



# مجله روش های محاسباتی در علوم مهندسی

(فصل نامه علمی)

شماره پیاپی ۲

مجله روش های محاسباتی در علوم مهندسی، جلد ۱، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲

## فهرست مقالات

ارائه و بررسی یک مبدل DC-DC افزایشده با ورودی از سیستم خورشیدی

1-6 سعید دانیالی، محمدمین شیرخانی، زهره دادوند، امیرمحمد شکرپیگی

ارائه روشی نو جهت مدل سازی ریاضی زمانبندی کلاس های دانشگاهی با استفاده از منطق فازی

7-11 سینا ایاسه

**Machine Learning-based Flexible Link Robot Control**

12-17 Ali Abdali, Verya Monjezi

تحلیل اجزا محدود تغییرشکلها و خطاهای ناشی از تغییرات دما بر روی دستگاه CMM

18-23 فرشاد ربیعی

**Investigation and modeling of the inrush current generated by the capacitors switching in two modes the presence of current limiting inductor and its absence**

24-29 Ali Yazdani Baghmaleki, Asad Shemshadi

مدلسازی و تحلیل داده های خاک با هدف اکتشاف مس در منطقه نائین

30-36 آیدین رحیمی هرزوبلی

سردبیر: دکتر سید حسین حسینی

مدیر مسئول: دکتر جعفر طاوسی

کارشناس نشریه: مهندس محمدمین شیرخانی

آدرس سایت نشریه: [cmes.ilam.ac.ir](http://cmes.ilam.ac.ir)

## Presentation and investigation of a DC-DC boost converter with input from solar system

Saeed Danyali <sup>1,\*</sup>, Mohammadamin Shirkhani <sup>1</sup>, Zohreh Dadvand <sup>1</sup> and Amirmohammad Shekarbeigi <sup>1</sup>

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

E-mails: [s.danyali@ilam.ac.ir](mailto:s.danyali@ilam.ac.ir) ; [ma.shirkhani@ilam.ac.ir](mailto:ma.shirkhani@ilam.ac.ir) ; [zohreh.dadvand@gmail.com](mailto:zohreh.dadvand@gmail.com) ; [m.beigii1998@gmail.com](mailto:m.beigii1998@gmail.com)

### Abstract

Nowadays, due to the increase in the use of renewable energies, power converters have also gained special importance. Due to the low voltage level of renewable systems, many DC-DC boost converters have been proposed to increase this voltage level. In this article, a DC-DC boost converter is investigated. The input of this converter is supplied from a photovoltaic system. The converter reviewed in this paper has only one power switch and compared to many other converters, it has a smaller number of switches, which makes the circuit simpler than other converters. This converter also has three capacitors, three diodes and three inductors. The structure of this converter has been compared with a number of structures proposed in other studies and it has been observed that it has a simpler structure than many other structures. The performance of the proposed converter has been performed in the MATLAB/Simulink software environment and the obtained results have been fully presented in the simulation section.

### Keywords

DC-DC Boost Converter, Photovoltaic System, Power Electronic, Renewable Energy Systems

## ارائه و بررسی یک مبدل DC-DC افزایشده با ورودی از سیستم خورشیدی

سعید دانیالی<sup>۱\*</sup>، محمدامین شیرخانی<sup>۱</sup>، زهره دادوند<sup>۱</sup> و امیرمحمد شکرپیگی<sup>۱</sup>

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

ایمیل نویسندگان: [m.beigii1998@gmail.com](mailto:m.beigii1998@gmail.com); [zohreh.dadvand@gmail.com](mailto:zohreh.dadvand@gmail.com); [ma.shirkhani@ilam.ac.ir](mailto:ma.shirkhani@ilam.ac.ir); [s.danyali@ilam.ac.ir](mailto:s.danyali@ilam.ac.ir)

