_I$ , which must be adjusted so that the voltage fluctuations of the range are minimized both in the case of the range and the frequency.

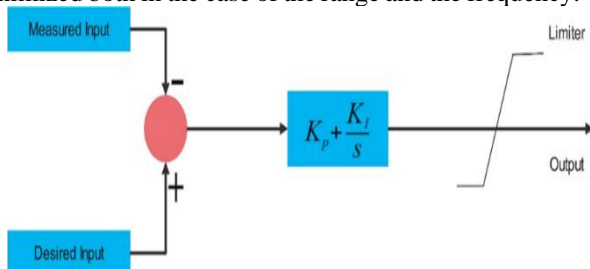


Fig. 7. PI controller structure [4]membership functions.

By combining the PI controller to control the operation of the SVC, the block diagram of the infinite bus control system is shown in Figure 7. SVC is an adjustable parallel susceptor that has no moving parts and its application is to stabilize transient and permanent voltage, improve transient and dynamic stability, reduce flicker, improve power factor and load balancing. The simulation circuit and its results are shown in the following figures, where it shows the performance of the steady state and dynamic mode of an SVC that regulates the voltage in a 500kv system with a frequency of 60hz and a load of 100MVA.

SVC Power System

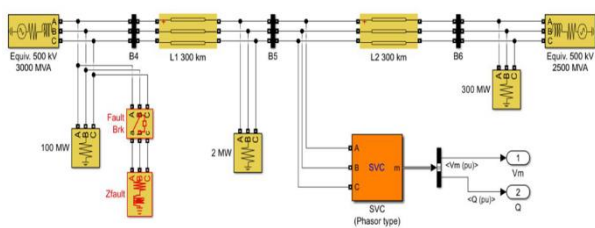


Fig. 8. simulation circuit related to SVC.

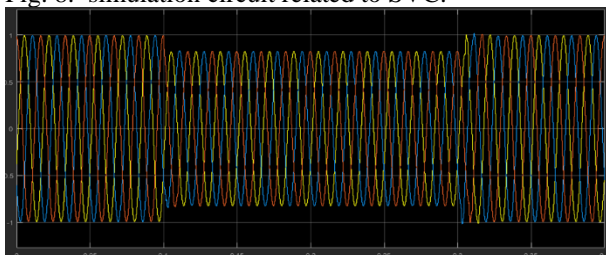
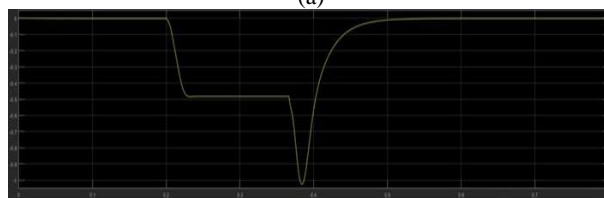
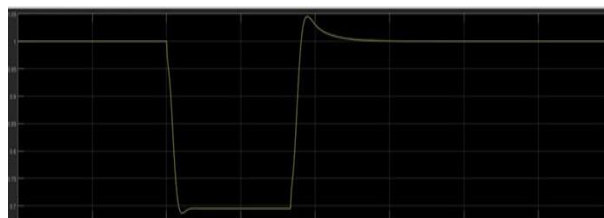


Fig. 9. network waveform under load before placing SVC

As can be seen in the figure above, our main network normally faces the problem of voltage drop or lack of reactive power when under load, for this reason, to solve this problem and compensate the reactive power from a We use SVC which is connected in parallel with the network and the results are seen below.



(b) Fig. 10. VQ diagram resulting from SVC simulation

By placing the SVC in parallel with the network, the compensation operation is performed during the load application and Figure 12-3 is the graph resulting from the compensation, in which the VQ diagram with the placement of the SVC has an optimal and more regular operation, and in the linear region of the operation compensation is done and the problem of reactive power loss is solved.

#### 4. 2. STATCOM simulation

The STATCOM model presented in this review is based on the power balance equation, which basically represents the balance between the AC power of the P controller and the DC power under balanced conditions at the main frequency.

$$P = P_{dc} + P_{loss} \quad (18)$$

For models designed with high accuracy, it is very important to consider controller losses. PWM controller is a practical factor for VSC-based controllers because by using GTO, there are no more high switching losses in them. For the transient model, the voltages are balanced, the controller is precisely designed for transient stability studies by Figure 11 is modeled.

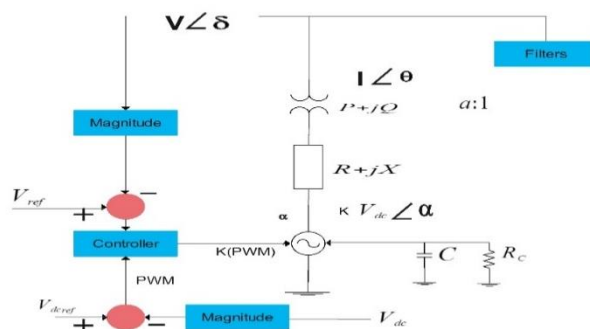


Fig. 2. STATCOM transient stability model with PWM voltage control.

The differential equations related to this model can be written as follows:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = f_c(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dcref}) \quad (19)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{VI}{C V_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}} \quad (20)$$

$$0 = \begin{bmatrix} P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + k V_{dc} V G \cos(\delta - \alpha) + k V_{dc} V B \sin(\delta - \alpha) \\ Q + V^2 B - k V_{dc} V B \cos(\delta - \alpha) + k V_{dc} V G \sin(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (21)$$

When admittance:

$$(R + jX)^{-1} = G + jB \quad (22)$$

As an indicator of the impedance of the transformer and each filter series Ac. Gc is used to model the switching inertia of the converter, which is caused by the electronic switches and its circuits, which has a direct effect on the dynamics of the capacitor voltage .

$$k = \sqrt{\frac{3}{8m}} \quad (23)$$

K Is directly proportional to the modulation index (m). The variables xc and (0) Fc in the above equation are the variables of the internal control system and the equations, respectively, and hence have a great dependence on the PWM or phase control method used in the control system. In the simple voltage controller shown in the figure below, variables and differential equations are directly related to different control blocks. It can be seen that in this PWM controller, the AC bus voltage range is controlled through the modulation index m and this has a direct effect on the VSC voltage range. Although the phase angle a which basically determines the active power flow p in the controller and the charge and discharge of the capacitor are used to directly control the DC voltage range.

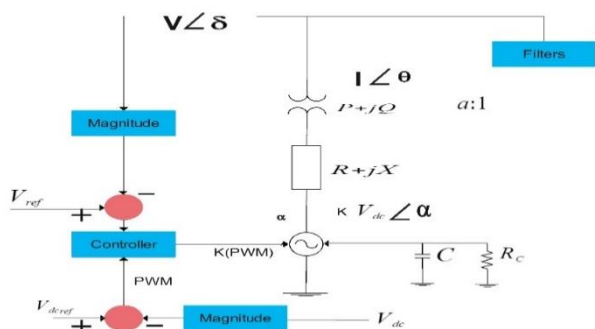


Fig. 32. PWM voltage control of a STATCOM.

The steady state model can be easily obtained from the previous equation by substituting the corresponding differential equations with the DC voltage steady state equations and the STATCOM voltage control characteristics.

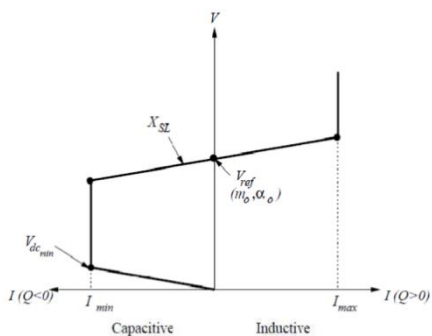


Fig. 43. STATCOM performance diagram in permanent mode.

In the circuit designed for simulation, the number of 6 thyristors is included. PWM applies two sine and triangular waves to the circuit. Triangular wave is a carrier wave whose frequency is much higher than sine wave. In order to be able to apply PWM, we act in such a way that a scenario is made for a comparison between two types of applied waves. If the size of the sine wave is greater than the triangular wave, the ON command is issued, and if the triangular wave is greater than the sine wave, the cut command is issued. For this purpose, we use angles. On the other hand, for the angle of fire, calculations have been done through a control circuit along with a lead-lag filter and a PI controller. In this study, the output of the PI controller is the angle in radians, which can be converted to degrees. Now, by subtracting 2 obtained sets, 6 angles can be obtained. To check the on/off mode, a triangular wave is made exactly with the PLL block and the 6 fire angles obtained. First, we multiply these angles by the carrier frequency by 33 and create a model of it along 360 degrees. The simulation circuit and the results of the simulation are shown in the figure below. The simulated scheme shows the steady state and dynamic performance of a STATCOM that regulates the voltage in a 500KV system with a frequency of 60HZ and 100MVA.

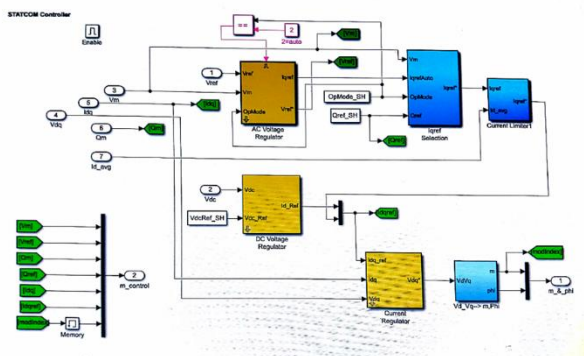


Fig. 54. STATCOM simulation circuit

In the control system designed for statcom in the simulations, a phase locking loop (PLL) that coincides with the positive sequence component of the three-phase primary voltage v1. The PLL output (phi angle) is used to calculate the vertical and direct axis components of three-phase AC voltages and currents (labeled Vd, Vq, Id, Iq in the simulation file). The measuring system that measures the d, q components of AC positive sequence voltages and currents, which must be controlled along with DC voltage (Vdc). An external regulation loop that includes an AC voltage regulator and a DC voltage regulator is considered. The output of the AC voltage regulator is the reference current Iqref for the current regulator (Iq = current perpendicular to the voltage that controls the passing reactive power). The output of the DC voltage regulator is the reference current Idref for the current regulator (Id = current in phase with the voltage that controls the active power). In an internal current regulation loop that includes a current regulator, the current regulator adjusts the amplitude and phase of the voltage generated by the PWM converter (V2d, V2q in the simulation circuit) from the reference

currents  $I_{dref}$  and  $I_{qref}$ , respectively, by the AC voltage regulators. Controls the DC generated.

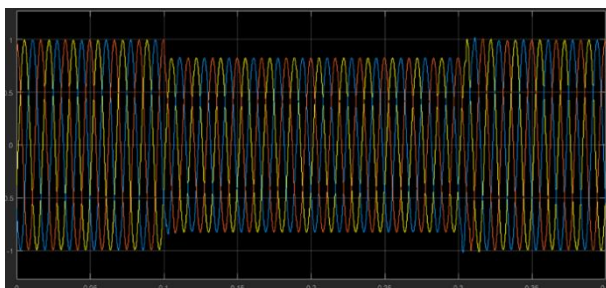


Fig. 65. network voltage before compensation

Figure 15 shows the network voltage. As shown, as a result of load change in time 0.1 to 0.3, the network voltage has decreased and the network has moved away from its stable state.

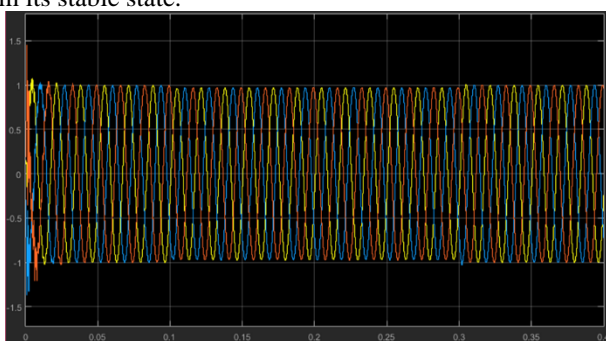


Fig. 76. network voltage after compensation

In figure 16 the network voltage after compensation is shown, it can be seen that after the compensation operation, the network voltage remained at its constant value when under load, and the effect of the presence of STATCOM is fully shown and full compensation There have been.

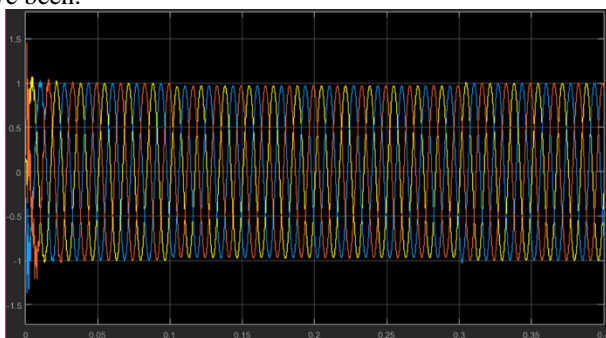


Fig. 87. injected current by STATCOM

The above figure shows the reference voltage and the measured voltage of the network, which is under load in time 0.1 to time 0.3 and the network voltage decreases significantly.

The above figure shows the reference voltage and the measured voltage of the network, which is under load in time 0.1 to time 0.3 and the network voltage decreases significantly.

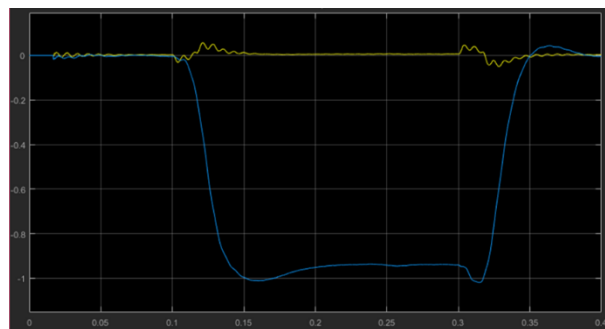


Fig. 98. diagram of active power and reactive power of the network

Figure 18 shows the active and reactive powers of the network, which is under load in time 0.1 to 0.3, and we see a decrease in the reactive power of the network, and compensation must be done to solve this problem .

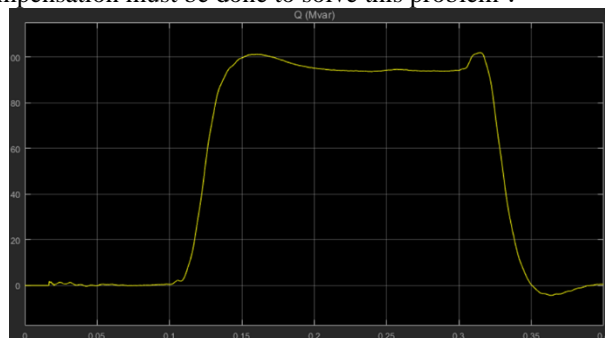


Fig. 109. Reactive power injected by the compensator

In this diagram, the reactive power that STATCOM injects into the network can be seen. In figure 18, it was observed that the lack of reactive power is determined at the time 0.1 to 0.3 when the network is under load. But in figure 19 we can see that in time 0.1 to 0.3 the compensator performs the compensation action which is the injection of reactive power into the network and solves the problem of lack of reactive power well.

## 5. Conclusion

STATCOM and SVC are very similar in terms of compensation functionality, but their operating principles are fundamentally different. The STATCOM acts as a synchronous voltage source, while the SVC acts as a controlled reactive admittance. This difference makes STATCOM have better performance characteristics and more flexibility than SVC. As you know, in the linear performance range of V-I characteristic, the compensation performance of STATCOM and SVC is similar. Considering the non-linear performance range, STATCOM is able to control its output current in the range of maximum capacitive and inductive compensation independent of the AC system voltage. While the maximum compensation current that can be obtained using SVC decreases linearly with the system voltage. Therefore, in providing voltage under large system disturbances during which the system voltage is out of the linear range, STATCOM works much more effectively than SVC. The ability of STATCOM to fully maintain the capacitor output current in low system voltage conditions makes STATCOM more effective than SVC in maintaining the transient

stability of the system. When active power compensation is needed, STATCOM is able to take power from an energy storage source (battery, capacitor bank, etc.) using its DC terminal and inject it into the network from its AC terminal. While SVC does not have this capability.

## References

- [1] Chankaya, M.; Hussain, I.; Malik, H.; Ahmad, A.; Alotaibi, M.A.; Márquez, F.P.G. Seamless Capable PV Power Generation System without Battery Storage for Rural Residential Load. *Electronics* 2022, 11, 2413. <https://doi.org/10.3390/electronics11152413>
- [2] Krishna, G.; Singh, R.; Gehlot, A.; Akram, S.V.; Priyadarshi, N.; Twala, B. Digital Technology Implementation in Battery-Management Systems for Sustainable Energy Storage: Review, Challenges, and Recommendations. *Electronics* 2022, 11, 2695. <https://doi.org/10.3390/electronics11172695>
- [3] Iranmehr H, Aazami R, Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi AR, Mohammadzadeh A, Mosavi AH, Guo W. Modeling the Price of Emergency Power Transmission Lines in the Reserve Market Due to the Influence of Renewable Energies. *FRONTIERS IN ENERGY RESEARCH*. 2022 Jan 13;9.
- [4] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A. Control engineering solutions during epidemics: A review. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2021;39(2):97-106.
- [5] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A, Din SU, Mohammadzadeh A, Mobayen S. A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique. *Electric Power Systems Research*. 2022 Sep 1;210:108073.
- [6] Raj, S.; Bhattacharyya B. Optimal placement of TCSC and SVC for reactive power planning using Whale optimization algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation* 2018,40,131-43.
- [7] Wan, Y. Extended SVC modeling for frequency regulation. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2020,36,484-7.
- [8] Wang, L.; Lam, C.S.; Wong, M.C. Hybrid structure of static var compensator and hybrid active power filter (SVC//HAPF) for medium-voltage heavy loads compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2017,65,4432-42.
- [9] Chakraborty, S.; Mukhopadhyay, S.; Biswas, SK. Coordination of D-STATCOM & SVC for Dynamic VAR Compensation and Voltage Stabilization of an AC Grid Interconnected to a DC Microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2021,58,634-44.
- [10] Kavousi-Fard, A.; Khosravi, A.; Nahavandi, S. Reactive power compensation in electric arc furnaces using prediction intervals. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2017,64,5295-304.
- [11] Das, S.; Chatterjee, D.; Goswami, SK. A reactive power compensation scheme for unbalanced four-wire system using virtual Y-TCR model. *IEEE transactions on industrial electronics* 2017,65,3210-9.
- [12] Liu, Y.W.; Rau, S.H.; Wu, C.J.; Lee, W.J. Improvement of power quality by using advanced reactive power compensation. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2017,54,18-24.
- [13] Wang, Z.; Zhang, B.; Mobtahej, M.; Baziar, A.; Khan, B. Advanced reactive power compensation of wind power plant using PMU data. *IEEE Access* 2021,9,67006-14.
- [14] Feola L, Langella R, Papič I, Testa A. Selective interharmonic compensation to improve statcom performance for light flicker mitigation. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2018,33,2442-51.
- [15] Neyshabouri Y, Chaudhary SK, Teodorescu R, Sajadi R, Iman-Eini H. Improving the reactive current compensation capability of cascaded H-bridge based STATCOM under unbalanced grid voltage. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 2019,8,1466-76.
- [16] Qi, J.; Zhao, W.; Bian, X. Comparative study of SVC and STATCOM reactive power compensation for prosumer microgrids with DFIG-based wind farm integration. *IEEE Access* 2020,8,209878-85.
- [17] Cupertino, AF.; Farias, JVM, Pereira HA, Seleme SI, Teodorescu, R. Comparison of DSCC and SDBC modular multilevel converters for STATCOM application during negative sequence compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2018,66,2302-12.
- [18] Shu D, Xie X, Rao H, Gao X, Jiang Q, Huang Y. Sub-and super-synchronous interactions between STATCOMs and weak AC/DC transmissions with series compensations. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2017,33,7424-37.
- [19] do Nascimento Gomes, L.; Abrantes-Ferreira, AJG.; da Silva Dias, RF.; Rolim, LGB. Synchronverter-

based STATCOM with voltage imbalance compensation functionality. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2021,69,4836-44.

[20] Sang, Y; Sahraei-Ardakani, M. The interdependence between transmission switching and variable-impedance series FACTS devices. IEEE Transactions on Power Systems 2017,33,2792-803.

[21] Panfilov, D.; ElGebaly, AE.; Astashev, M.; Rozhkov, AN.; editors. Control system operation in thyristors switched SVCs with improved quality of reactive power. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) 2018: IEEE.

# Improvement of flux and torque ripple in direct torque control (DTC) of induction motor using improved switching tables

Rahmat Aazami <sup>1,\*</sup>, Saman Esmailbeigi <sup>2</sup> and Mohammadamin Shirkhani <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

E-mail addresses: [r.aazami@ilam.ac.ir](mailto:r.aazami@ilam.ac.ir) ; [ma.shirkhani@ilam.ac.ir](mailto:ma.shirkhani@ilam.ac.ir) ; [samanesmaeilbeygi@gmail.com](mailto:samanesmaeilbeygi@gmail.com)

\*Corresponding author

Received: 02/11/2023, Revised: 21/11/2023, Accepted: 28/11/2023.

## Abstract

Direct Torque Control (DTC) is one of the novel methods of the induction motor control in which the torque generated by the induction motor is controlled directly by the inverter switching modes. The direct torque control method has advantages than other induction motor control methods, which include: 1- Non-use of current controllers 2- Remove rotor positioning sensors 3- Quick torque response 4- Lack of dependence on some parameters of the induction motor and 5- lack of need to control any axis of the motor. Due to these features, this method has become one of the popular methods of the induction motor control in industry. But it still has some disadvantages, such as a high ripple in the curves of electromagnetic torque and stator flux, as well as the inappropriate performance at low engine speeds. In this paper, various strategies for direct torque control of the induction motor have been investigated and an improved switching table has been proposed as well as a switching table with 12 regions that are compared with other methods and results indicate that the direct torque control strategy using 12 regions, improves the flux and torque ripple to a satisfactory level. The simulation was performed in Simulink/ Matlab and the results are presented in the simulation section.

## Keywords

Direct Torque Control (DTC), Squirrel cage induction motor control, flux and torque ripp, Induction Motor, Switching Table.

## 1. Introduction

At first, the speed control of electrical machines was driven by direct current machines traditionally, since the magnetic flux and electromagnetic torque are in direct relationship with the stator current and the rotor respectively. In the past 20 years, direct current machines (DC) have given way to induction machines and their abundant application is undeniable in the industry. However, due to their coupled nonlinear structure, the coupling between stator and rotor windings varies over time, which makes it is difficult to control this type of motor. The vector control method (FOC) has been used in the industry for many years and instead of direct current motors, AC machines with this type of control was used. The vector control method (FOC) is similar to the DC motor control which has a fast torque response but for optimal performance, it needs to specify motor parameters accurately and the dependence of this method on the induction motor parameters is one of its disadvantages [1-6].

In the last two decades, in order to improve the performance of the induction motor, a new direct torque control (DTC) of induction motor method was proposed by Japanese and German researchers. This method acts on the basis of selecting the most suitable voltage vector to maintain the curve of electromagnetic flux and torque

in the bandwidth defined in the hysteresis controllers of flux and torque[7, 8]. A lot of research has been done to improve the DTC in recent years. In[9, 10], a direct torque control method is proposed based on which the stator flux curve is directed at a specified path and by inverter switching frequency reduction by the specified reference value for it. In[11, 12], a control scheme based on direct torque control has proposed in which the rotor reference flux has used instead of the stator reference flux. In this method, the use of rotor and stator flux control have combined without knowing the position of the rotor flux. This idea requires the use of induction motor parameters that has usually encountered with saturation problems. In the common DTC method, two hysteresis controllers for flux and torque are used in which flux hysteresis controller is two-levels and torque hysteresis controller is three-levels. The bandwidth of the hysteresis controllers has a great influence on the stator current curve. So that, by decreasing the bandwidth of the hysteresis controllers, the stator current curve approaches a sinusoidal wave [13]. In [14]different methods of artificial intelligence have been investigated on direct torque control, In the case of using fuzzy logic, neural networks as and hybrid fuzzy logic, the flux, and torque ripple decrease significantly.

In this paper, first introduces the common direct torque control (DTC) scheme and then compares it with other methods based on direct torque control. Various articles have been done in this field [15-17], but the methods presented in this article have good performance in terms of torque ripple and flux ripple. Due to the adjustment of the parameters controlling the hysteresis flux and torque in all three conventional methods, it has improved and the 12 ripple flux regions, especially the torque ripple, have had an acceptable reduction compared to the normal state. Also in some similar papers, a synchronous motor as well as a dual feed induction generator have been used to test the work, but in this paper the squirrel cage induction motor has been used. The results show that by applying this type of proposed switching table, the stator flux ripple and electromagnetic torque will be reduced to an acceptable level and the problems that were in the common DTC, somewhat resolved.

## 2. General DTC Structure

The DTC method includes different parts such as switching tables, flux and torque hysteresis controllers, speed estimator, voltage source inverter, PID controller and several other components. In this method, the voltage and current of a motor are sampled and, based on the voltage and current values sampled, the amount of stator flux is calculated. Then, using the current and flux values, the electromagnetic torque is calculated. The values of flux and torque are compared with their reference values and are given to hysteresis controllers, the outputs of these controllers are used for inverter switching. An overview of the DTC method is given in figure 1.

The state space voltage of the three-phase inverter, which is the induction motor stator windings input, is given in equation 1:

$$v_{sn} = \frac{2}{3} v_{dc} e^{\frac{j(n-1)\pi}{3}} \text{ for } \dots 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$0 \text{ for } \dots 0, 7 \quad (1)$$

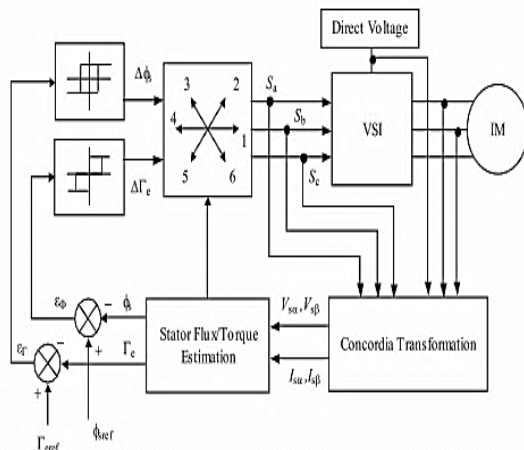


Fig. 1. An overview of the DTC method.

In which the variable n specifies different areas for inverter operation. Voltage vectors for the six regions are shown in Figure 2. Indirect torque control, spatial vectors are used, for this reason, the real and imaginary parts of the stator voltage converted from the three-axis device

into a two-axis device using the following transformation [18].

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.1. Calculation of Stator Flux

The stator flux vector is calculated using the stator voltage vector and the stator winding resistance:

$$\phi_s = \frac{1}{T_N} \int_0^t (V_s - R_s I_s) dt + \phi_{s0} \quad (3)$$

In equation (3),  $\phi_{s0}$  is the value of the flux linkage at the instant  $t = 0$ .

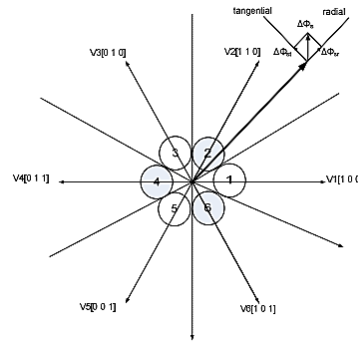


Fig. 2. Output voltage vectors of inverter and stator flux vector with six regions.

If the stator resistance is ignored, the stator flux variations are obtained by the following equation:

$$\Delta \phi_s = V_s \Delta t \quad (4)$$

In which  $\Delta \phi_s$  represents the variations rate of the stator flux which has been created by a new voltage vector. This equation shows that the variations in the stator flux depend on the input voltage vector applied during the time interval  $\Delta t$ . Fig. 2 shows the stator flux vector, which contains the radial component  $\Delta \phi_{sr}$  and the tangential component of  $\Delta \phi_{st}$  [19, 20], and shows that if the stator flux increases, we must select a voltage vector that generates a greater radial component of the stator flux.

### 2.2. Calculation of Electromagnetic Torque

The electromagnetic torque is obtained in induction motors using Equation (5) [13, 21]:

$$T_e = P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\phi_s| * |\phi_r| * \sin \theta_{sr} \quad (5)$$

In the high equation, P the number of machine poles,  $L_m$  the stator and rotor mutual-inductance,  $L_s$  the stator self-inductance and the  $L_r$  are the self-inductance of the rotor windings. In steady state, the stator and rotor flux sizes are almost constant and so, the electromagnetic torque depends on the angle between the stator and rotor flux vector ( $\theta_{sr}$ ). So that by increasing the angular value between the stator and rotor flux vector, The electromagnetic torque increases and vice versa.

### 2.3. Hysteresis Controllers of Torque and Flux

Hysteresis controllers' performance are shown in figure 3 and 4. The torque and stator flux are estimated using equations 6 and 7:

$$T_e = \frac{3}{2} P [\phi_{s\alpha} I_{s\beta} - \phi_{s\beta} I_{s\alpha}]$$

(6)

$$\phi_s = \sqrt{(\phi_{s\alpha}^2 + \phi_{s\beta}^2)} \tag{7}$$

Estimated values are compared with their reference values, and the resulting error value is given to hysteresis controllers of flux and torque. The output of the hysteresis controllers produces an integer that indicates the increase or decrease in each of the flux and torque values.

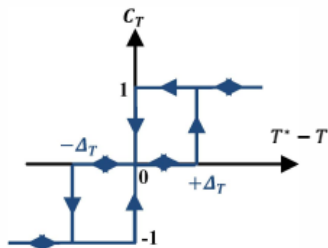


Fig.3. Hysteresis controller of torque [1]

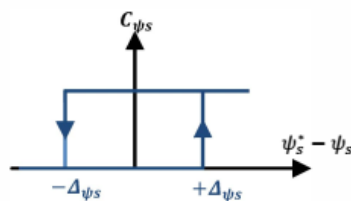


Fig.4. Hysteresis controller of flux [1]

Then the position of the stator flux vector is calculated by Eq. (8):

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{\phi_{s\beta}}{\phi_{s\alpha}} \right) \tag{8}$$

Using the switching table 1, suitable voltage vectors are selected for switching the voltage source inverter (VSI). The applied voltage vectors will affect each of the electromagnetic flux and torque. So that if the flux vector is in region  $i$ , the voltage vectors of  $V_{i+1}$  or  $V_{i-1}$  will increase the flux amplitude and the  $V_{i+2}$  or  $V_{i-2}$  vectors will decrease the amplitude. Similarly, the voltage vectors of the  $V_{i+1}$  and  $V_{i+2}$  will increase the torque, and the  $V_{i-1}$  and  $V_{i-2}$  vectors will reduce the amount of torque produced by the motor.

Table1. General DTC switching table

Outputs of hysteresis controllers		sector					
$C_{\psi_s}$	$C_{T_e}$	1	2	3	4	5	6
1	1	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$
	0	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	-1	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
0	1	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$
	0	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$
	-1	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$

Table2. Switching table of improved scheme

Outputs of hysteresis controllers		sector					
$C_{\psi_s}$	$C_{T_e}$	1	2	3	4	5	6
1	1	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$
	0	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	-1	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$
0	1	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
	0	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	-1	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$

### 3. Direct torque control using improved switching tables and 6 regions

A We found that in the general DTC, the first region of the six regions was bound from the angle of -30 degrees to +30 degrees, but in the improved switching table (table 2), the first region is bounded from zero to

+60 degrees; in other words, the six regions have 30 degrees of angle variation (figure.5)[1]. The improved switching table is obtained by changing the 30 degrees of region. The improved switching table is presented in table 2.

**Table3:** Flux and torque variations due to the use of different voltage vectors

Applied voltage vector	General DTC (-30 and +30)	Improved DTC (0 and 60)
V1	Ambiguity in torque	Flux increases and torque increase
V2	Torque increase and flux increase	Torque increase and flux decrease
V3	Torque increase and flux decrease	Ambiguity in flux
V4	Ambiguity in torque	Torque increase and flux decrease
V5	Torque decreases and flux decrease	Torque decreases and flux decrease
V6	Torque decreases and flux increase	Ambiguity in flux

**Table4.** DTC switching Table in 12-Region Method

Outputs of hysteresis controllers		sector											
$C_{\phi s}$	$C_{T_e}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>
	1	V <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>
	-1	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>6</sub>
	-2	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>
0	2	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>
	1	V <sub>4</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>
	-1	V <sub>7</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>4</sub>
	-2	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>

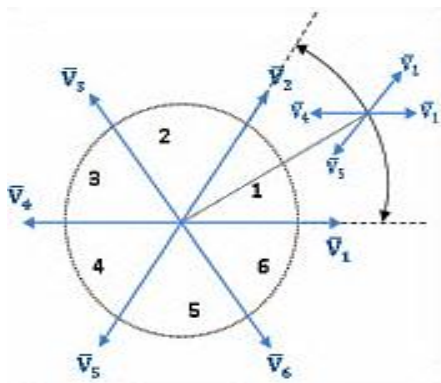


Fig.5. The six regions of the improved scheme.

According to Table 3 in the general DTC, two voltage vectors V1 and V4 have not been used because this voltage vector, depending on the location of the stator flux vector, can increase the torque and can also reduce it. In the improved DTC, two vectors V3 and V6 are not used, and here there is an ambiguity in the flux vector [22]. In the improved DTC, the flux ripple value is less than the ripple value in the general DTC.

**4. Direct torque control with 12 regions switching table method**

In the general direct torque control (DTC), the two applied voltage vectors of  $V_i$  and  $V_{i+1}$  in the  $i$ -region created an ambiguity in torque and were practically useless. Thus, in the improved DTC with six regions, two applied voltage vectors of  $V_{i+2}$  and  $V_{i+5}$  created an ambiguity in increase or decrease of flux, and these two

vectors were not used. Now if the geometric location of the stator flux is divided into 12 regions, all applied voltage vectors in each region were usable and there was an ambiguity problem described in the methods, will be resolved. The geometric location of the stator flux with 12 regions is shown in figure 6. [1, 18]

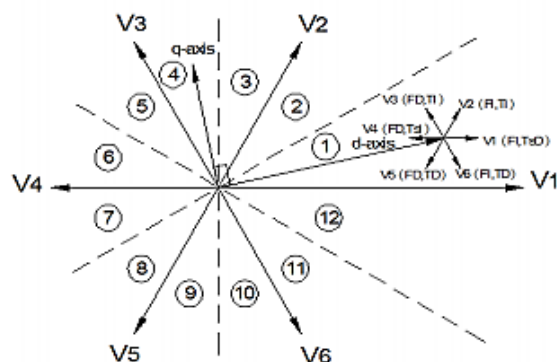


Fig.6. Voltage vectors and geometric location of stator flux with 12 regions[23].

- In figure 6:
- FI = Flux Increase
- FD = Flux Decrease
- TD = Torque Decrease
- TI = Torque Increase
- TSD = Torque Slight Decrease
- TSI = Torque Slight Increase

It should be noted that all voltage vectors are used in this method.

The 12 regions DTC switching table is listed in Table 4. It is clear that the voltage vector of  $V_1$  will generate a relatively large increase in flux, as well as a slight decrease in torque in the 12th region. According to the switching table of 12-region method that given in table 4, hysteresis controller of torque has 4-levels and hysteresis controller of flux is 2-levels.