## چکیده

امروزه با توجه به افزایش استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، مبدل های قدرت نیز اهمیت ویژه ای پیدا کرده اند. باتوجه به پایین بودن سطح ولتاژ سیستم های تجدیدپذیر، مبدل های DC-DC افزایشده بسیاری به منظور افزایش این سطح ولتاژ پیشنهاد شده اند. در این مقاله یک مبدل DC-DC افزایشده بررسی شده است که ورودی این مبدل، از سمت یک سیستم فتوولتاییک تامین می شود. مبدل بررسی شده در این مقاله فقط دارای یک کلید قدرت می باشد که در مقایسه با بسیاری از مبدل های دیگر، تعداد کلید کمتری دارد و از این جهت باعث ساده تر شدن مدار، نسبت به مدارهای دیگر می باشد. این مبدل همچنین دارای سه خازن، سه دیود و سه سلف می باشد. ساختار این مبدل، با تعدادی ساختار پیشنهادی در مطالعات دیگر مقایسه شده و مشاهده شده است که ساختار ساده تری نسبت به بسیاری از ساختارهای دیگر، دارد. عملکرد مبدل پیشنهادی، در محیط نرم افزار متلب/سیمولینک بررسی شده است و نتایج بدست آمده به صورت کامل در بخش شبیه سازی ارائه و بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** مبدل DC-DC افزایشده، سیستم فتوولتاییک، الکترونیک قدرت، انرژی های تجدیدپذیر

نام نویسنده مسئول: سعید دانیالی

ایمیل نویسنده مسئول: [s.danyali@ilam.ac.ir](mailto:s.danyali@ilam.ac.ir)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۵

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

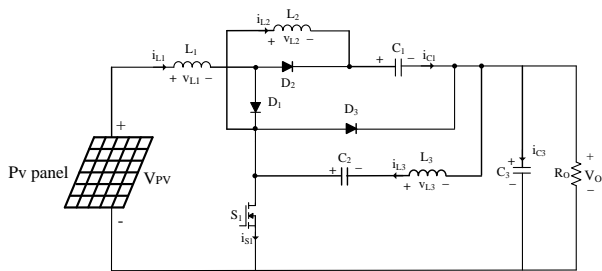
## ۱- مقدمه

و خازن ها است. انواع مبدل های الکترونیک قدرت شامل مبدل های DC به DC، AC به AC، AC به DC و DC به AC می باشد. [۹-۱۱].

به منظور تنظیم ولتاژ خروجی ثابت در شرایط مختلف از مبدل DC-DC استفاده می کنند. مبدل DC-DC یک میدلی است که ولتاژ DC یک منبع را از یک سطح ولتاژ به سطح ولتاژ دیگر تبدیل میکند. مبدل های DC-DC به طور عمده در منابع تغذیه سوئیچینگ و موتور های DC به کار می روند و جریان ورودی اغلب جریان تنظیم نشده است که از یکسوسازها وارد مدار میشوند و سپس میتوان آن را به سطح ولتاژ دلخواه تغییر داد [۱۴-۱۲]. همچنین این مبدل ها شامل مبدل کاهنده، افزایشده، افزایشده-کاهنده، مبدل چوک و مبدل های تمام پل میباشد که همه مبدل های DC-DC بر پایه مبدل کاهنده و مبدل افزایشده بوده و یا ترکیبی از این دو مدار هستند. مبدل های DC-DC دارای ساختارهای مختلفی می باشند که از نواح آن ها میتوان به مبدل باک، بوست، باک-بوست، مبدل کاک و... اشاره کرد [۱۵ و ۱۶]. منبع [۱۷] یک مبدل DC-DC ابشاری هیبریدی که قابلیت بهره ولتاژ بالا داراست توضیح میدهد. ساختار این مبدل مبتنی بر خازن و سلف های جفت شده میباشد در آن سیم پیچ های اولیه سلف تزویج شده به صورت موازی و سیم پیچ های ثانویه به صورت سری به هم متصل می شوند. البته سلول های چند برابر کننده ولتاژ که از دیود-خازن و سلف تزویج تشکیل شده اند و باعث انتقال انرژی و بالا بردن ولتاژ میشوند. مبدل مورد نظر مزایای بسیار زیادی از جمله کاهش تنش ولتاژ کلیدهای قدرت و همچنین بهبود یافتن بهره ولتاژ را نیز دارا میباشد. همچنین این ساختار برای بهبود راندمان منبع تغذیه و افزایش طول عمر منبع تغذیه ورودی بسیار مفید میباشد. در [۱۸] طراحی و تحلیل یک مبدل تقویت کننده DC-DC کارآمد با فناوری MPPT بهبود یافته مورد بررسی قرار گرفته است. مهم ترین بخش و ویژگی این ساختار نسبت به ساختار های سنتی اجرای الگوریتم MPPT Advanced Perturb &

امروزه در جهان برای تولید انرژی الکتریسیته، بیشتر از سوخت های فسیلی استفاده می شود که باعث تولید دی اکسید کربن بیشتر و در نتیجه اثرات مخرب بر محیط زیست می شود. یکی از راه های غلبه بر این مشکل استفاده از انرژی های تجدید پذیر می باشد، در نتیجه ایده استفاده از منابع انرژی های تجدیدپذیر بجای منابع انرژی متداول فسیلی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است و توجه پژوهشگران را به استفاده از انرژی های-تجدیدپذیر بخصوص سلول های خورشیدی بیشتر کند. [۵-۱] همچنین در این سالها استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و پاک همانند انرژی خورشیدی که شامل مزایایی بسیار زیادی نسبت به سوخت های فسیلی میباشد افزایش چشمگیری داشته است. انرژی خورشیدی یک فناوری سازگار با محیط زیست، یک منبع انرژی عالی و یکی از مهم ترین منابع انرژی تجدید پذیر و سبز است. انرژی خورشیدی تابشی از نور خورشید است که می تواند مهار شده و با استفاده از تکنولوژی های مختلف به انرژی الکتریکی تبدیل شود. تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی را می توان با استفاده از سلول های خورشیدی انجام داد. عملکرد سیستم های فتوولتاییک در تبدیل انرژی خورشیدی به توان الکتریکی، به شدت تابعی از شرایط محیطی همانند میزان تابش خورشیدی، دمای محیط، باد، رطوبت و سایر پارامترهای محیطی میباشد در نتیجه بررسی تغییر این پارامترها در طراحی و بررسی عملکرد این سامانه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. [۸-۶]. مبدل های الکترونیک قدرت معمولاً شامل چند طبقه تبدیل قدرت می باشند و عملکرد هر طبقه از طبقه دیگر توسط عناصر ذخیره کننده انرژی نظیر خازن ها و سلف ها مجزا می شود. به هر طبقه تبدیل توان، یک مبدل گفته می شود. در سیستم های الکترونیک قدرت هر مبدل شامل عناصر نیمه هادی قدرت قابل کنترل با سیگنال های الکترونیکی و عناصر ذخیره کننده انرژی نظیر سلف ها

سلف می باشد. این مبدل دارای دو حالت عملکردی می باشد که در ادامه به هر کدام از آنها به صورت جداگانه پرداخته شده است.

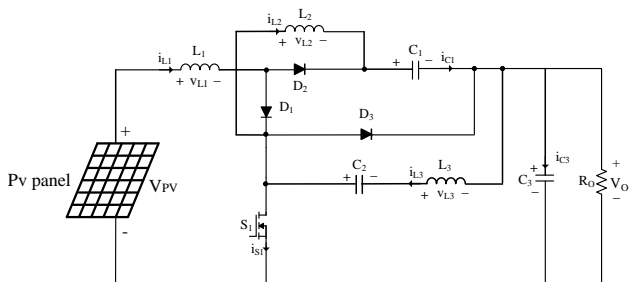


شکل شماره ۱: ساختار مبدل DC-DC افزایشده بررسی شده.

### ۲-۱. حالت عملکردی اول

در اولین حالت عملکردی مدار، کلید S1 روشن است و دیود D1 هدایت را انجام می دهد درحالی که دیودهای D2 و D3، خاموش هستند و هدایت انجام نمی دهند. در این حالت، جهت جریان عبوری از سلف های L1 و L2، در خلاف جهت یکدیگر هستند و جریان عبوری از کلید S1، برابر  $i_{L2} + i_{D1} + i_{L3}$  می باشد. خازن C1 توسط جریان L2 و خازن C2، توسط جریان L3 شارژ می شود. ولتاژ دو سر L1، L2 و L3 به ترتیب در معادلات ۱ تا ۳ نشان داده شده اند. همانطور که مشاهده می شود، ولتاژ  $i_{L1}$  برابر با مقدار ولتاژ PV می باشد. شکل ۲، نشان دهنده وضعیت عملکردی مبدل در حالت اول می باشد.

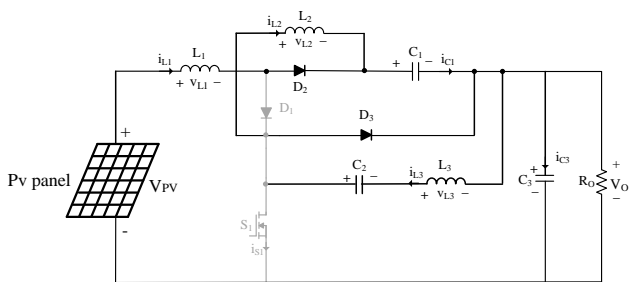
$$\begin{aligned} V_{L1} &= V_{PV} & (1) \\ V_{L2} &= V_{C1} & (2) \\ V_{L3} &= V_{C3} & (3) \end{aligned}$$



شکل شماره ۲: نحوه عملکرد مبدل DC-DC افزایشده مورد بررسی در حالت عملکردی اول.