**5. Simulation**

To check the general direct torque control (DTC) performance and proposed methods for improved switching table and also, the 12-region switching table mentioned above, in the Matlab/Simulink, simulation of these methods are performed and simulation results are given below. In simulations, the hysteresis controller bandwidth of the torque is set to 0.5 and hysteresis controller bandwidth of the flux is set to 0.01.

In simulations, the dynamic model of Squirrel cage induction motor is used and the motor parameters used are as follows:

- $R_r = 1.34$  ohm
- $R_s = 1.77$  ohm
- $L_{lr} = 12.12$  mh
- $L_{ls} = 13.93$  mh
- $L_m = 369$  mh
- $P = 3$ kw
- $V_n = 380$  v
- Pole=4
- $j = 0.005$  kg.m<sup>2</sup>
- $B_m = 0.00001$

**5.1. Electromagnetic Torque Curves**

Electromagnetic torque curves for different switching tables are shown in figures 7-9. These curves are magnified and can be seen in figures 10-12. As you can see in the figures, the torque ripple in the general DTC switching table is better than the torque ripple in the improved switching table and also, the torque ripple in the 12-region switching table has a noticeable improvement over other switching table.

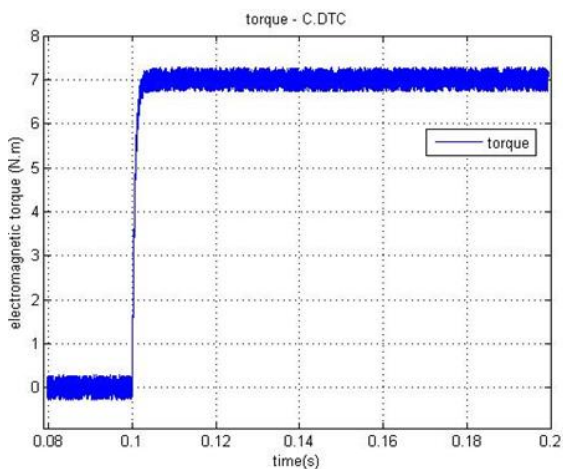


Fig.7. General DTC electromagnetic torque curve

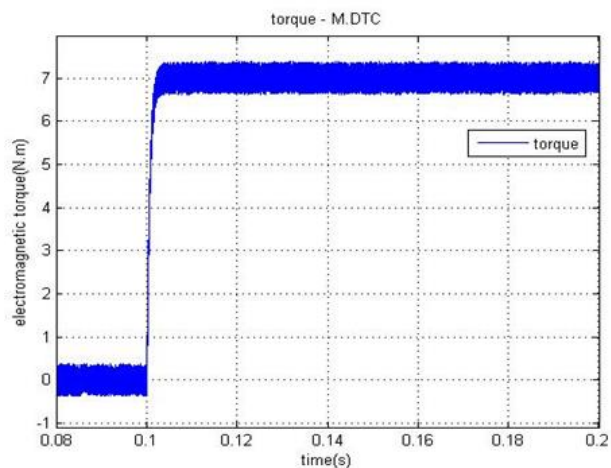


Fig.8. Improved switching table scheme torque curve

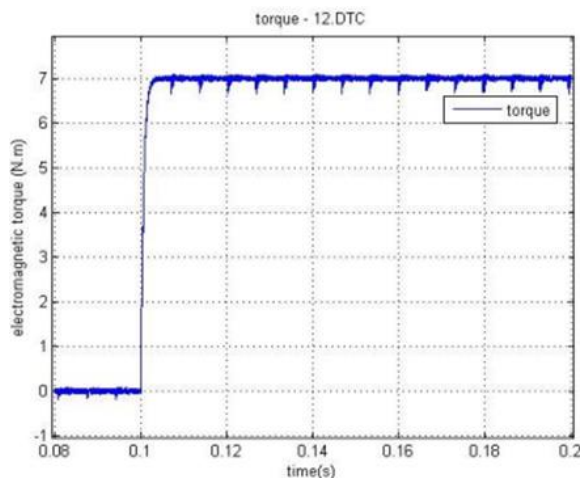


Fig.9. 12-region scheme torque curve

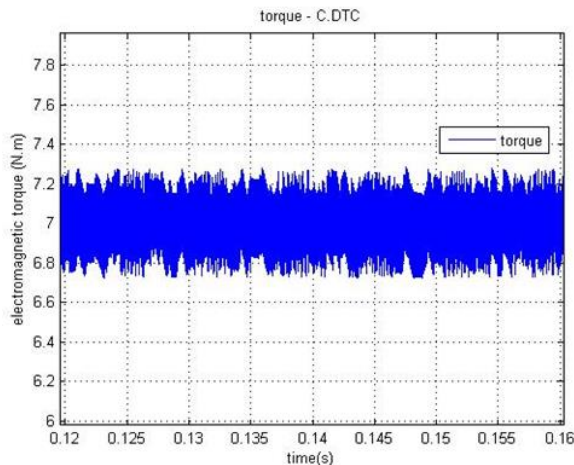


Fig.10. Magnified general DTC torque curve

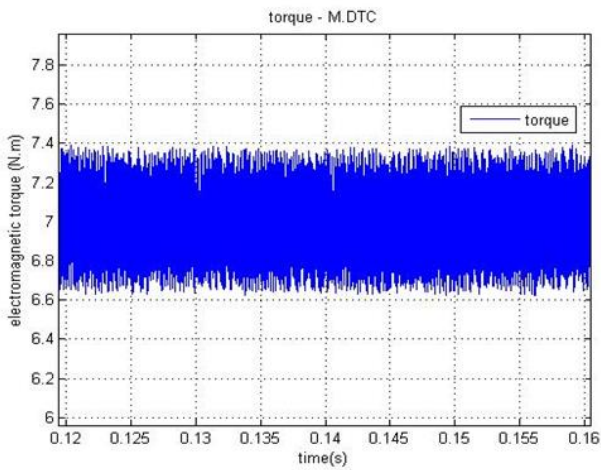


Fig.11. Magnified improved scheme torque curve

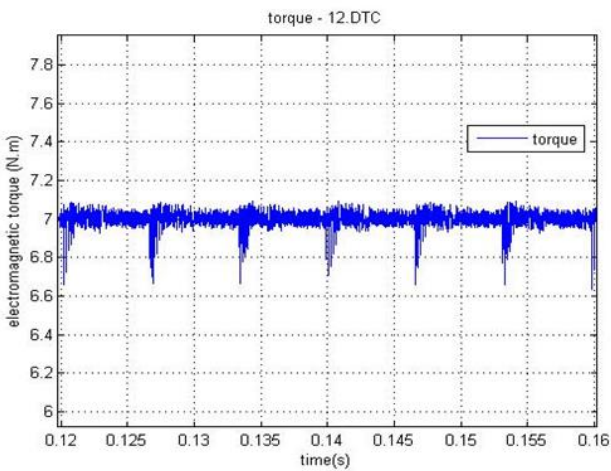


Fig.12. Magnified 12-region scheme torque curve

5.2. Geometric Location Curves for Stator Flux

In figures 13-15, the stator flux curve is given in the general DTC, DTC with improved switching table and DTC with 12-regions switching table. According to the figures, it can be seen that the stator flux curve in the 12-regions method has improved relative to the general DTC method and this will reduce the harmonics of the stator current and improve its quality.

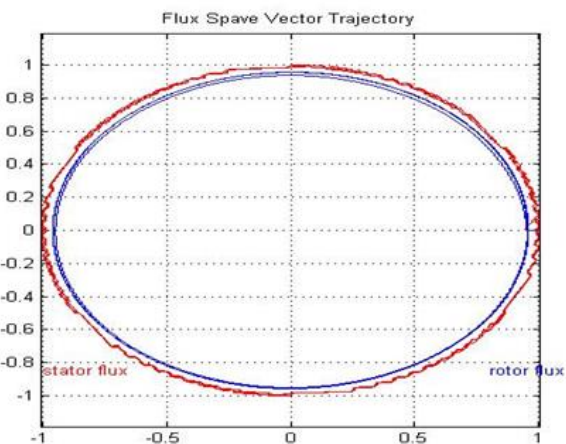


Fig.13. The geometric location of the general DTC stator flux

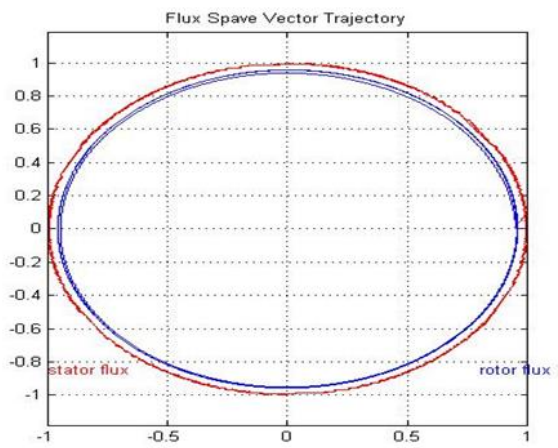


Fig.14. The geometric location of improved scheme stator flux

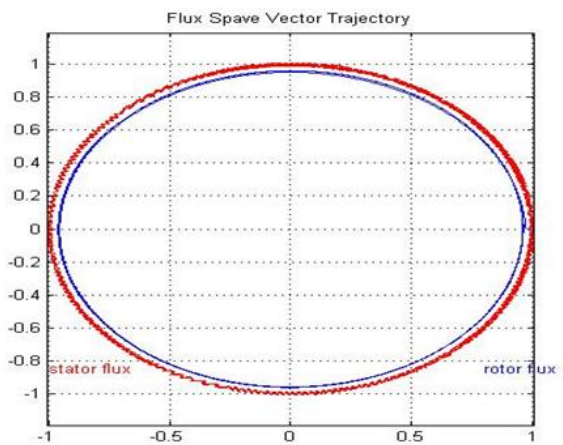


Fig.15. The geometric location of 12-regions scheme stator flux

5.3. Rotor Speed Curves

Rotor speed curves are presented in figures 16-18 in triple methods of switching tables and its magnified curve in figures 19-21. Also, it should be noted that the load is applied to the system at the instant of 0.1 seconds and the speed decrease in the curves is also due to this issue.

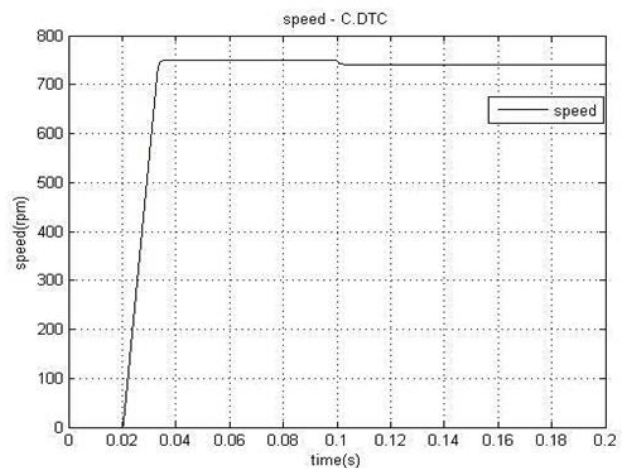


Fig.16. Rotor speed curve in general DTC

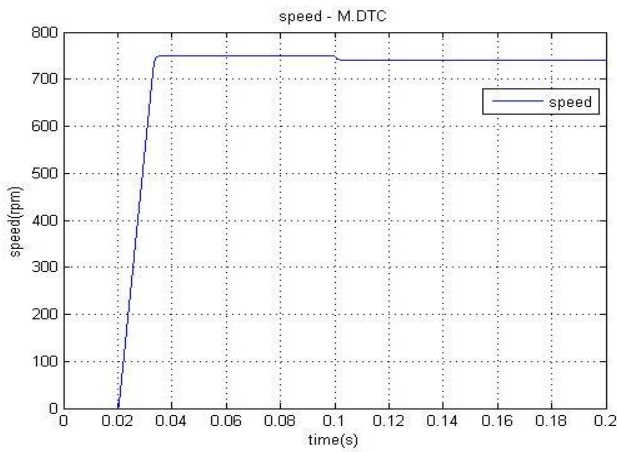


Fig.17. Rotor speed curve in improved scheme

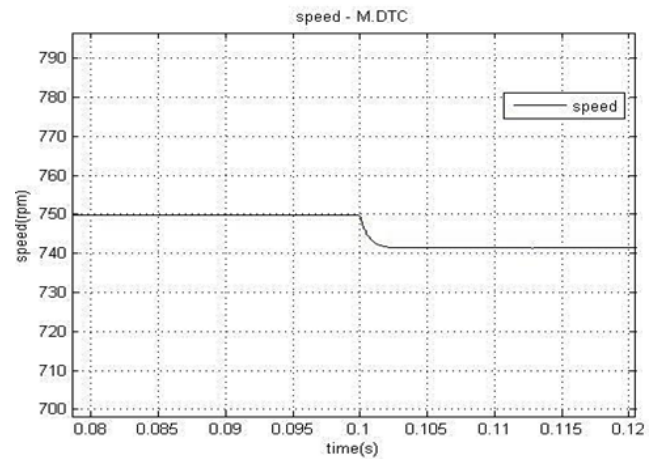


Fig.20. Magnified improved scheme speed curve

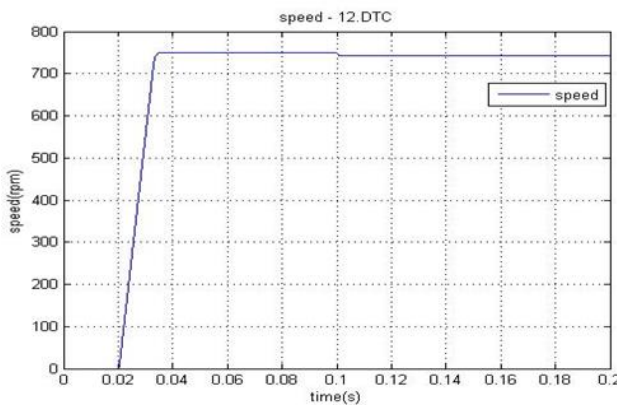


Fig.18. Rotor speed curve in 12-regions scheme

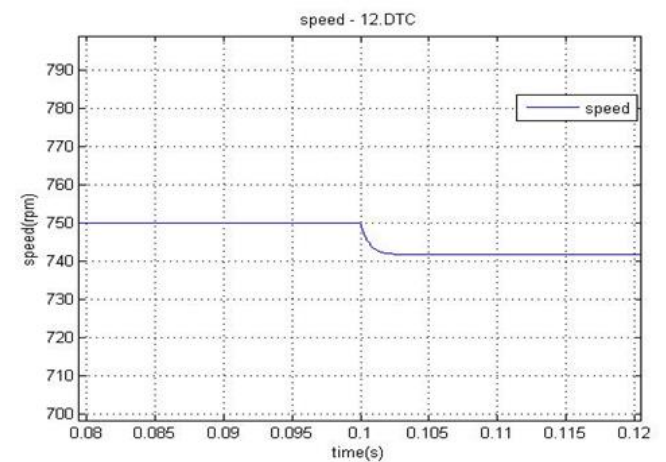


Fig.21. Magnified 12-regions scheme speed curve

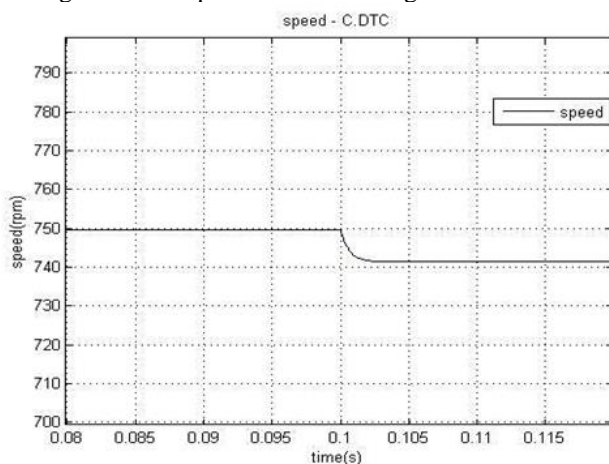


Fig.19. Magnified general DTC speed curve

## 6. Conclusion

In this paper, new switching tables for direct torque control were studied and compared and with the simulations of these new strategies, it was observed that in the direct torque control method with improved switching table and 6 regions decrease flux ripple but torque ripple will increase. But in direct torque control with the 12-region switching table, the flux and torque ripple decreases to an acceptable level. The dynamic response of the torque has acceptable speed in improved and general DTC technique and the 12 regions. Also, it was observed that the motor speed did not change significantly at the time of loading and almost it continues at about the same speed. It was found that the DTC method with 12-regions switching table has better performance than other tables and multi-levels inverters can be used to improve the performance of this strategy.

## References

- [1] Bensaadi, Hacene, Youcef Harbouche, and Rachid Abdessmed. "Direct torque control (DTC-SVM) of PMSG based in wind energy conversion system." UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science 81.2 (2019): 227-240.
- [2] Z. Wu, G. Zhang, W. Du, J. Wang, F. Han, D. Qian, "Torque control of bolt tightening process through

adaptive-gain second-order sliding mode," *Measurement and Control*, vol. 53, no. 7-8, pp.1131-1143, Jul. 2020.

[3] K. Prathibanandhi, R. Ramesh, "Hybrid control technique for minimizing the torque ripple of brushless direct current motor," *Measurement and Control*, vol. 51, no. 7-8, pp. 321-335, Aug. 2018.

[4] Y. Cho, "Development and verification of individual motor control technology to improve the driving performance of independently rotating wheel type railway vehicle using hardware-in-the-loop (HIL) Simulator," *Measurement and Control*, vol. 54, no. 1-2, pp. 11-24, Dec. 2020.

[5] J. Tavoosi, "PMSM speed control based on intelligent sliding mode technique," *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 39, no. 6, pp. 1315-1328, Sep. 2020.

[6] J. Tavoosi, M. Shirkhani, A. Abdali, A. Mohammadzadeh, M. Nazari, S. Mobayen, J.H. Asad, A. Bartoszewicz, "A New General Type-2 Fuzzy Predictive Scheme for PID Tuning," *applied sciences*, vol. 11, no. 21, Nov. 2021.