### ۲-۲. حالت عملکردی دوم

نحوه عملکرد مبدل در حالت عملکردی دوم، در شکل ۳، نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده است، در این وضعیت، کلید S1 خاموش می شود و برخلاف حالت قبل، دیودهای D2 و D3 روشن هستند و هدایت را انجام می دهند درحالی که در این حالت، دیود D1 خاموش می باشد.



شکل شماره ۳: نحوه عملکرد مبدل DC-DC افزایشده مورد بررسی در حالت عملکردی دوم.

Observation (APO) میباشد. اجرای این الگوریتم در مبدل باعث میشود که مبدل مدنظر بر نوسانات توان خروجی سلول های خورشیدی غلبه کند و تولید توان خروجی از ارایه های PV به حداکثر میزان خود برسد. اضافه کردن پارامترهایی نظیر پارامتر LC بیشتر نیز اثرات مثبت دارد و باعث کاهش تلفات تبدیل توان در مبدل میشود. در منبع [۱۹] طرح جدیدی از مبدل های DC-DC را ارائه شده است که همراه با بهره بالا و با راندمان بالا میباشد و کاربرد آن هم برای منابع ولتاژ با ورودی کم مانند سلول های فتوولتائیک (PV) بیشتر مد نظر قرار میگیرد. با این حال این مبدل امکان استفاده از کنترل کننده مشتق انتگرال را به منظور بهبود عملکرد سیستم را برای ما فراهم می کند که ولتاژهای DC کمتر را به ولتاژهای بالاتر بدون به خطر انداختن بهره و بازده با استفاده از یک سلف تزویج افزایش میدهد. همچنین از سلف تزویج نیز در انتخاب ماسفت مناسب برای به دست آوردن راندمان بالا و بهره بالا استفاده میشود. برای این کار از عملکرد سلف تزویج برای افزایش بهره مبدل با استفاده از جریان های ناشی استفاده کرد. همچنین کاهش ولتاژ با استفاده از فعال کردن خازن های منبع صورت میگیرد. نتایج شامل دستیابی به راندمان بالا می باشد و در نهایت ولتاژ بار ثابت را حفظ می کند. مقاله [۲۰] یک مبدل تقویت کننده رزونانس دوالتایی با پل کامل dc-dc ایزوله مورد بررسی قرار داده است. این مبدل برای کاربردهایی که ولتاژ ورودی و محدوده بار وسیعی را می طلبند مناسب است. از این مبدل میتوان به عنوان یک مبدل DC-DC Front-End استفاده کرد که میتوان ولتاژ پایین متغیر را از منبع تغذیه تقویت کند و آن را به یک لینک DC ولتاژ بالا که یک اینورتر را تغذیه میکند متصل کرد.

همچنین مقایسه ها نشان میدهد مبدل پیشنهادی بر تمامی اشکالات مبدل های تقویت کننده dc-dc ایزوله معمولی غلبه می کند. منبع [۲۱] یک مبدل DC-DC جدید پیشنهاد می کند. ساختار مبدل مد نظر شامل سه کلید، دو دیود و سه سلف است که به منظور ایجاد یک ساختار جدید و تقویت شده میباشد و قابلیت هایی از جمله قابلیت افزایش ولتاژ بالا برای پنل های PV را به همراه دارد. همچنین این ساختار مزایایی مثل قابلیت مبدل فوق فزاینده، تنش ولتاژ پایین در عناصر فعال، و بازده متوسط است. در [۲۲] ساختار به مطالعه یک مبدل تقویت کننده DC-DC بدون ترانسفورماتور که با ساختار جدیدی همراه است میپردازد. این ساختار شامل یک خازن سوئیچ با یک کنترلر حالت لغزشی (SMC) به منظور کاهش تنش ولتاژ روی کلید قدرت و افزایش بهره ولتاژ DC میباشد. این قابلیت با استفاده از یک بلوک پیش تقویت کننده که شامل یک سلف اضافی در سمت ورودی است انجام می شود. از قابلیت دیگر بلوک خازن سوئیچ کاهش تنش های ولتاژی را روی کلید قدرت اصلی و سایر دیودها میباشد. نتایج مبدل مورد بحث شده شامل بهره بالای DC و تحت چرخه کاری کمتری کار کند (کارکرد با مقادیر کم چرخه کاری به طور مستقیم تلفات دینامیکی در مدار را کاهش می دهد و راندمان بالاتری می دهد).

در این مقاله، یک ساختار ساده مبدل DC-DC افزایشده پیشنهاد شده است. در این مبدل، یک سیستم فتوولتائیک به عنوان ورودی مبدل در نظر گرفته شده است و نتایج بدست آمده در محیط نرم افزار متلب/سیمولینک، ارائه و بررسی شده اند. این مبدل دارای دو حالت عملکردی می باشد که در مقاله به آن اشاره و راجب هر حالت، جداگانه بحث شده است. همچنین نحوه بدست آمدن اندازه هر کدام از عناصر مدار نیز به طور کامل ارائه شده است.

### ۲- مبدل DC-DC افزایشده پیشنهادی و حالت های عملکردی آن

ساختار مبدل DC-DC افزایشده بررسی شده در این مقاله، در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست، این مبدل دارای تنها یک کلید قدرت می باشد که این مورد می تواند مزیت این ساختار از نظر سادگی و پیاده سازی ساده ی آن باشد. همچنین این مبدل دارای سه خازن، سه دیود و سه

همچنین حداقل مقدار خازن C3، مطابق فرمول ۱۷ بدست می آید. در این فرمول،  $\Delta V_{C3}$  نشان دهنده ریبیل ولتاژ عبوری از خازن C3 می باشد.

$$C_0 = I_{Co} \cdot \frac{D}{\Delta V_{out} \cdot f_s} \quad (17)$$

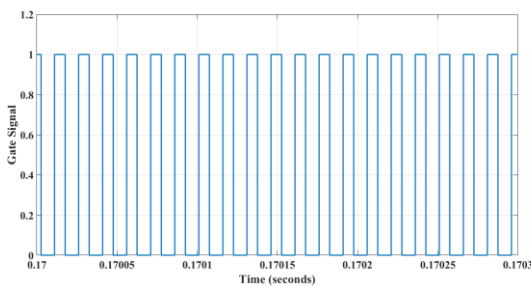
#### ۴- نتایج شبیه سازی

همانطور که پیشتر نیز گفته شد، شبیه سازی مبدل آورده شده در این مقاله، در محیط نرم افزار متلب/سیمولینک ۲۰۱۸b انجام شده است. اندازه هر کدام از عناصر این مبدل در شبیه سازی، مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول ۱ فرض شده است و باتوجه به آنها، شبیه سازی انجام و نتایج بدست آمده در ادامه ارائه و بررسی شده اند. همچنین باید این نکته را ذکر کرد که سیستم فتولتائیک فرض شده دارای ۵ رشته موازی است که در هر رشته، ۵ ماژول به صورت سری به یکدیگر متصل شده اند و نوع ماژول نیز Certain Teed Apollo می باشد. مشخصات این ماژول، در جدول ۲ ذکر شده است.

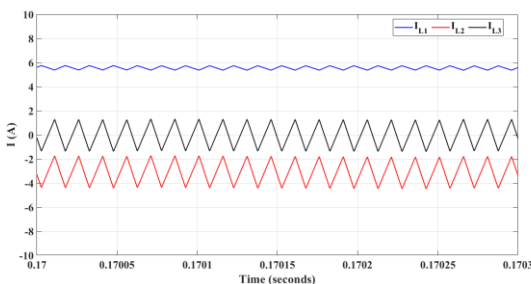
جدول شماره ۱. مقادیر فرض شده برای عناصر مبدل در شبیه سازی

عناصر	مقدار
L1	۴۶۶ $\mu$ H
L2	۱۱۶ $\mu$ H
L3	۱۱۶ $\mu$ H
C1	۱۲۰ $\mu$ F
C2	۲۵۰۰ $\mu$ F
C3	۲۵۰۰ $\mu$ F
Vin	۲۷ V
Ro	۵۰ $\Omega$

شکل ۴، سیگنال گیت سوئیچ S1 را نشان می دهد. همچنین شکل ۵، نشان دهنده شکل موج جریان عبوری از سلف های L1، L2 و L3 می باشد و همانطور که واضح است و از روابط بیان شده قبل هم می توان دریافت کرد، جریان عبوری از سلف L1، دارای سطح جریانی بیشتری نسبت به دو سلف دیگر دارد.



شکل شماره ۴: سیگنال گیت کلید S1.



شکل شماره ۵: جریان سلف های L1، L2 و L3.