[7] Najib El Ouanjli, Saad Motahhir, Aziz Derouich, Abdelaziz ElGhizal, Ali Chebabhi, Mohammed Taoussi, "Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 271-279, Nov. 2019.

[8] El Ouanjli, N., Motahhir, S., Derouich, A., El Ghizal, A., Chebabhi, A., & Taoussi, M. (2019). Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller. *Energy Reports*, 5, 271-279.

[9] Baader, U., M. Depenbrock, G. Gierse, "Direct self control (DSC) of inverter-fed induction machine: A basis for speed control without speed measurement," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 28, no. 3, pp. 581-588. May. 1992.

[10] M. Depenbrock, "Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 420-429. Oct. 1988.

[11] Casadei, D., G. Grandi, G. Serra, "Rotor flux oriented torque-control of induction machines based on stator flux vector control. in *Power Electronics and Applications*," Fifth European Conference on. Sep. 1993.

[12] Casadei, D., G. Grandi, G. Serra, "Study and implementation of a simplified and efficient digital vector controller for induction motors. in *Electrical Machines and Drives*,". 1993 Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 376), Sep. 1993.

[13] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra, A. Tani, "Effects of flux and torque hysteresis band amplitude in direct torque control of induction machines," *Proceedings of IECON'94 - 20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Sep. 1994.

[14] M.R. Douiri, M. Cherkaoui, "Comparative study of various artificial intelligence approaches applied to direct torque control of induction motor drives," *Frontiers in Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 456-467, Jul. 2013.

[15] A. Al-Quteimat, A. Roccaforte, U. Schäfer, "Performance improvement of direct torque control for doubly fed induction generator with 12 sector methodology," 2016 IEEE International Conference on

*Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016, pp. 242-246.

[16] M. Essaadi, M. Khafallah, A. Saad, A. Hamdoun, H. Chaikhy, "A comparative analysis between conventionnal and new direct torque control strategies of induction machine," 2014 Second World Conference on Complex Systems (WCCS), 2014, pp. 350-354.

[17] T. S. Singh, A. K. Jain, "Improved Direct Torque Controlled IPM Synchronous Motor using variable band 12 sector control in two level inverter," 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), 2016, pp. 1-6.

[18] Vas, Peter., *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford Univ. Press. 1998.

[19] M. Hafeez, M.N. Uddin, R.S. Rebeiro, "FLC based hysteresis band adaptation to optimize torque and stator flux ripples of a DTC based IM drive," 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference, Aug. 2010.

[20] M.P. Kazmierkowski, A.B. Kasprowicz, "Improved direct torque and flux vector control of PWM inverter-fed induction motor drives," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 42, no. 4, pp. 344-350. Aug. 1995.

[21] A.M. Trzynadlowski, "The field orientation principle in control of induction motors," *Springer Science & Business Media*. 1993.

[22] Mokhtaril, B., et al., *Experimental DTC of an Induction Motor Applied to Optimize a Tracking System*. energy, vol. 12, 2012.

[23] E. Ahmed, A.R.A. Elwhab, S.A. Abo-Zaid, Elwany, "Torque Ripple Reduction in Direct Torque Control of Induction Motor Drives by Improvement of the Switching Table," *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, vol.1, no.5, pp. 238-243. Dec. 2014.

## Estimating stray load losses methods in induction machines

Ali Yazdani Baghmaleki <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Shahed University of Tehran, Tehran, Tehran, Iran

E-mails: [AliYazdani7799@gmail.com](mailto:AliYazdani7799@gmail.com)

\* Corresponding Author

### Abstract

Nowadays, with the increase in the cost of electric energy and on the other hand, the shortage of reserves and sources of energy supply, it is tried to design energy consuming systems in a way that their cost is optimized as much as possible. One of the methods that can lead to energy saving and optimization is the proper selection of high-efficiency consumer equipment and devices. In most countries, industries consume most of the electricity produced, and their electricity consumption is mainly done by electric motors. In recent years, new regulations on the efficiency of electric motors have been introduced around the world. One of the ways to reduce the energy consumption of motors is to lead the industry to use more efficient motors with higher efficiency. The correct determination of the total losses in the induction motor has an important contribution to the more accurate estimation of the efficiency of the induction motor, and by removing low-efficiency motors from the workplace cycle, costs and energy waste are greatly reduced. Stray load losses are the most unknown element in the power balance of induction machines, and since these losses are of great importance in determining the efficiency of the induction motor, in this report, all available methods for determining stray load losses are briefly introduced and discussed.

### Keywords

Motor load losses, Induction motor, Harmonic.

## روش های برآورد تلفات بار سرگردان در ماشین های القایی

علی یزدانی باغملکی<sup>۱</sup>

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد تهران، تهران، ایران

ایمیل نویسنده: [AliYazdani7799@gmail.com](mailto:AliYazdani7799@gmail.com)

### چکیده

امروزه با افزایش هزینه انرژی الکتریکی و از طرفی کمبود ذخایر و منابع تامین انرژی، سعی بر این است که حتی الامکان سیستم های مصرف کننده انرژی را به نوعی طراحی نمود که هزینه آنها بهینه گردد. یکی از روش هایی که می تواند منجر به صرفه جویی و بهینه سازی انرژی گردد، انتخاب مناسب تجهیزات و وسایل مصرف کننده با راندمان بالا می باشد. در اغلب کشورها، صنایع قسمت عمده برق تولیدی را مصرف می کنند و مصرف برق آنها نیز عمدتاً توسط موتور های الکتریکی صورت می پذیرد. در سال های اخیر، مقررات جدیدی در مورد بهره وری از موتورهای الکتریکی در سراسر جهان معرفی شده است یکی از راه های کاهش در مصرف انرژی موتورها، هدایت صنعت به استفاده از موتورهای کارآمدتر و با راندمان بالاتر است. تعیین صحیح تلفات کل در موتور القایی سهم مهمی در بیشتر شدن تخمین دقیق راندمان موتور القایی دارد و با حذف موتورهای کم بازده از چرخه محل کار، هزینه ها و اتلاف انرژی تا حد زیادی کاهش می یابد. تلفات بار سرگردان ناشناخته ترین عنصر در تعادل قدرت ماشین های القایی هستند و از آنجایی که این تلفات اهمیت زیادی در تعیین بازده موتور القایی دارند، در این گزارش، تمام روش های موجود برای تعیین تلفات بار سرگردان به طور خلاصه معرفی و مورد بحث قرار می گیرند.

**کلمات کلیدی:** تلفات بار، موتور القایی، هارمونیک

نام نویسنده مسئول: علی یزدانی باغملکی

ایمیل نویسنده مسئول: [AliYazdani7799@gmail.com](mailto:AliYazdani7799@gmail.com)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱

### ۱- مقدمه

شدن جو، ذوب شدن یخهای قطب، بارش بارانهای اسیدی، افزایش بیماریها و مرگ و میر ناشی از غلظت آلاینده ها و بسیاری از عوامل دیگر، به خاطر مصرف بیش از اندازه سوخته های فسیلی در این سالها بوده است. یکی از راههایی که می تواند حداقل از سرعت سرسام آور کاهش ذخایر انرژی و افزایش روز افزون آلودگی محیط زیست بکاهد، استفاده بهینه از انرژی می باشد [8-10]. تولید و تهیه انرژی الکتریکی برای صنعت برق بسیار گران تمام می شود. از طرف دیگر با ورود صنایع جدید، تقاضا برای انرژی بیشتر می گردد و صنعت برق را وادار به احداث نیروگاههای جدید می نماید. بنابراین صرفه جویی هر واحد انرژی الکتریکی هم در کوتاه مدت و هم در بلند مدت می تواند باعث کاهش هزینه های صنعت برق گردد.

#### ۱-۲- تعریف تلفات موتور

در موتور ایده آل، توان ورودی کاملاً مساوی با کار انجام شده یا توان خروجی است اما موتورهای واقعی مقداری از توان ورودی را تلف می کنند. در واقع تلفات قسمتی از توان دریافتی موتور است که به کار یا توان خروجی تبدیل نمی شود بنابراین تلفات موتور عبارت است از توان ورودی منهای توان خروجی [11-15].

#### ۱-۳- تعریف راندمان

راندمان موتور، حاصل نسبت خروجی مکانیکی موتور (توان ظاهر شده بر روی محور موتور) به ورودی الکتریکی آن می باشد. استانداردهای

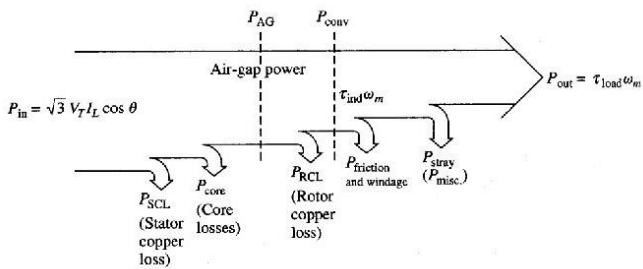
بحران انرژی از مشکلات اساسی جهان امروز است. اکنون بشر نه تنها به خاطر هزینه بالا به دنبال صرفه جویی در مصرف انرژی است، بلکه از نظر حفاظت از محیط زیست هم باید در کاهش مصرف انرژی بکوشد. برای این منظور در جستجوی روش هایی است که از نظر اقتصادی به صرفه باشند و سبب کاهش هزینه ها و کاهش آلودگی محیط زیست گردند. از نقطه تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه ها، تا انتقال و توزیع آن، مقداری از انرژی اولیه تلف می شود. در این بخشها سعی بر آن است که با طراحی و بهره برداری بهینه سیستم های تولید، انتقال و توزیع از میزان تلفات انرژی کاسته شود. اما حوزه مورد مطالعه در این گزارش مربوط به بعد از این بخش ها، یعنی نقطه نهایی مصرف می باشد [4-1].

در حال حاضر اکثر انرژی مصرفی در سطح جهان از منابع تجدید ناپذیر سوخته های فسیلی تامین می شود. این سوخته ها دارای قیمت بالا همراه با نوسان زیاد باشد. از سوی دیگر با افزایش جمعیت جهان و گسترش صنعت و فن آوری و استفاده روز افزون از ماشینها، بشر با مشکلات زیست محیطی عدیده ناشی از مصرف بی رویه انرژی مواجه شده است. از اینرو صرفه جویی هر چه بیشتر در مصرف انرژی در دنیای امروز ضروری است [5-7].

#### ۱-۱- اهمیت موضوع از دیدگاه منابع انرژی و محیط زیست

امروزه یکی از بزرگترین نگرانی های بشر این است که منابع اولیه انرژی به زودی پایان خواهد پذیرفت؛ علاوه بر آن، سالهای سال مصرف سوخته های فسیلی باعث اثرات زیانبار زیست محیطی گردیده است تا جایی که مدتهاست حتی نفس کشیدن هم برای بشر مشکل شده و روز به روز بدتر می شود. گرم

### ۱-۲ انواع تلفات در موتورهای القایی



شکل ۲. انواع تلفات در موتورهای القایی

تلفات توان در موتورهای القایی می تواند به دو دسته اصلی تقسیم شود:

#### الف) تلفات ثابت

#### ب) تلفات متغیر

هر کدام از این دو دسته تلفات شامل چندین جزء مختلف هستند که در ادامه آن ها را بیان می کنیم.

#### الف) تلفات ثابت

فرض می شود که تلفات ثابت در تمام شرایط بارگذاری موتور، از بی باری تا بار کامل، ثابت باشد. این فرض، به طور کامل درست نیست اما تقریباً اینگونه است و با این تقریب، خطای ناچیزی به وجود می آید. تلفات ثابت شامل تلفات هسته و تلفات مکانیکی (تلفات اصطکاک و باد) می باشند.

#### ۱) تلفات هسته

تولید میدان مغناطیسی گردان در موتور القایی، موجب می شود تا آرمیچر بچرخد. هنگامی که مولکول های فولاد، به وسیله جریان متناوب، در یک جهت مغناطیس می شوند، تلفات انرژی در فولاد به وجود می آید. این تلفات به صورت گرما ظاهر می شود و به (( تلفات هیستریزس )) موسوم است. تلفات هیستریزس با افزایش چگالی شار مغناطیسی ( ناشی از افزایش جریان ) و همچنین با افزایش فرکانس منبع، افزایش می یابد.

همچنین میدان مغناطیسی متناوب، ولتاژهای کوچکی در هسته فولادی ایجاد می کند که موجب گردش جریانهای تصادفی در فولاد می گردد. این جریان ها که موسوم به جریانهای گردابی هستند باعث ایجاد تلفات توان می شوند که به صورت گرما ظاهر می شود و به (( تلفات جریان گردابی یا فوکو )) موسوم است. تلفات فوکو نیز با افزایش چگالی شار و فرکانس افزایش می یابد. تلفات هیستریزس و تلفات فوکو، معمولاً تحت عبارت (( تلفات آهنی )) یا (( تلفات هسته )) با یکدیگر ادغام می شوند.

تلفات هسته با تغییر جریان بارگذاری، تغییرات سرعت و سایر شرایط عملکرد موتور تغییر می کند. ولی استانداردهای تعیین تلفات، فرض می کنند که تلفات هسته در تمام رنج بارگذاری موتور، ثابت است و نادرستی نتایج این فرض به حساب تلفات بار سرگردان گذاشته می شود.

#### ۲) تلفات مکانیکی

مقداری از انرژی دریافتی توسط موتور، برای غلبه بر اصطکاک بلبرینگ ها و اصطکاک بخش های متحرک (مخصوصاً پره های فن) با هوا، مصرف می شود. این تلفات، موسوم به (( تلفات مکانیکی )) هستند و فرض می شود که از بی باری تا بار کامل، ثابت باشند و در اینجا نیز هرگونه عدم صحت ناشی از این فرض، به حساب تلفات بار سرگردان گذاشته می شود.

#### ب) تلفات متغیر

$$\eta \text{ راندمان } (\%) = \frac{P_{in}}{P_{out}} * 100$$

متعدد و متفاوتی جهت آزمایش و تعیین بازدهی موتورهای القایی، توسط ارگانها و متخصصین کشورهای مختلف پیشنهاد شده اند. روش معمول برای آزمایش کارآیی و یا تعیین راندمان بار کامل یک موتور القایی سه فاز، اعمال گشتاور بار کامل بر روی محور خروجی ماشین و محاسبه نسبت توان مکانیکی خروجی به توان الکتریکی ورودی است و معمولاً به درصد بیان می شود:

در نگاه اول به این رابطه، ممکن است بدست آوردن راندمان کار ساده ای به نظر برسد و گفته شود که فقط با اندازه گیری توان مکانیکی خروجی و بدست آوردن ورودی الکتریکی یک واتمتر، میتوان مقادیر بدست آمده را در رابطه فوق قرار داده و راندمان را به سادگی بدست آورد. اما متأسفانه موارد فوق، به ویژه تعیین خروجی مکانیکی، کارهای ساده و سراسری نیستند. مخصوصاً اندازه گیری تقریبی توان خروجی به خاطر ماهیت مکانیکی، دشوار، پیچیده، دارای محاسبات متنوع می باشد. در حقیقت تعیین مستقیم راندمان موتور با استفاده از رابطه قبل کار سختی خواهد بود. بنابراین به جای محاسبه نسبت خروجی به ورودی، اندازه گیری مستقیم تلفات انجام شده و سپس تلفات از توان ورودی کسر و با تقسیم باقیمانده بر توان ورودی راندمان محاسبه شود:

$$\eta \text{ راندمان } (\%) = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} * 100$$

پس با بدست آوردن توان ورودی و تلفات می توان راندمان را به روش غیر مستقیم تعیین نمود. هر چند که تعیین تلفات هم کار آسانی نیست.

#### ضرورت تعیین راندمان

با تمام مشکلاتی که بر سر راه تعیین راندمان موتور الکتریکی وجود دارد، ممکن است گفته شود چه لزومی دارد که راندمان موتور تعیین شود؟ مگر بدون تعیین راندمان، امکان بهینه سازی انرژی وجود ندارد؟ در پاسخ باید گفت راندمان یا بازده، درست مانند ملاک، معیار، پیمانانه، ترازو و یا ابزار سنجش برای تصمیم گیری در هر پروژه بهینه سازی است تا به وسیله آن بتوان تحلیلی از وضعیت موجود داشت و سپس میزان بهبودی و صرفه جویی انرژی قابل دستیابی از طریق طرح های جدید را برآورد نمود.

### ۲- ساختمان موتور القایی

ساختمان موتور القایی از دو جزء اصلی استاتور و رتور تشکیل گردیده است. هسته استاتور از یک ساختار ورقه ورقه فولادی تشکیل می شود. سطح داخلی استاتور حاوی شیارهایی است که سیم پیچی سه فاز درون آن جاسازی می شود. هسته رتور نیز از یک ساختار ورقه ورقه فولادی سوار شده بر روی یک محور، هادیها یا میله های قفس سنجایی و معمولاً یک فن تشکیل می شود.



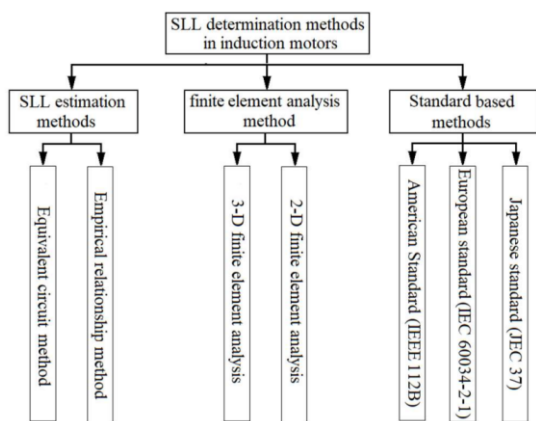
شکل ۱. ساختار یک موتور القایی

با توجه به مطالعاتی که تاکنون انجام شده است، به طور کلی موارد زیر منشأ فیزیکی SLL در موتور القایی می باشد:

- ❖ شکاف های استاتور و روتور که باعث تلفات جریان گردابی در مس استاتور و روتور به دلیل شار نشتی شکاف می شوند.
- ❖ تلفات در انتهای سازه به دلیل شار نشتی در انتها.
- ❖ محدودیت های خواص مغناطیسی مواد آهن در استاتور و روتور که منجر به اشباع تحت بار می شود.
- ❖ هارمونیک زمانی که موتور توسط یک درایو با مبدل تغذیه می شود.