ولتاژ درین-سورس سوئیچ S1، در شکل ۶ نشان داده شده است و مقدار

در این حالت، به منظور اینکه جهت جریان های L1 و L2 را همانند حالت قبل حفظ کنیم، بایستی قطبیت سلف های L1 و L2 را برعکس کنیم و دلیل روشن بودن دیودهای D2 و D3 در این حالت، همین برعکس شدن قطبیت سلف های L1 و L2 می باشد. انرژی ذخیره شده در سلف های L1، L2 و L3 در حالت قبل، در این حالت به خازن های C1، C2 و C3 منتقل می شود. ولتاژ دو سر سلف های L1، L2 و L3 در این حالت، به ترتیب در فرمول های ۴ تا ۶ بیان شده اند.

$$V_{L1} = V_{in} - V_{C1} \quad (4)$$

$$V_{L2} = V_{C1} - V_{out} \quad (5)$$

$$V_{L3} = V_{C2} - V_{out} \quad (6)$$

#### ۳- طراحی عناصر مبدل

انتخاب و تعیین مقادیر سلف ها و خازن ها که عناصر ذخیره کننده جریان و ولتاژ هستند، در نحوه عملکرد مبدل های DC-DC بسیار مهم هستند. باید توجه کرد که حداکثر ریبیل جریان سلف ها و حداکثر ریبیل ولتاژ خازن ها نباید بیشتر از ۱۰ درصد مقدار جریان عبوری سلف و ولتاژ دو سر خازن باشد. در ادامه به بررسی روابط تعیین مقدار سلف های L1، L2 و L3 و همچنین خازن های C1، C2 و C3 می پردازیم و هر کدام را مورد بررسی قرار می دهیم.

ولتاژ ایجاد شده و جریان عبوری از سلف L1 را می توان به ترتیب طبق روابط ۷ و ۸، مطابق زیر بدست آورد:

$$V_{in} = L1 \frac{di_{L1}}{D \cdot T} \quad (7)$$

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L1} \quad (8)$$

مشابه فرمول ۸، می توان فرمول ۹ را برای سلف L2 نیز مطابق زیر نوشت:

$$\Delta I_{L2} = V_{C1} \cdot D \cdot \frac{1}{L2 - f_s} \quad (9)$$

برای بدست آوردن ولتاژ خازن C1 می توان از فرمول ۱۰ استفاده کرد:

$$V_{C1} \cdot D \cdot \frac{1}{L2 - f_s} = V_{in} \left( \frac{1}{1-D} \right) \cdot \frac{1}{L2 - f_s} \quad (10)$$

طبق معادلات ارائه شده در فرمول ۹ و ۱۰، می توانیم فرمول ۱۱ را مطابق زیر بدست آوریم:

$$\Delta I_{L2} = V_{in} \left( \frac{D}{1-D} \right) \cdot \frac{1}{L2 - f_s} \quad (11)$$

بنابراین می توان گفت که حداقل مقداری که باید برای سلف L1 باید مورد استفاده قرار بگیرد، از طریق فرمول ۱۲ بدست می آید:

$$L1 = \frac{V_{out} \cdot (1-D)^2 \cdot D}{\Delta I_{L1} \cdot f_s} \quad (12)$$

که در این فرمول ها، توضیح پارامتر های استفاده شده به شرح زیر است:

$\Delta I_{L1}$ : ریبیل جریان سلف L1

$f_s$ : فرکانس کلیدزنی کلید قدرت

D: چرخه کار

$V_{out}$ : ولتاژ خروجی DC

باتوجه به اینکه  $\Delta I_{L2}$  ریبیل جریان سلف L2 می باشد، رابطه ۱۳ بیانگر حداقل مقدار سلف L2 می باشد:

$$L2 = \frac{V_{out} \cdot (1-D)^2 \cdot D}{\Delta I_{L2} \cdot (1-D) \cdot f_s} \quad (13)$$

رابطه ۱۴ نیز، حداقل مقدار سلف L3 را نشان می دهد:

$$L3 = \frac{V_{out} \cdot (1-D)^2 \cdot D}{\Delta I_{L3} \cdot (1-D) \cdot f_s} \quad (14)$$

حداقل مقدار خازن C1 نیز طبق رابطه ۱۵ بدست می آید:

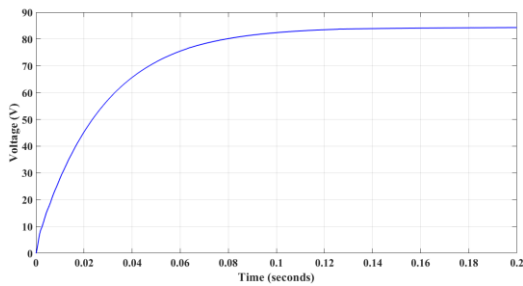
$$C1 = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_{C1} \cdot (1-D) \cdot f_s} \quad (15)$$

در رابطه بالا،  $\Delta V_{C1}$  بیانگر ریبیل ولتاژ عبوری از خازن C1 می باشد.

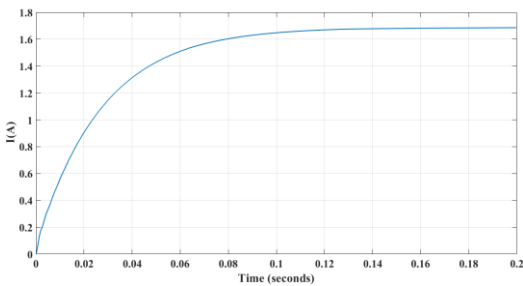
رابطه ۱۶، بیانگر حداقل مقداری خازن C2 می باشد که در این رابطه،  $\Delta V_{C3}$

ریبیل ولتاژ عبوری از خازن C2 می باشد.

$$C1 = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_{C1} \cdot (1-D) \cdot f_s} \quad (16)$$



شکل شماره ۹: شکل موج ولتاژ خروجی



شکل شماره ۱۰: شکل موج جریان خروجی

شکل ۹ و ۱۰، به ترتیب بیانگر شکل موج ولتاژ و جریان خروجی مبدل می باشد. ولتاژ و جریان خروجی مبدل بعد از گذراندن شرایط اولیه به ترتیب به ۸۴ ولت و ۱.۶۸ آمپر می رسند. بنابراین می توان گفت که توان خروجی مبدل برابر با ۱۴۱ وات می باشد.

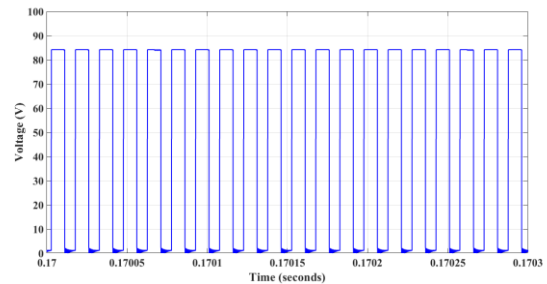
#### ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله یک ساختار مبدل DC-DC افزایش دهنده بررسی شده است. این مبدل به منظور استفاده در سیستم های انرژی تجدیدپذیر مورد بحث قرار گرفته است و از یک سیستم خورشیدی فتوولتائیک برای ورودی این مبدل استفاده شده است. سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته شده در شبیه سازی دارای ۴ رشته موازی است که در هر رشته، ۵ ماژول به صورت سری به یکدیگر متصل شده اند. این مبدل با توجه به داشتن تنها یک کلید قدرت در ساختار خود، دارای ساختار ساده ای است و می توان به راحتی آن را پیاده سازی کرد. همچنین باید این نکته را ذکر کرد که این مبدل دارای دو حالت عملیاتی می باشد. همچنین دیگر اجزای تشکیل دهنده این ساختار شامل سه سلف، سه خازن و سه دیود می باشد. مقداری ولتاژ ورودی در شبیه سازی برابر ۲۷ ولت می باشد در حالی که ولتاژ خروجی به حدود ۸۴ ولت می رسد. نتایج شبیه سازی های انجام شده که در محیط متلب/سیمولینک انجام شده است، عملکرد مبدل پیشنهادی را تایید می کند.

#### مراجع

- [1] 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.
- [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] Aazami R, Heydari O, Tavooosi J, Shirkhani M, Mohammadzadeh A, Mosavi A. Optimal Control of an Energy-Storage System in a Microgrid for Reducing Wind-Power Fluctuations. Sustainability. 2022 May 19;14(10):6183.

ولتاژ حداکثری آن، برابر با ۸۴ ولت می باشد. همانطور که از شکل ۴ و ۶ می توان متوجه شد، این مبدل در حالت کلیدزنی سخت، کار می کند که این باعث ایجاد مقداری تلفات می شود.