### ۳- روش های برآورد

با توجه به مطالعات انجام شده در مورد تلفات بار سرگردان، روش های تعیین آن در موتور های القایی را می توان به طور کلی به چهار دسته طبقه بندی کرد. هر کدام از این روش ها فرآیند خاصی را ارائه می دهند و دارای درجات مختلف دقت است که در ادامه به بررسی آن ها می پردازیم.



شکل ۳. روش های برآورد

### ۳-۱- تعیین SLL با استفاده از استانداردها

در استانداردهای مختلف، فرآیند اندازه گیری و مقدار توصیه شده برای SLL در موتورهای القایی متفاوت است، مهمترین استانداردهای تعیین SLL موتورهای القایی عبارت اند از:

- استاندارد آمریکایی (IEEE 112B)
- استاندارد اروپا (IEC 60034-2-1)
- استاندارد ژاپنی (JEC 37)

در استاندارد IEEE 112B، اگر اندازه گیری نباشد ممکن است، مقدار SLL یک درصد ثابت از توان نامی موتور در نظر گرفته شود

مطابق استانداردها، فوق مقادیر SLL در استاندارد IEEE 112B برحسب قدرت نامی موتور بدست می آید. اما برخلاف استاندارد IEEE 112B، استاندارد IEC 60034-2-1 مقدار SLL را ۰.۵٪ از قدرت نامی موتور در نظر می گیرد و این درصد برای رنج های مختلف توان نامی موتور یکسان است و در استاندارد ژاپنی JEC 37، مقدار SLL صفر در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است که در روش های فوق اثر شرایط عملیاتی در SLL در نظر گرفته نمی شود و تفاوت در مقدار SLL در استانداردهای مختلف باعث شده

تلفات متغیر، متناسب با بار گذاری روی موتور افزایش می یابد و تقریباً متناسب با مربع جریان بارگذاری موتور می باشد. این تلفات، در درجه اول شامل تلفات اهمی در سیم پیچی های استاتور و رتور و در درجه دوم شامل تلفات بار سرگردان می باشد.

### ۱) تلفات سیم پیچی

ولتاژ اعمالی به موتور، جریان را در سیم پیچی های موتور جاری می سازد. در موتور القایی سه فاز، ولتاژ مستقیماً به استاتور یا سیم پیچی اولیه اعمال می شود و جریان القایی در رتور یا سیم پیچی ثانویه جاری می گردد. سیم پیچی ثانویه یک موتور قفس سنجایی از میله های مسی یا آلومینیومی تشکیل می شود که درون شیارهای رتور قرار گرفته اند و از دو سمت توسط حلقه های انتهایی به هم متصل گردیده اند. به هر صورت، به علت عبور جریان از سیم پیچی ها مقداری از الکتریسیته به صورت گرما در مقاومت های استاتور و رتور تلف می شود. این تلفات به (( تلفات سیم پیچی یا تلفات اهمی )) موسوم می باشد و فرض می شود که با مربع جریان بار گذاری تغییر کند. این فرض بطور کامل درست نیست زیرا مقدار مقاومت موثر سیم پیچی ها ثابت نبوده و به دما، بار، اثر پوستی جریان متناوب، اثرات مغناطیسی، تقسیم نامساوی جریان در میان هادیها و عوامل مشابه بستگی دارد. خطای ناشی از این فرض نیز به حساب تلفات بار سرگردان گذاشته می شود.

### ۲) تلفات بار سرگردان

همانطور که در قسمت های قبل گفته شد، فرض می شود که چندین نمونه از تلفات، در تمام رنج بارگذاری موتور، ثابت باشند ولی آنها عملاً تا اندازه ای با بار تغییر می کنند. جریان هادی ها، به خاطر تأثیر پوستی و هندسه هادی، تا اندازه ای به طور نامساوی تقسیم خواهد شد. همچنین، همانطور که جریان افزایش می یابد، دمای هادی نیز افزایش خواهد یافت که باعث افزایش مقاومت هادی و بنابراین افزایش تلفات هادی خواهد شد. علاوه بر این، از آنجایی که شار مغناطیسی با جریان بار گذاری افزایش می یابد، تلفات هسته نیز زیاد می شود. تمام این تلفات جزئی از هر دو منبع شناخته شده و ناشناخته، با یکدیگر از قماش دانسته می شوند. این تلفات با عنوان ((تلفات بار سرگردان)) نامگذاری می شوند. در فصل بعد به طور کامل به این تلفات می پردازیم و روش های تعیین این تلفات را معرفی کرده و با یکدیگر مقایسه می کنیم.

### ۲-۳- تعریف تلفات بار سرگردان

تفاوت بین تلفات کل توان در موتور القایی در شرایط بار و تلفات تعیین شده با روش تلفات تفکیک شده به عنوان تلفات بار سرگردان (Stray Load Losses) در نظر گرفته می شود. به عبارت دیگر تلفات بار سرگردان به منابع تلفات ماشین القایی اشاره دارد که در محاسبات معمولی تلفات مسی استاتور و روتور، تلفات هسته و یا تلفات اصطکاک و باد محاسبه نمی شود.

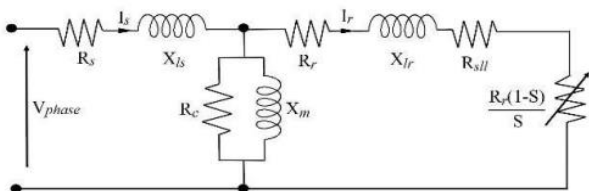
همانطور که گفته شد از میان تلفات ماشین القایی، کمترین تحلیل در مورد تلفات بار سرگردان (SLL) انجام شده است و با توجه به مقدار معنی دار آن، برآورد این تلفات نقش بسزایی در تعیین هرچه دقیق تر راندمان ماشین های الکتریکی القایی دارد

#### ۴-۲ - روش مدار معادل

در سال های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه های مختلف تعیین پارامترهای مدار معادل موتور القایی و افزایش دقت این روش ها برای تعیین SLL انجام شده است. هنگامی که تعیین SLL برای تخمین راندمان موتور تحت بارهای اندازه گیری نشده مورد نیاز است، استفاده از روش مدار معادل بسیار مفید است.

همانطور که میدانیم پارامترهای مدار معادل یک موتور القایی را با انجام آزمایشات مختلف مثل سرعت سنکرون، رتور قفل شده و آزمایش DC میتوانیم تعیین کنیم اما به طور معمول با استفاده از الگوریتم های ریاضی مختلف و هوشمند به صورت آنلاین یا آفلاین تخمین زده می شود. بر اساس تخمین پارامترهای مدار معادل، مقدار SLL موتور القایی را می توان در هر نقطه از عملکرد موتور تعیین کرد و از این رو، می توان راندمان بهینه موتور القایی در هر نقطه عملکرد آن تخمین زد.

در یکی از مطالعات انجام شده برای تخمین بازده موتورهای القایی با استفاده از الگوریتم های هوشمند، از یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تعیین پارامترهای ناشناخته مدار معادل و تعیین SLL استفاده می شود. مدار معادل پیشنهاد شده برای تعیین SLL یک موتور القایی سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است :



شکل ۴. مدار معادل

همانطور که مشاهده می شود برای در نظر گرفتن SLL، یک مقاومت اضافی به صورت سری با اندوکتانس نشستی روتور در مدار معادل اضافه شده است (R<sub>sll</sub>) که مقدار آن با استفاده از رابطه زیر بدست می آید :

$$R_{sll} = 0.018 R_r (1 - S_{fl}) / S_{fl}$$

در یکی دیگر از مطالعات انجام شده یک روش اقتصادی برای تعیین SLL و تخمین بازده موتور القایی بدون نیاز برای اندازه گیری توان خروجی پیشنهاد شده است که R<sub>sll</sub> در مدار معادل مورد استفاده در این کار با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$R_{sll} = 0.018 R_r (1 - S_{fl}) / S_{fl}$$

که در این رابطه k ضریبی است در بازه 0.002 < k < 0.018

روش مدار معادل محدودیت های روش های قبل را ندارد و با توجه به دقت بالای این روش، استفاده از آن برای تعیین تلفات بار سرگردان بسیار مفید خواهد بود.

است که مقدار بدست آمده برای راندمان موتور القایی توسط استانداردهای مختلف متفاوت باشند نتایج حاصل از مقایسه های انجام شده نشان می دهد که استاندارد IEEE 112B دقت بیشتری نسبت به سایر استانداردها دارد و مرجع مناسب تری برای تعیین SLL نسبت به دیگر استانداردها است.

#### ۴ - روش تحلیل اجزاء محدود 2D و 3D

علاوه بر استانداردهای موجود، محققان مدلی هایی نیز با استفاده از تحلیل المان محدود برای تعیین SLL معرفی کرده اند. در روش تحلیل اجزاء محدود دو بعدی و سه بعدی، با وارد کردن کلیه اطلاعات موتور در نرم افزار مربوطه و ایجاد مدل های دو بعدی یا سه بعدی، مقادیر SLL و تلفات هسته محاسبه می شود.

طبق مقایسه های انجام شده مقادیر به دست آمده است برای SLL در روش تحلیل اجزاء محدود با روش استاندارد IEEE 112B تقریباً یکسان است. یکی از موانع اصلی در استفاده از روش های مبتنی بر تحلیل اجزاء محدود برای تعیین SLL در موتور از قبل نصب شده، عدم دسترسی به اطلاعات مواد و جزئیات هندسی موتور است. بنابراین، تجزیه و تحلیل اجزای محدود برای تعیین SLL موتورهای القایی در حال کار قابل اجرا نیست.

#### ۴-۱ - روش روابط تجربی

در این روش آزمایشاتی بر روی یک تعداد زیادی موتورهای القایی با توان و کاربرد متفاوت انجام شده است و نتایج حاصل از این آزمایشات، روابط تجربی است که برای تعیین SLL به دست آمده است. در یکی از موارد با انجام آزمایش های گسترده بر روی ۱۸۲ موتورهای القایی با توان های مختلف، فرمولی برای تعیین SLL پیشنهاد شده است که از تخمین SLL نسبت به روش های مبتنی بر استاندارد دقیق تر است :

$$P_{SLL} = 0.011 P_{in}$$

یکی از اشکالات تعیین SLL با استفاده از رابطه این است که مقدار SLL تنها وابسته به توان ورودی است، در حالی که SLL به اندازه موتور و ترکیب شیار-قطب نیز بستگی دارد. در یکی دیگر از مطالعات انجام شده برای تخمین بازده موتور القایی، از روش گشتاور فاصله هوایی استفاده شده است و یک رابطه تجربی جدید برای محاسبه SLL استفاده شده است :

$$P_{SLL} = P_{in} \times \left[ 0.025 - 0.005 \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{1KW} \right) \right]$$

P<sub>out</sub> توان نامی خروجی است و P<sub>in</sub> توان ورودی نامی است.

یکی از محدودیت های اصلی استفاده از روش روابط تجربی این است که نمی توان آنها را برای موتورهایی با توان مشابه اما ساختارهای هندسی متفاوت استفاده کرد، چراکه دو موتور با توان خروجی یکسانی اما ساختار هندسی متفاوت، شار نشستی آنها متفاوتی دارند که این منجر به مقادیر مختلف برای SLL می شود در حالی که استفاده از روابط فوق ما را به مقادیر یکسان برای تلفات بار سرگردان این دو موتور می رساند.

جدول ۱. مقایسه روش های تعیین SLL

روش	مزایا	معایب
روش مبتنی بر استاندارد	- استفاده آسان برای تعیین SLL. - استانداردهای مختلفی برای تمامی محدوده های قدرت موتور موجود است.	- تفاوت در مقدار تعیین شده برای SLL، برای استانداردهای مختلف - تفاوت شرایط کار موتور با شرایط استاندارد، استفاده از آن را محدود می کند.
روش تحلیل المان محدود ۲ بعدی و ۳ بعدی	- روش نسبتا ساده است. - مقدار بدست آمده برای SLL از دقت بالایی برخوردار است.	- نیاز به اطلاعات کامل در مورد هندسه و مواد موتور - به اطلاعات کامل لمینیت موتور نیاز دارد. - برای موتورهای از قبل نصب شده تقریبا غیر قابل استفاده است و فقط در مرحله طراحی موتور مناسب است.
روش رابطه تجربی	- دقت روش خوب است. - تحقیقات کافی در مورد این روش موجود است.	- این روش برای موتورهای با قدرت یکسان اما ساختار هندسی متفاوت قابل استفاده نیست.
روش مدار معادل	- دقت روش عالی است. - تحقیقات کافی در مورد این روش موجود است. - مناسب برای موتورهای از قبل نصب شده و مرحله طراحی موتور.	- نیاز به اندازه گیری مقاومت استاتور.

## ۵- نتایج

❖ لزوم جایگزین کردن موتور های پربازده ( با توجه به نرخ خوب بازگشت سرمایه آن ها ) در صنعت برق برای صرفه جویی در مصرف انرژی

### مراجع

- [1] E. Roshandel, A. Mahmoudi, S. Kahourzade, A. Yazdani, and G. M. Shafiullah, "Losses in Efficiency Maps of Electric Vehicles: An Overview," *Energies*, vol. 14, no. 22, 2021.
- [2] Mohammadi F, Mohammadi-Ivatloo B, Gharehpetian GB, Ali MH, Wei W, Erdinc O, Shirkhani M. Robust control strategies for microgrids: A review. *IEEE Systems Journal*. 2021 Jun 8.
- [3] Iranmehr H, Aazami R, Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi AR, Mohammadzadeh A, Mosavi AH, Guo W. Modeling the price of emergency power transmission lines in the reserve market due to the influence of renewable energies. *Frontiers in Energy Research*. 2022 Jan 13;9:792418.
- [4] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A. Control engineering solutions during epidemics: A review. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2021;39(2):97-106.
- [5] Danyali S, Aghaei O, Shirkhani M, Aazami R, Tavooosi J, Mohammadzadeh A, Mosavi A. A New Model Predictive Control Method for Buck-Boost Inverter-Based Photovoltaic Systems. *Sustainability*. 2022 Sep 19;14(18):11731.
- [6] I. Boldea, *Induction machines handbook: steady state modeling and performance*, 3rd ed., Boca Raton, USA: CRC Press, June. 2020.
- [7] H. Zhao, P. Li, G. Chen, Y. Wang, Y. Zhan, G. Xu, and X. Liu, "Nonintrusive efficiency estimation for large power and high voltage induction motors," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1-5 Oct. 2017.
- [8] Geravandi, M. "Stray Load Losses Determination Methods of Induction Motors-A Review", Department of electrical engineering University of Razi Kermanshah, Iran, 2022.
- [9] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A, Din SU, Mohammadzadeh A, Mobayen S. A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique. *Electric Power Systems Research*. 2022 Sep 1;210:108073.
- [10] Rotating Electrical Machines - Part2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for traction vehicles), IEC Std 60034-2-1, Sep. 2007.
- [11] J. Cheaytani, A. Benabou, A. Tounzi, M. Dessoude, L. Chevallier, and T. Henneron, "End-region leakage fluxes and losses analysis of cage

❖ در تعیین تلفات بار سرگردان با استفاده از استاندارد، علیرغم سادگی، این واقعیت وجود دارد که مقدار SLL در استانداردهای مختلف متفاوت است.

❖ روش رابطه تجربی با وجود سادگی و دقت بالا در تعیین SLL، برای موتورهایی با قدرت برابر اما ساختار هندسی متفاوت قابل استفاده نیست.

❖ استفاده از روش تحلیل اجزای محدود، به دلیل نیاز به جزئیات کامل موتور محدود است.

❖ با توجه به نکات گفته شده روش مدار معادل محدودیت های کمتری دارد و علاوه بر آن از آنجایی که این روش از دقت بالایی برخوردار است برای تعیین تلفات بار سرگردان در ماشین های القایی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۶- پیشنهادات

❖ علاوه بر تعیین SLL برای تخمین بازده موتورهای در حال کار، می بایست از آن برای فاز طراحی نیز استفاده کرد.

❖ در تعیین تلفات بار سرگردان ماشین های القایی، تاثیر شرایط کار موتور باید در نظر گرفته شود.

induction motors using 3-D finite-element method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, March. 2015.

[12] B. Herndler, P. Barendse, and M. A. Khan, "Considerations for improving the non-intrusive efficiency estimation of induction machines using the air gap torque method," 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Niagara Falls, ON, Canada, 15-18 May 2011.

[13] P. Pillay, V. Levin, P. Otaduy, and J. Kueck, "In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 13, no. 4, pp. 326-333, Dec 1998.

[14] El Ouanjli N, Derouich A, El Ghzizal A, Motahhir S, Chebabhi A, El Mourabit Y, Taoussi M. Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-a review. Protection and Control of Modern Power Systems. 2019 Dec;4(1):1-2.

[15] دانیالی، شیرخانی، دادوند، شکر بیگی، امیرمحمد. ارائه و بررسی یک مبدل افزایشدهنده با ورودی از سیستم خورشیدی. روش های محاسباتی در علوم DC-DC Aug 19. مهندسی. ۲۰۲۳.

## Fuzzy modeling of the lung with the aim of analyzing the effects caused by corona

Ali Rezavand <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Islamic Azad University of Mashhad, Mashhad, Iran

E-mails: [alirezavand384@gmail.com](mailto:alirezavand384@gmail.com)

\* Corresponding Author

### Abstract

Fuzzy logic and systems have a high ability to model and approximate functions. With the outbreak of the corona pandemic, the mathematical modeling of the respiratory flow in the human lung and the dynamics of respiratory aerosol particles that contain the SARS-CoV-2 virus have become more important. The present research is a meta-analysis of the research done by the author and others to examine and present the challenges and complexities of developing mathematical modeling of breathing and aerosols floating in breathing air. The intricacies of the problem are divided into two categories: physical and mathematical. In the physics section, the limitation in reconstructing the entire geometry of the solution due to the presence of a large number of bronchi and air bubbles and the lack of accuracy in imaging devices, individual differences in anatomy, physiological characteristics and mechanisms of the respiratory system, and the difference in the dynamic behavior of aerosols in different diameters have been stated. In the mathematical section, simple methods to solve partial differential equations and computational fluid dynamics approach are expressed as the most accurate common methods. Finally, considering the development of personalized medicine and the use of 3D models of people's bodies to help doctors make decisions, as well as the need for a quick solver for decision-making in the face of the Covid-19 pandemic, a new data-based but physics-informed method has been proposed.

### Keywords

Fuzzy system, computational intelligence, corona virus, system modeling and identification.

## مدل سازی فازی ریه با هدف تحلیل تاثیرات ناشی از کرونا

علی رضواند<sup>۱\*</sup>

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد مشهد، مشهد، ایران

ایمیل نویسنده: [alirezavand384@gmail.com](mailto:alirezavand384@gmail.com)

### چکیده

منطق و سیستم های فازی توانایی بالایی در مدل سازی و تقریب توابع دارند. با وقوع پاندمی کرونا مدل سازی ریاضیاتی جریان تنفسی در ریه انسان و دینامیک ذرات آبروسل تنفسی که حاوی ویروس SARS-CoV-2 هستند، اهمیت بیشتری یافته است. پژوهش حاضر فراتحلیلی از پژوهش های انجام شده نگارنده و دیگران است تا چالش ها و پیچیدگی های توسعه مدل سازی ریاضیاتی تنفس و آبروسل های شناور در هوای تنفسی را بررسی و ارائه نماید. پیچیدگی های مسئله به دو دسته فیزیکی و ریاضیاتی تقسیم می شود. در بخش فیزیک محدودیت در بازسازی کل هندسه حل به علت وجود تعداد زیاد برونش ها و حبابچه های هوا و فقدان دقت لازم در دستگاه های تصویربرداری، تفاوت های فردی در آناتومی، ویژگی های فیزیولوژیکی و مکانیزم های دستگاه تنفسی و تفاوت رفتار دینامیک آبروسل ها در قطرهای مختلف بیان شده است. در بخش ریاضیاتی روش های ساده تا حل معادلات دیفرانسیل جزئی و رهیافت دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان دقیق ترین روش راجع بیان می شود. در نهایت با توجه به توسعه پزشکی شخصی و استفاده از مدل های ۳ بعدی بدن افراد جهت کمک به تصمیم گیری پزشکان، همچنین نیاز به حل کننده سریع برای تصمیم سازی در مواجهه با پاندمی کوید-۱۹ یک روش جدید مبتنی بر داده اما مطلع از فیزیک پیشنهاد شده است.

**کلمات کلیدی:** سیستم فازی، هوش محاسباتی، ویروس کرونا، مدل سازی و شناسایی سیستم.

نام نویسنده مسئول: علی رضواند

ایمیل نویسنده مسئول: [alirezavand384@gmail.com](mailto:alirezavand384@gmail.com)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۷

### ۱- مقدمه

درک عملکرد تنفسی مورد استفاده قرار می گیرند، و در کنار افزایش وضوح تصویربرداری پزشکی و افزایش قابلیت تصویربرداری عملکردی، پیشرفت در دانش بیولوژیکی، تکنیک های ریاضی و قدرت محاسباتی نیز تکامل یافته اند [۷]. اگرچه داده های تصویربرداری دوزیمتری به روش بررسی بر روی جاندار<sup>۱</sup> نتایج مناسبی را در مورد رسوب کلی و منطقه ای ذرات آبروسل وارد شده به ریه در افراد سالم و مبتلا به آسم ارائه می کند، اما استفاده از این روش ها به دلیل هزینه و نیاز به قرار گرفتن افراد در معرض پرتوهای یونیزه با محدودیت مواجه هستند [۸]. ذرات آبروسل می تواند شامل ذرات تنفسی بیرون آمده از ریه یک فرد سالم یا بیمار، ذرات استنشاقی پودرهای دارویی یا ذرات آلودگی هوا مانند PM<sub>2.5</sub> به معنای ذرات با قطر ریزتر از ۲.۵ میکرومتر یا PM<sub>10</sub> برای ذرات با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر و یا انواع بایوآبروسل ها باشد. کلمن و همکاران (۱۴۰۰) با مطالعه بر روی ۲۲ بیمار کرونایی، در سه حالت ۳۰ دقیقه تنفس، ۱۵ دقیقه تکلم و ۱۵ دقیقه آواز خواندن، میزان ویروس SARS-CoV-2 موجود در ذرات آبروسل تنفسی آن ها را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد ۸۵ درصد از کل بار ویروسی در آبروسل های ریز (قطر ۵۲ میکرومتر) در مقایسه با آبروسل های درشت (قطر ۵ میکرومتر) منتشر می شود [۹]. از این رو مدل سازی ریاضیاتی و پیش بینی میزان تاثیر و نوع پخش ویروس SARS-CoV-2 در ذرات آبروسل تنفسی خارج شده از دهان و بینی بیماران بویژه برای شهرهای با سابقه آلودگی هوا همچون کلان شهر تهران بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله روش های مختلف مدل سازی بیان شده و بصورت ویژه چالش ها و

براساس آمار سازمان بهداشت جهانی در زمان انجام این پژوهش بیش از ۶ میلیون ایرانی به ویروس SARS-CoV-2 عامل بیماری کوید-۱۹ یا همان کرونا مبتلا شده اند و از این افراد بیش از ۱۲۹ هزار نفر در مدت دو سال گذشته فوت کرده اند. این آمار برای جهان ۲۶۳ میلیون نفر مبتلا بوده است با بیش از ۵ میلیون و دویست هزار نفر فوتی. این پاندمی در آمریکا تا کنون بیش از ۴۸ میلیون نفر مبتلا و حدود ۷۷۸ هزار نفر فوتی داشته است [۱]. آبروسل های حاوی این ویروس می توانند توسط یک فرد آلوده از طریق تنفس، صحبت کردن، سرفه و یا عطسه تولید شوند که در محیط پخش و منتقل می شوند [۲]. ذرات با قطر آبرودینامیکی در محدوده کمتر از ۱ تا ۱۰ میکرومتر با RNA ویروس SARS-CoV-2 می توانند از طریق دهان یا بینی وارد دستگاه تنفسی شوند [۳]. این ویروس می تواند برای ساعت ها در آبروسل ها فعال باقی می ماند [۴]. با توجه به گسترش سریع ویروس بیماری کوید-۱۹، نیاز فوری به مطالعه امکان انتقال آن از طریق هوا و تأثیر آن بر ریه که به عنوان ارگان اصلی بدن که توسط ویروس مورد حمله قرار می گیرد، وجود دارد [۵]. با بیش از ۱۰ هزار لیتر هوای پردازش شده در روز، ریه ها محل اصلی تبادل بدن با محیط هستند [۶]. بررسی مکانیزم های تنفس و دینامیک ذرات آبروسل ورودی به آن پیش از بروز پاندمی کرونا نیز حائز اهمیت بوده است. فرای شیوع کوید-۱۹، بیماری تنفسی یک مشکل مهم در سراسر جهان است. آسیب شناسی در راه های هوایی فوقانی و ریه برای تشخیص و درمان بسیار دشوار است، زیرا پاسخ به بیماری اغلب در بین بیماران متفاوت است. مدل های محاسباتی مدت هاست که برای کمک به

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_T) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

در این معادلات  $u$  معرف سرعت،  $p$  معرف فشار،  $\rho$  چگالی هوای تنفسی،  $v$  لزجت مولکولی سینماتیکی هوا و  $v_T$  لزجت گردابه‌ای آشفتنگی جریان می‌باشند. تفاوت ها در حل با انواع مدل‌سازی آشفتنگی دو معادله ای در سمت راست ریه بیشتر از سمت چپ مشخص می‌شود. حیدری نژاد و دیگران (۱۳۹۸) نشان داده اند که مدل‌سازی دو معادله‌ای برای ناحیه نای و دو نسل بعدی بویژه در نرخ های تنفسی ۶۰ میلی لیتر در دقیقه و بیشتر مناسب نبوده و بهتر است از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مقیاس استفاده شود که متعاقباً معادلات پیچیده‌تری را حل کرده و از این رو حل مسئله با آن نسبت به روش‌های دو معادله‌ای، زمان بیشتری نیاز دارد.

از پیچیدگی های دیگر این مسئله آنست که برای دقت بالاتر لازم است تا هندسه حل، براساس الاستیسیته بافت ریه، در دم و بازدم، منبسط و منقبض شود. این خود بر پیچیدگی شرایط مرزی حل و نوع شبکه بندی می افزاید. علاوه بر تمامی اینها یک حل بسیار دقیق باید چند مقیاسی باشد تا حرکت نایژه ها و مکانیزم دفاعی و پاک کنندگی مایع مخاطی موکوس در جداره راه های هوایی بالایی و بخصوص در نای مدل‌سازی شود. با در نظر گرفتن ذرات آبروسل معلق در هوا و نیز لایه نازک مایع مخاطی روی جداره ها در کنار حل جریان هوای تنفسی، یک پدیده چند فازی ایجاد می‌شود که پیچیدگی بالایی خواهد داشت. همچنین حبابچه های تبادل گازی از نسل ششم به بعد اطراف برونش ها در تعداد قابل توجه وجود دارند. براساس بهترین دانش نگارنده، تاکنون در یک پژوهش تمام موارد بیان شده با هم برای هندسه ریه واقعی انسان مدل‌سازی و حل عددی نشده است. حل عددی جریان سیال مبتنی بر معادلات ناویر استوکس را دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) گویند که دقیق ترین پیش بینی خط مسیر جریان و رسوب ذرات محلی است. از این رو اگرچه با حل عددی در دینامیک سیالات محاسباتی می توان یک یا چند پیچیدگی دستگاه تنفسی و ورود ذرات حاوی ویروس را در آن مدل‌سازی کرد اما همچنان حل یکباره و لحاظ تمامی شرایط به لحاظ ترم های هزینه ای در زمان و پردازنده ها مقرون بصره نیست. از این رو بیشتر مدل‌سازی ها در هندسه بازسازی شده از تصاویر سی تی اسکن یک ناحیه از ریه انجام شده است. با توجه به اینکه دینامیک سیالات محاسباتی، دسته ای از معادلات دیفرانسیل جزئی را در شبکه ای از سلول ها منطبق شده بر هندسه فیزیکی مسئله حل می کند، پس توانایی درک جزئیات هندسه ناسل بینی، دهان، فارینکس، لارینکس، نای، برونش ها و حبابچه ها را دارد. این مسئله برتری قابل توجهی برای این روش نسبت به سایر روش‌های ریاضیاتی بوجود آورده است. دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان شبیه‌سازی واقعی دینامیک ریه-ذرات استنشاقی محبوب‌ترین مدل‌سازی ریاضی است که از محاسبات تکراری برای پیش‌بینی نرخ نشست ذرات استنشاقی استفاده می‌کند. برای حل این معادلات دیفرانسیل جزئی، این رهیافت فرض می‌کند که هوای تنفسی یک محیط پیوسته است که می‌تواند به طور پیوسته به عناصر یا حجم‌های گسسته تقسیم شود که مجموعاً شبکه یا مش نامیده می‌شوند. در هر سلول، معادلات ناویر-استوکس به معادلات جبری قابل حل تبدیل می‌شوند. محاسبات با کارایی بالا جایی است که از ابررایانه‌ها و تکنیک‌های پردازش موازی برای انجام محاسبات مورد نیاز برای شبیه‌سازی تعامل جریان هوا و ذرات با تعریف شرایط مرزی ورودی، خروجی و دیوارها در

محدودیت‌های روش دینامیک سیالات محاسباتی مبتنی بر پژوهش‌های قبلی انجام شده توسط نگارنده و دیگران بررسی می‌شود.

**۲- روش‌های مدل‌سازی جریان تنفسی و دینامیک آبروسل های حاوی ویروس**  
مدل‌سازی دستگاه تنفسی به دو روش اصلی تقسیم می‌شود. مدل‌سازی ریاضی با تکنیک‌های سنتی که شامل مدل‌های آماری- فرمول های ساده مبتنی بر تست های تجربی می‌شود و رویکرد دیگر روش حل عددی مبتنی بر فیزیک مسئله است. این حل علاوه بر مدل‌سازی ریاضیاتی حرکت سیال، حل دقیق‌تری نیز برای توصیف کمی رسوب ذرات آبروسل بر اساس تفسیر فیزیکی ارائه می‌کند.

## ۲-۱ مدل سازی آماری

به عنوان یک رویکرد پاسخ سریع، بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا داده‌های نرخ کل نشست آبروسل را در یک منحنی واحد در یک مدل‌سازی آماری ارائه کنند. بسیاری از این مطالعات بر توسعه یک فرمول کلی (جهانی) جدید یا نشان دادن ضریب همبستگی بر اساس داده‌های تجربی مانند استفاده از رگرسیون خطی و غیرخطی، بیان جبری و فرمول لگاریتمی متمرکز شده‌اند [۱۰]. مروری جامع بر روی تحقیقات بر روی روش برازش منحنی توسط مارتین و فینلای (۱۳۸۵) در موضوع بحث انجام شده است [۱۱]. به طور گسترده پذیرفته شده است که رسوب ذرات در دستگاه تنفسی به دلیل سه مکانیسم اصلی رسوب رخ می‌دهد: اینرسی و اختلاط آشفته، رسوب گرانشی، و انتشار براونی. هر مکانیزم رسوب روند خاص خود را دارد تا در کدام بخش از راه‌های هوایی تنفسی دارای نشست مؤثرتری باشد. با توجه به آنکه فیزیک مسئله در هر یک از این مکانیزم‌ها با دیگری متفاوت است از این رو بیشتر تلاش‌ها بر محاسبه همبستگی تجربی هر مکانیزم رسوب‌گذاری به‌طور جداگانه متمرکز شده است. تنظیم یک فرمول خاص که تمامی شرایط را پوشش می‌دهد، دقت را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. مطالعات آلودگی هوا، همبستگی منفی بین مدل‌های آماری، که عمدتاً مبتنی بر رگرسیون خطی هستند، و پارامترهای مختلف مانند غلظت های مختلف ذرات معلق را در نظر می‌گیرند، نشان داده است. بنابراین مدل‌سازی با این روش آماری مستلزم تولید بسیاری از فرمول های تنظیم شده برای شرایط خاص و ویژه هر یک است.

## ۲-۲ مدل‌سازی ریاضیاتی مبتنی بر فیزیک مسئله

در واقع، دست یافتن به یک توصیف ریاضی از حرکت جریان هوای تنفسی کار دشواری است، زیرا این پدیده فیزیکی غیرخطی با مجهولات زیاد دارد و مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی کوپل شده به نام معادلات ناویر- استوکس در مکانیک سیالات را در بر می‌گیرد. مجهولات اصلی چگالی، جرم، فشار، سرعت و دما هستند. علاوه بر این، معادلات دینامیک ذرات استنشاقی نیز بصورت کوپل با جریان تنفسی یا بصورت یک فاز مجزا، بایستی در نظر گرفته شود. نیروهای فیزیکی زیادی مانند نیروی برهمکنش ذرات، نیروی برآونی، نیروی درگ، نیروی برآی سافمن، نحوه برخورد یا جذب ذرات به جداره نای و برونش ها، بسته به سایز و شکل ذرات جهت واقعی تر شدن مدل‌سازی و شبیه‌سازی ها بایستی به مدل ریاضیاتی درآید. ریه در حدود ۶۵ هزار لوله برونشلی دارد لذا مدل‌سازی این تعداد زیاد با لحاظ شرایط فیزیکی مسئله مقدر نیست. از سوی دیگر هوای تنفسی در حالت فعالیت بدنی یا ورزش کردن در حفره بینی و ناحیه فوقانی دستگاه تنفسی جریانی آشفته داشته و به تدریج آرام خواهد شد. برای مدل‌سازی بهتر لازم دارد تا معادلات آشفتنگی و ناپایداری های جریان نیز به مدل‌سازی افزوده شود. معمولاً برای مدل‌سازی آشفتنگی از مدل‌سازی های جبری تا مدل‌های دو معادله ای RANS معروف به مدل‌های متوسط‌گیری زمانی ناویر استوکس و یا شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مقیاس استفاده می‌شود. در این حالت معادلات پیوستگی و ناویر استوکس تراکم ناپذیر بصورت زیر می‌باشد:

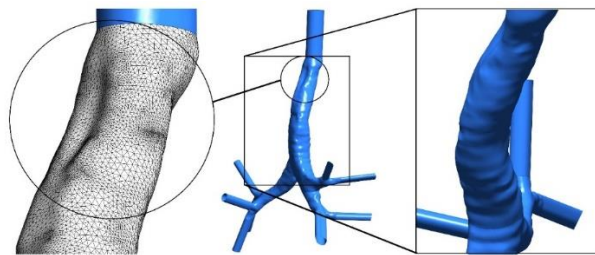
در ریه انسان تمرکز داشته اند. تریسی و همکاران چالش‌های بکارگیری تکنیک‌های یادگیری ماشین را در یک محیط دینامیک سیال مورد بحث قرار داد.

اگرچه تحقیقات در این زمینه هنوز در مراحل مقدماتی هستند، اما به نظر می‌رسد رویکردهای داده‌کاوی و روش‌های یادگیری ماشین، ابزار مناسبی باشند. شبکه‌های عصبی همیشه یکی از جذاب‌ترین مدل‌های یادگیری ماشین بوده اند. در صورت وجود غیرخطی‌ها، شبکه‌های عصبی مصنوعی بهتر از سایر مدل‌های ریاضی مبتنی بر نتایج تجربی مانند مدل‌های تجربی، مدل‌های قطعی و مدل‌های تصادفی هستند، زیرا شبکه‌های عصبی مصنوعی برخلاف روش‌های رگرسیون خطی که نیاز به مدلسازی صریح دارند، غیرخطی‌ها را به‌طور خودکار مدلسازی می‌کنند. مقاله حاضر یک روش مدلسازی مبتنی بر داده جدید را با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی برای جلوگیری از رویکرد محاسباتی تکراری دینامیک سیالات محاسباتی و یک پیش‌بینی‌کننده سریع مکمل برای روش‌های تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی پیشنهاد می‌کند در حالی که قابلیت بیشتری نسبت به مدلسازی آماری دارد. علاوه بر این، کد پیش‌بینی‌کننده شبکه عصبی مصنوعی، برای کاربران غیرمتخصص مانند متخصصان پزشکی و آمارگیران سلامت جذاب خواهد بود. این مدل‌ها اغلب به عنوان یک سازش خوب بین سادگی و اثربخشی در نظر گرفته می‌شوند. در این حالت، نیاز به ترم‌های پردازشی رایانه‌ای و زمان در مقایسه با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بسیار کاهش می‌یابد.

### ۳- مدلسازی براساس بانک داده‌های ترکیبی

رهیافت مبتنی بر تخمین براساس شبکه‌های عصبی مصنوعی، می‌تواند از انواع مختلف این نوع از شبکه‌ها استفاده نماید. طبق مطالعات انجام شده در شبکه عصبی مصنوعی ELM نسبت به سایر روش‌های مرسوم، نودهای پنهان، نیاز به تنظیم شدن ندارند و به تصادف انتخاب می‌شوند. مسئله‌ی دیگر که بزرگترین چالش در مدلسازی مبتنی بر داده در مسئله تنفس و ورود ذرات به ریه می‌باشد، کمبود داده‌ها است. رهیافت شبکه‌های عصبی مصنوعی به شدت به تعداد و ابعاد داده‌ها وابسته هستند. این مشکل زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که حوزه مسائل پزشکی بررسی شود و امکان انجام گسترده تست‌های تجربی بر روی ریه واقعی یک فرد زنده ممکن نیست. هزینه تست‌های تجربی بر روی مدل‌های ساخته شده نیز باعث شده است داده‌های تجربی در این زمینه اندک باشد همچنین امکان مشاهده برخی ویژگی‌های جریان در تست‌های تجربی به سختی ممکن است. از این رو استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان مکمل بانک داده ارائه شده است. همچنین می‌تواند به گردآوری داده‌های شرایط مختلف بیشتری جهت استفاده در بانک داده‌ها منجر شود و دامنه تخمین‌ها را بیشتر و دقت را بالاتر ببرد. با این حال مدلسازی از ریه برای تست‌های تجربی و نیز مدلسازی ریاضیاتی از روابط فیزیکی در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی خود موجب ورود خطا به داده‌ها می‌گردد و این خطا در مدلسازی براساس داده‌ها نیز وجود خواهد داشت. پس افزایش دقت تست‌های تجربی یا شبیه‌سازی‌های مکانیک سیالات موجب کاهش خطای نتایج مدلسازی براساس داده‌های آنها خواهد شد. در یک مطالعه بر روی انواع روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی، نشان داده است که با خطای کمتر از ۵ درصد و در حدود ۲ درصد در استفاده از یک بانک داده متشکل از داده‌های ۱۳۵ تست می‌توان این رهیافت را در مسئله تخمین میزان نشست ذرات آبروسل در ریه انسان بکار برد. راه حل ارائه شده یک حل‌کننده سریع است که امکان استفاده کاربران پزشکی و عمومی را فارغ از نیاز به دانش پیچیده شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی ممکن می‌سازد. همچنین بر خلاف روش‌های آماری بحث شده، براساس بانک داده حل‌ها قبلی و نیز

بیش از چند میلیون سلول شبکه‌ای استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، روزبھانی و همکاران (۱۳۹۷) در یک مطالعه بر روی شبیه‌سازی جریان تنفسی در هندسه واقعی بازسازی شده از تصاویر سی تی اسکن قابلیت روش دینامیک سیالات محاسباتی و لزوم توجه به مدلسازی هندسی پستی و بلندی‌های غضروفی و جداره‌ها را نشان داده اند.



شکل ۱- نمایش تطبیق ریزی سلول‌های شبکه در مدلسازی با دقت ناهمواری

های هندسی در مدلسازی به روش دینامیک سیالات محاسباتی آزمایش‌های تجربی همواره برای تأیید نتایج مدلسازی‌های آماری یا دینامیک سیالات محاسباتی ضروری هستند. دو پارامتر تأثیرگذار دیگر که زمان حل براساس دینامیک سیالات محاسباتی را زیاد می‌کند، یکی بازه‌های زمانی حل معادلات در هر یک از سلول‌ها است و دیگر اندازه ریزی شبکه. این دو پارامتر در عدد کوانت تعریف می‌شوند. به هر صورت برای شبیه‌سازی گردابه‌های کنار دیواره‌ها لازم است تا در بازه‌های هر یک ده تا یک صد هزارم زمان و حتی در مواردی یک در میلیون ثانیه معادلات حل شوند و نیز برای انطباق مناسب شبکه با جزئیات پستی و بلندی‌ها و فرورفتگی‌های حفره بینی و دهان و نای و غضروف‌ها و مشخصات فردی جداره برونش‌های هر فرد، لازم است تا ابعاد سلول‌ها نیز بخوبی ریز باشد که از چند صد هزار تا چند ده میلیون سلول لازم دارد. با مقایسه در ترم‌های تنش برشی دیواره، سرعت و نیز پروفیل سرعت نشان داده اند که وجود غضروف‌ها برای تحلیل جریان نای بسیار با اهمیت بوده و همچنین این تأثیر تا برونش‌های نسل دو به‌طور قابل چشمگیری وجود دارد؛ اگرچه به واسطه ایجاد گردابه‌ها و جدایش جریان در نای، انرژی آن و در نتیجه سرعتش در برخی نواحی برونش‌های نسل سوم در مقایسه با مدل ساده و بدون پستی و بلندی‌های غضروفی جداره نای، کاهش می‌یابد.

حتی با لحاظ این موارد، هنوز نزدیک به حل مناسب برای شبیه‌سازی متابولیسمی بر روی التهاب‌های احتمالی در نای نشده ایم. حل دینامیک سیالات محاسباتی تنها برای ۴ ثانیه تنفس، با شبکه ریز و حل گردابه‌های بزرگ مقیاس، از یک ماه تا چهار ماه طول می‌کشد. این فقط برای تست یکی از شرایط محیطی یا اندازه ذرات یا غلظت آنها است. کاربر جهت حل معادلات ناوبر استوکس در دینامیک سیالات محاسباتی به دانش تخصصی و پیش‌نیازهای زیادی از علم مهندسی مکانیک سیالات نیاز دارد. در حالی که در بسیاری از موارد این مدلسازی‌ها در سایر رشته‌ها مانند داروسازی و پزشکی، هواشناسی، آمار، مهندسی بهداشت، تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری حوزه سلامت و آلودگی هوا نیز ضرورت می‌یابد.

### ۲-۳ مدلسازی مبتنی بر داده به عنوان یک رویکرد جدید

اخیراً، پیشرفت‌های سریع در قدرت محاسباتی نیز به افزایش در دسترس بودن مجموعه داده‌های بزرگ از شبیه‌سازی‌های مکانیک سیالات کمک کرده است. بنابراین، علاقه به استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین در زمینه شبیه‌سازی جریان افزایش یافته است. یادگیری ماشینی شاخه‌ای از هوش مصنوعی است که از انواع تکنیک‌های آماری، احتمالی و بهینه‌سازی استفاده می‌کند که به رایانه‌ها اجازه می‌دهد تا از نمونه‌های گذشته یاد بگیرند و الگوهای دشوار را از مجموعه داده‌های بزرگ، یا پیچیده تشخیص دهند. مطالعات بسیار کمی وجود دارد که بر کاربرد تکنیک‌های داده‌کاوی در دینامیک و نشست ذرات آبروسل

۵- نتیجه گیری

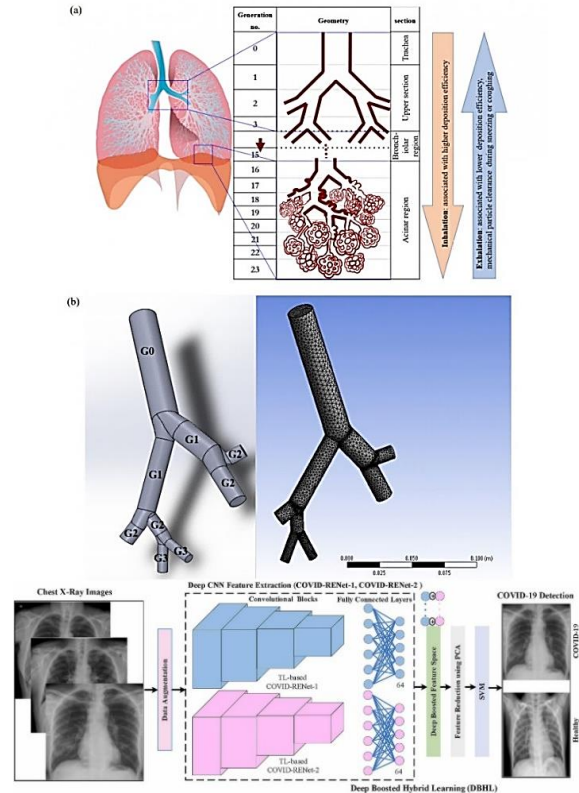
در این مقاله ابتدا اهمیت مسئله مدل‌سازی جریان تنفسی و آبروسل های حامل ویروس بیان شد. در گام بعد دو روش عمده مدل‌سازی ریاضیاتی آن بررسی شد. روش‌های آماری و ارائه معادلات ساده جبری مبتنی بر داده‌های تجربی و آزمایشگاهی امکان ارائه اطلاعات و پیش بینی نشست ذرات در ناحیه های محلی دستگاه تنفسی را ندارند. همچنین برای هر حالات نیازمند مدل‌سازی و ارائه فرمول جدید هستند. روش مدل‌سازی با معادلات دیفرانسیل جزئی برآمده از فیزیک مسئله در دینامیک سیالات محاسباتی بهترین رهیافت کلی جهت انواع تحلیل این مسئله می‌باشد که آن نیز با محدودیت در زمان و ترم های پردازشی مواجه است و از سوی دیگر نیازمند دانش تخصصی بالایی است حال آنکه جهت برآورد پیش بینی ها در مسئله آلودگی به ذرات ویروس استنشاقی یا ذرات آلودگی هوا نیازمند حلگرهای سریع و مقرون به صرفه جهت بهره‌برداری افراد بدون دانش تخصصی در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی است. در نهایت بعنوان یک نوآوری ارائه شده بیان شد که تنها راه حلی که امکان استفاده از تحقیقات جدا از هم انجام شده در یک حوزه مشخص از بیومکانیک مانند مسئله نشست ذرات آبروسل حاوی ویروس در ریه انسان را میسر می کند مدل‌سازی مبتنی بر داده‌ها است که علاوه بر ایجاد امکان بهره‌برداری از داده‌های نتایج پژوهش های قبلی برای شرایط جدید، اما نسبتا مشابه با شرایط تست شده قبلی، در کمترین زمان و با احتیاج کمتر به دانش تخصصی، پاسخی با دقت مشابه راه‌حل‌های دینامیک سیالات محاسباتی بدست می‌دهد. این روش امکان بهره‌برداری از قابلیت های هوش مصنوعی در شناسایی ریسک‌های حوزه سلامت را از شبیه‌سازی های فردی به شبیه‌سازی های جمعی نیز میسر می‌سازد.

مراجع

[1] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A. Control engineering solutions during epidemics: A review. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2021;39(2):97-106.  
 [2] Iranmehr H, Aazami R, Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi AR, Mohammadzadeh A, Mosavi AH, Guo W. Modeling the price of emergency power transmission lines in the reserve market due to the influence of renewable energies. *Frontiers in Energy Research*. 2022 Jan 13;9:792418.  
 [3] Tavooosi J, Shirkhani M, Abdali A, Mohammadzadeh A, Nazari M, Mobayen S, Asad JH, Bartoszewicz A. A new general type-2 fuzzy predictive scheme for PID tuning. *Applied Sciences*. 2021 Nov 5;11(21):10392.  
 [4] Kumar D, Malviya R, Sharma PK. Corona virus: a review of COVID-19. *EJMO*. 2020 Mar 4;4(1):8-25.  
 [5] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A, Din SU, Mohammadzadeh A, Mobayen S. A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique. *Electric Power Systems Research*. 2022 Sep 1;210:108073.  
 [6] ایاسه، سینا. ارائه روشی نو جهت مدل‌سازی ریاضی زمانبندی کلاس های دانشگاهی با استفاده از منطق فازی. *روش‌های محاسباتی در علوم مهندسی*. ۲۰۲۳ Aug 21.  
 [7] Guo X, Shirkhani M, Ahmed EM. Machine-Learning-Based improved smith predictive control for MIMO processes. *Mathematics*. 2022 Oct 9;10(19):3696.  
 [8] Liu Y, Eckert CM, Earl C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*. 2020 Dec 15;161:113738.  
 [9] Tavooosi J, Suratgar AA, Menhaj MB. Nonlinear system identification based on a self-organizing type-2 fuzzy RBFN. *Engineering applications of artificial intelligence*. 2016 Sep 1;54:26-38.  
 [10] Tavooosi J, Mohammadzadeh A, Pahlevanzadeh B, Kasmani MB, Band SS, Safdar R, Mosavi AH. A machine learning approach for active/reactive power control of grid-connected doubly-fed induction generators. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022 Mar 1;13(2):101564.  
 [11] Tavooosi J, Suratgar AA, Menhaj MB. Stability analysis of recurrent type-2 TSK fuzzy systems with nonlinear consequent part. *Neural Computing and Applications*. 2017 Jan;28:47-56.

داده‌های تست های تجربی در مدل‌های آزمایشگاهی، امکان پاسخ‌دهی در حالات متنوع فراوانی را دارد.

۴- مدل‌سازی فازی ریه



شکل ۲. مدل‌سازی فازی

# The Spectral Characterization of n-Generalized Skew Projections

Seyedeh Sara Karimizad <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Basic Sciences, Ilam University, Ilam, Iran

E-mail addresses: [s.karimizad@ilam.ac.ir](mailto:s.karimizad@ilam.ac.ir)

\* Corresponding author

Received: 19/11/2023, Revised: 11/12/2023, Accepted: 19/12/2023.

## Abstract

The discussion of n-generalized is a fundamental challenge in mathematical discussions. Considering that a lot of attention has been paid to this discussion in recent years and studies, it is clear that there are still many and various challenges in this field. In this paper we investigate and presented n-generalized skew projection for n=2,3 in Banach algebras. All the equations are given completely from the beginning and the basis, and the full explanation of each of the formulas along with their proof is presented in the paper. Also, all relevant issues have been fully discussed and discussed in the paper. Necessary and sufficient conditions for a linear combination of two n-generalized skew projection for n=2,3 to be a n-generalized skew projection for n= 2,3 are developed. Our results generalize results obtained for bounded linear operators on Hibert spaces. Also, all relevant issues have been fully discussed and discussed in the article.

## Keywords

n-Generalized, skew projection, Mathematics

## 1. Introduction and preliminaries

A Throughout this paper,  $\beta$  will denote a complex unital Banach algebra with unit 1. If  $\chi \in \beta$  then we denote the spectrum and the spectral radius of  $\chi$  by  $\sigma(\chi)$  and  $\Gamma(\chi)$  respectively.  $H(\beta)$  denotes the set of hermitian elements of  $\beta$ . An element is said to be hermitian if  $\|\exp(iah)\| = 1$  for all  $\alpha \in \square$ . See [1, page 46]. For given  $\alpha \in \square$  and  $h \in H(\beta)$  symbols  $\bar{\alpha}, h^*$  will mean the conjugate of  $\alpha$  and the adjoint of h. It is well- known that a bounded linear operator T on a Hilbert space is hermitian if and only if  $T=T^*$ . If  $n \in \square$  and  $n>1$ , a n-generalized skew projection is an element  $a \in M(\beta)$  such that  $an=-a^*$ , where

$$(1.1) \quad M(\beta) = \{h + ik : h, k \in H(\beta)\}$$

For properties and characterizations of generalized skew projection operators see [2,3]. The purpose of the present paper is to consider the similar problem.

For n-generalized skew projections. Let  $\beta = \square^3$  with pointwise multiplication and let  $p: \beta \rightarrow [0, \infty)$  be defined by

$$P(\alpha, \beta, \gamma) = \sup \{ |\lambda^{-1}\alpha + \beta + \lambda\gamma| : \lambda \in \square, |\lambda| = 1 \} \quad \forall (\alpha, \beta, \gamma) \in \beta.$$

Define the norm  $\|\cdot\|$  on  $\beta$  by  $\|\chi\| = \sup\{p(y, \chi) : y \in \beta, p(y) = 1\}$

Then  $(\beta, \|\cdot\|)$  is a complex commutative Banach algebra with unit  $1 = (1, 1, 1)$ .

Since  $H(\beta) \cap iH(\beta) = \{0\}$ , hence each element of  $M(\beta)$  has a unique representation of the form  $h+ik$  with  $h, k \in H(\beta)$ . Therefore we may define a linear involution  $*$  on  $H(\beta)$  by  $(h+ik)^* = h-ik$ .

We say that  $\alpha \in M(\beta)$  is normal if  $aa^* = a^*a$ . It is easy to see that a element  $a = h+ik \in M(\beta)$  for some  $h, k \in H(\beta)$  is normal if and only if  $hk = kh$ . We collect the basic propositions of  $H(\beta)$  (for proofs see [2, pages 47, 53, and 54]).

Proposition 1.1.

$H(\beta)$  is closed real subspace of  $\beta$  and  $H(\beta) \cap iH(\beta) = \{0\}$ .

If  $h, k \in H(\beta)$ , then  $i(hk-kh) \in H(\beta)$ ,  $\sigma(h) \subseteq \mathbb{R}$  and  $r(h) = \|h\|$ .

Proposition 1.2. Suppose that  $a = h + ik \in M(\beta)$  ( $h, k \in H(\beta)$ ) is normal. Then;  $\sigma(\chi) = \{\chi(x) : \chi \in \Delta_a\}$  for all  $x \in \beta(a)$ ;

$$\chi(h), \chi(k) \in \mathbb{R} \text{ for all } \chi \in \Delta_a;$$

$$\chi(a^*) = \overline{\chi(a)} \text{ for all } \chi \in \Delta_a,$$

and

$$\sigma(a^*) = \{\bar{\lambda} : \lambda \in \sigma(a)\};$$

if  $x, y \in \beta(a)$ , then  $\sigma(x + y) \subseteq \sigma(x) + \sigma(y)$ ,  $\sigma(xy) \subseteq \sigma(x)\sigma(y)$  if and only if  $ab = ba = 0$ .

Theorem 1.3. Let that  $a = h + ik \in M(\mathbb{B})$  is a 3-generalized skew projection. Then;

(1)  $a$  is normal.

(2)  $\sigma(a) \subseteq \{\lambda \in \mathbb{C} : \lambda^4 = -1\} \cup \{0\}$

(3) Moreover if  $hk \in H(\beta)$ , then

$$(a^*)^3 = -a \text{ and } a^9 = a.$$

Proof.

Since  $a^3 = -a^*$  hence  $aa^* = a(-a^3) = (-a^3)a = a^*a$ .

**n-GENERALIZED SKEW PROJECTIONS**

Let  $\lambda \in \sigma(a)$ , then  $\lambda = \chi(a)$  for some  $\chi \in \Delta_a$ ,

hence by proposition 1.3;

$$\bar{\lambda} = \chi(a^*) = \chi(-a^3) = -\chi(a)^3 = -\lambda^3. \text{ If } \lambda \neq 0, \text{ then } |\lambda| = 1$$

and  $\lambda^4 = \lambda\lambda^3 = \lambda(-\bar{\lambda}) = -\lambda\bar{\lambda} = -1.$

From  $a^3 = -a^*$  then we have;  $h^3 + h - 3hk^2 = i(k^3 + k - 3h^2k)h^3 + h - 3hk^2 = 0 \Rightarrow h = 3hk^2 - h^3, k^3 + k - 3h^2k = 0 \Rightarrow k = -k^3 + 3h^2k$ . Proposition 1.3 (4) and proposition 1.1.(2) show that  $\sigma(h^3 - 3hk^2 + h), \sigma(k^3 + k - 3h^2k) \subseteq \mathbb{R}$ . Hence

$$\sigma(k^3 + k - 3h^2k) \subseteq \mathbb{R} \cap i\mathbb{R} = \{0\}. \text{ Thus } r(k^3 + k - 3h^2k) = 0. \text{ Since } hk \in H(\beta), k^3 + k - 3h^2k \in H(A).$$

Now use proposition 1.1 (2) to get  $k = 3h^2k - k^3$ . Hence  $-h^3 + 3hk^2 = h$  therefore  $(a^*)^3 = (h - ik)^3 = h^3 - 3h^2ik + 3h(ik)^2 - i^3k^3 = h^3 - 3hk^2k - 3hk^2 + ik^3 = h^3 - 3hk^2 + i(-3h^2k + k^3) = -h - ik = -a$  and  $a^9 = (a^3)^3 = (-a^*)^3 = -(-a) = a$ .

Theorem 1.4 Suppose  $a = h + ik \in M(\beta)$ , and Suppose that

$$\sigma(a) \subseteq \{\lambda \in \mathbb{C} : \lambda^4 = -1\} \cup \{0\}$$

Then we have

(i) If  $a$  is normal, then  $r(a^3 + a^*) = 0$ .

(ii) If  $hk, h^2, k^2 \in H(\beta)$ , Then  $a$  is 3-generalized skew projection.

Proof. Let  $b = a^3 + a^*$  (1) Since  $a$  is normal,  $hk = kh$ , thus

$b \in B(a)$ . Take  $\lambda \in \sigma(b)$ . Then  $\lambda =$

$$\chi(b) = \chi(a^2) + \chi(a^*) \text{ for some } \chi \in \Delta_a.$$

Case:  $\chi(a) = 0$ . Then we have  $\lambda = 0$ .

Case 2:

$$\chi(a) \neq 0. \text{ Since } \chi(a) \in \sigma(a), \chi(a)^4 = -1 \text{ that}$$

it follows that

$$\lambda\chi(a) = \chi(a)^4 + \chi(\bar{a})\chi(a) = -1 + 1 = 0 \text{ and so } \lambda$$

$= 0$ . Hence  $\sigma(b) = \{0\}$ . (2) Since  $h, k, h^2, hk$  and  $k^2$  are all hermitian, it follows from [1, theorem 2.14] that  $hk = kh$ .

Thus  $a$  is normal. From  $b = a^3 + a^* = h^3 + 3k^2h + 3kh^2i + k^3 - (h - ik)$  we get  $i(3k^2h + 3kh^2 - k) = b - (h^3 - k^3 - h)$ . By proposition 1.1 and proposition 1.3

$$\sigma(3k^2h + 3hk^2 - k) \subseteq \mathbb{R} \cap i\mathbb{R} = \{0\}. \text{ Since } 3k^2h + 3hk^2 - k \in H(A), 3k^2h + 3hk^2 - k = 0,$$

$b = h^3 - k^3 - h \in H(A)$ . Since by (1),  $r(b) = 0$ , we conclude that  $b = 0$ , hence  $a^3 = -a^*$ .

Theorem 1.5. Let  $a, b \in M(\mathbb{B}) (a + b \neq 0)$  be 3-generalized skew. Then  $a + b$  is a 3-generalized skew

projection if and only if  $ab = ba = 0$ .

Proof. We have  $(a + b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3 = -a^* + 3a^2b + 3ab^2 - b^*$ . If  $ab = ba = 0$  then  $a^2b = a(ab) = 0, ab^2 = (ab)b = 0$  then  $(a + b)^3 = -a^* - b^* = -(a^* + b^*) = -(a + b)^*$  hence  $a + b$  is a 3-generalized skew projection. Assume that  $(a + b)^3 = -(a + b)^*$ . Then  $a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3 = -a^* - b^*$  hence  $a^2b + ab^2 = 0, ab(a + b) = 0$  therefore  $ab = 0$  then  $ab = ba = 0$ .

Theorem 1.6. Let  $a, b \in M(\beta)$  be 3-generalized skew projection and  $a = h + ik (h, k, hk \in H(\beta))$ . Then  $b - a$  is a 3-generalized skew projection if and only if  $a^2b = ab^2$ .

Proof. First assume that  $ab = ba, a^2b = ab^2$  then  $(b - a)^3 = b^3 - 3a^2b + 3ab^2 - a^3 =$

$b^3 - a^3 = -b^* + a^* = -(b - a)^* \Rightarrow (b - a)^3 = -(b - a)^*$ . Hence  $b - a$  is a 3-generalized skew projection. Now assume that  $(b - a)^3 = -(b - a)^*$ . It follows that  $b^3 - 3a^2b + 3ab^2 - a^3 = -b^* + a^*$  then  $3a^2b = 3ab^2$  hence  $a^2b = ab^2$ .

Theorem 1.7. Let that  $a = h + ik \in M(\beta)$  is a 2-generalized skew projection. Then

(i)  $a$  is normal.

(ii)  $\sigma(a) \subseteq \{\lambda \in \mathbb{C} : \lambda^3 = -1\} \cup \{0\}$ .

(iii) if  $hk \in H(\beta)$ , then

$$(a^*)^2 - a \text{ and } a^4 = -a.$$

Proof. (1) since  $a^2 = -a^*$  hence  $aa^* = a(-a^2) = (-a^2) = (-a^2)a = a^*a$ . (2) Let  $\lambda \in \sigma(a)$ , then  $\lambda = \chi(a)$  for some  $\chi \in \Delta_a$ , hence by proposition 1.3  $\bar{\lambda} = \chi(a^*) =$

$$\chi(-a^2) = -\chi(a^2) = -\lambda^2. \text{ If } \lambda \neq 0, \text{ then } |\lambda| = 1 \text{ and}$$

$$\lambda^4 = \lambda\lambda^3 = \lambda(-\bar{\lambda}) = -\lambda\bar{\lambda} = -1.$$

(3) From  $a^2 = -a^*$  then we have;  $h^2 + h - k^2 = i(k - 2hk)$ . Proposition 1.3 (4) and proposition 1.1 (2) show that  $\sigma(h^2 + h - k^2), \sigma(k - 2hk) \subseteq \mathbb{R}$  hence

$$\sigma(k - 2hk) \subseteq \mathbb{R} \cap i\mathbb{R} = \{0\}. \text{ Thus } r(k - 2hk) = 0.$$

since  $hk \in H(A), k - 2hk \in H(A)$ . Now use proposition 1.1(2) to get  $k = 2hk$ , hence  $h^2 - k^2 = -h$ . Therefore  $(a^*)^2 = (h - ik)^2 = h^2 - 2ihk - k^2 = -h - 2ihk = -h - ik = -a$  and  $a^4 = (a^2)^2 = (-a^*)^2 = -a$ .

Theorem 1.8. Suppose  $a = h + ik \in M(\beta)$  and suppose that

$$\sigma(a) \subseteq \{\lambda \in \mathbb{C} : \lambda^3 = -1\} \cup \{0\}$$

We have

(i) If  $a$  is normal, then  $r(a^2 + a^*) = 0$ .

(ii) If  $hk, h^2, k^2 \in H(\beta)$  then  $a$  is a 2-generalized skew projection.

Proof. Let  $b = a^2 + a^*$  (1) Since  $a$  is normal,  $hk = kh$ , thus  $b \in B(a)$ . Take  $\lambda \in \sigma(b)$ . Then  $\lambda = \chi(b) = \chi(a)^2 + \chi(a^*)$  for some  $\chi \in \Delta_a$ , Case1:  $\chi(a) = 0$ . Then we have  $\lambda = 0$ . Case 2:  $\chi(a) \neq 0$ . Since  $\chi(a) \in \sigma(a)$ ,  $\chi(a)^3 = -1$  it follows that  $\lambda \chi(a) = \chi(a)^3 + \chi(\bar{a})\chi(a) = -1 + 1 = 0$  and so  $\lambda = 0$ . Hence  $\sigma(b) = \{0\}$ .

(2) Since  $h, k, h^2, hk$  and  $k^2$  are all hermitian, it follows from [1, theorem 2.14] that  $hk = kh$ . Thus  $a$  is normal. From  $b = a^2 + a^* = h^2 + 2ihk - k^2 + (h - ik)$

We get  $i(2hk - k) = b - (h^2 + h - k^2)$ . By proposition 1.1 and proposition 1.3  $\sigma(2hk - k) \subseteq R \cap iR = 0$ . Since  $2hk - k \in H(A)$ ,  $2hk - k = 0$ ,  $b = h^2 + h - k^2 \in H(A)$ . Since by (1),  $r(b) = 0$ , we conclude that  $b = 0$ , hence  $-a^2 = a^*$ .

Corollary 1.9 For  $a = h + ik \in M(\beta)$  with  $h, k, hk, h^2, k^2 \in H(\beta)$  the following assertions are equivalent;

- (1)  $a$  is a normal partial isometry and  $a^4 = -a$ .
- (2)  $a$  is normal and  $a^4 = -a$ .
- (3)  $\sigma(a) \subseteq \lambda \in \{\lambda : \lambda^3 = -1\} \cup \{0\}$ .
- (4)  $a^2 = -a^*$ .

Proof.  $\bullet(1) \Rightarrow (2)$  : clear.

$\bullet(2) \Rightarrow (3)$ : Use the spectral mapping theorem [7, theorem 10.28]

$\bullet(3) \Rightarrow (4)$ : theorem 2.2. (2).

$\bullet(4) \Rightarrow (1)$ : By theorem 2.1 (1),  $a$  is normal, and part (3) of theorem 2.1 give  $aa^*aa^* = (-a^2)a = -a^4 = a$ .

Theorem 1.10. Let  $a, b \in M(\beta)$ ,  $(a + b \neq 0)$  be 2-generalized skew projection then  $a + b$  is a 2-generalized skew projection if and only if  $ab = ba^*$ .

Proof. We have  $(a + b)^2 = a^2 + ab + ba + b^2 = -a^* + ab + ba + b^*$ . If  $ab = ba^*$

then  $(a + b)^2 = -a^* - b^* = -(a^* + b^*) = -(a + b)^*$ . Therefore  $a + b$  is a 2-generalized skew projection. Conversely, Assume that  $(a + b)^2 = -(a + b)^*$ .

Then  $a^2 + ab + ba + b^2 = -a^* - b^* = -a^2 + b^2$ . Then  $ab + ba = 0$ . Applying  $a$  on the left and on the right gives  $a^2b + aba = 0 = aba + ba^2$ . Then  $-a^*b + aba = 0 = aba - ba^*$  hence  $-a^*b = -ba^*$ . Since  $a$  is normal,  $a^*$  is normal. Proposition 2.1 in [8] implies now that  $ab = ba$ , thus  $ab = ba = 0$ .

Theorem 1.11. Let  $a, b \in M(w)$  and be 2-generalized skew projection  $a = h + ik$ ,  $h, k \in H(W)$ ,  $hk \in H$  then  $(b - a)^* = -(b - a)^2 \Leftrightarrow ab = ba = -a^*$ .

Proof. First assume that  $ab = ba = -a^*$  then  $(b - a)^2 = b^2 - ba - ab + a^2 = b^2 + a^* + a^* +$

$a^2 = b^2 + 2a^* - a^* = b^2 + a^* = -b^* + a^* = -(b^* - a^*)$  then  $(b - a)^2 = -(b^* - a^*)$ . It follows that  $b^2 - ba + a^2 = -b^* + a^*$  hence  $2a^2 = 2ba$  hence  $a^2 = ba$  then  $-a^* = ba = ab$ .

Theorem 1.12 Let  $a, b \in M(W)$ , where  $a$  is normal. Then  $a^*a = a^*b$ ,  $aa^* = ba^*$  if and only if  $a^2 = ab = ba$ .

Proof. Suppose  $a^*a = a^*b$ ,  $aa^* = ba^*$  and  $a$  is normal. Hence  $a^*a = a^*b = ba^*$ .

By Putnam Fuglede's theorem [4]  $ab = ba$  and  $a^2 = ab$  then  $a^2 = ab = ba$ .

Suppose  $b \in M(W)$  is 2-generalized projection. Then  $b^*b = b^2b = bb^2 =$

$bb^*$ . So  $b$  is normal. Also  $(b^*b)^2 = (b^*)^2b^2 = b^4b^2 = bb^* = b^*b$ . Hence  $b$  is a partial isometry and  $b^*b$  is an orthogonal projection onto  $R(b) = R(b^*)$ , where  $R(b)$  denotes the range of an operator  $b$ .

Theorem 1.13 Let  $a, b \in M(w)$  be two generalized projection. Then  $b - a$  is a generalized projection if and only if  $aa^* = a^*b$ ,  $aa^* = ba^*$ .

Proof. Suppose  $b - a$  is a generalized projection. Then  $(b - a)^2 = (b - a)^*$ .

Hence  $b^2 - ab - ba + a^2 = b^* - a^*$ . So  $2a^* = ab + ba$ . Hence  $2a^2 = ab + ba$ . Thus  $2a^3 = aba + ba^2 = a^2b + aba$ . So  $ba^2 = a^2b$ . Since  $a$  is generalized projection,  $ba^* = a^*b$ . By Fuglede's theorem, [7],  $ab = ba$ . Hence  $a^2 = ab = ba$ . Hence by theorem 2.1  $a^*a = a^*b$ ,  $aa^* = ba^*$ . Suppose  $a^*a = a^*b$ ,  $aa^* = ba^*$ . Then by theorem 2.1  $a^*a^2 = ab = ba$ . Hence  $2a^* = ab + ba$ . Then by premultiply and postmultiply the last equation by  $a^*$  we get  $aba^* + baa^* = a^*ab + a^*ba$ .

While by premultiply and postmultiply the last equation by  $a^*$  we get  $ab =$

$a^*ba^* + abaa^* - aa^*ba$ ,  $ba = a^*aba + a^*ba^* - aba^*a$

respectively. Since  $aa^* = a^*$

$a, ab + ba = 2a^*ba^* = 2a^*$ . Hence  $b - a$  is a generalized projection.

Acknowledgements: The author expresses his gratitude to the referee for carefully reading of the manuscript and giving useful comments.

## REFERENCES

- [1] F.F. Bonsall and J. Duncan, Numerical Ranges of Operators on Normed Spaces and Elements of Normed Algebras, Cambridge University Press, (1971).
- [2] H. Du and Y. Li, The spectral characterization of generalized projections, Linear Algebra Appl. 400, (2005), 313-318.
- [3] L. Lebtahi and N. Thome, A note on R-generalized projection, Linear Algebra, Appl. 420. (2007), 572-575.

## n-GENERALIZED SKEW PROJECTIONS

1 DEPARTMENT OF MATHEMATICS, FACULTY OF SCIENCE, ISLAMIC AZAD UNIVERSITY CENTRAL TEHRAN BRANCH, TEHRAN, IRAN.

E-mail address: msasgari@yahoo.com moh.asgari@iauctb.ac.ir

2 DEPARTMENT OF MATHEMATICS, FACULTY OF SCIENCE, ISLAMIC AZAD UNIVERSITY E-mail address: s\_karimizad@yahoo.com.