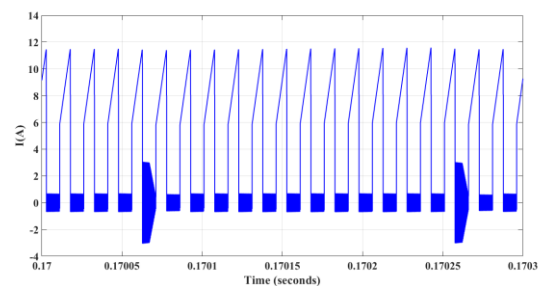


شکل شماره ۶: شکل موج ولتاژ درین-سورس کلید S1

جدول شماره ۲: مشخصات ماژول Certain Teed Apollo

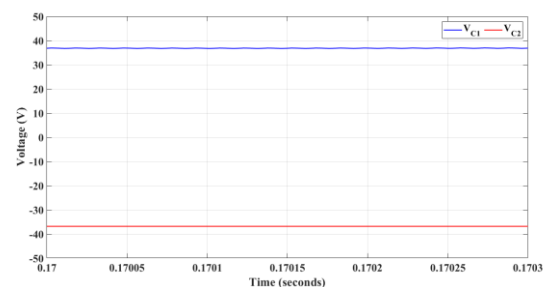
مقدار	پارامتر
۵۱.۹۴۳۵ W	حداکثر توان
۸.۷ V	ولتاژ مدار باز
۶.۷۹ V	ولتاژ در نقطه توان حداکثر
۱۴	تعداد سلول در هر ماژول
۸.۰۷ A	جریان اتصال کوتاه
۷.۶۵ A	جریان در نقطه توان حداکثر

جریان درین-سورس کلید S1 در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود، حداکثر جریان عبوری از این کلید به حدود ۱۱.۵ آمپر می رسد و در حالت مینیمم، این جریان بین ۰.۶۵ و -۰.۶۵ آمپر نوسان می کند که می توان گفت مقدار موثر آن، برابر همان صفر آمپر می باشد.



شکل شماره ۷: شکل موج جریان درین-سورس کلید S1

ولتاژ دوسر خازن های C1 و C2، در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود ولتاژ دوسر خازن C1 برابر ۵۰ ولت و ولتاژ دوسر خازن C2 حدودا برابر با ۵۰- ولت می باشد.



شکل شماره ۸: شکل موج ولتاژ دوسر خازن C1 و C2

- [22] Qi Q, Ghaderi D, Guerrero JM. Sliding mode controller-based switched-capacitor-based high DC gain and low voltage stress DC-DC boost converter for photovoltaic applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021 Feb 1;125:106496.
- [4] Feyzi MR, Niapour SK, Danyali S, Shafiei M. Supplying a Brushless DC Motor by z-source PV power inverter with FLC-IC MPPT by DTC drive. In 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems 2010 Oct 10 (pp. 694-699). IEEE.
- [5] 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.
- [6] Hosseini SH, Danyali S, Goharrizi AY, Sarhangzadeh M. Three-phase four-wire grid-connected PV power supply with accurate MPPT for unbalanced nonlinear load compensation. In 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2009 Jul 5 (pp. 1099-1104). IEEE.
- [7] Tawalbeh M, Al-Othman A, Kafiah F, Abdelsalam E, Almomani F, Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*. 2021 Mar 10;759:143528.
- [8] 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.
- [9] Hosseini SH, Nejabatkhah F, Niapour SK, Danyali S. Supplying a brushless dc motor by z-source PV power inverter with FL-IC MPPT. In The 2010 International Conference on Green Circuits and Systems 2010 Jun 21 (pp. 485-490). IEEE.
- [10] Feyzi MR, Niapour SK, Nejabatkhah F, Danyali S, Feizi A. Brushless DC motor drive based on multi-input DC boost converter supplemented by hybrid PV/FC/battery power system. In 2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE) 2011 May 8 (pp. 000442-000446). IEEE.
- [11] Mumtaz F, Yahaya NZ, Meraj ST, Singh B, Kannan R, Ibrahim O. Review on non-isolated DC-DC converters and their control techniques for renewable energy applications. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021 Dec 1;12(4):3747-63.
- [12] Hosseini SH, Nejabatkhah F, Danyali S, Niapour SK. Grid-connected three-input PV/FC/Battery power system with active power filter capability. In 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies 2011 Dec 5 (pp. 1-7). IEEE.
- [13] Haghi M, Danyali S, Thurow K, Warnecke JM, Wang J, Deserno TM. Hardware prototype for wrist-worn simultaneous monitoring of environmental, behavioral, and physiological parameters. *Applied Sciences*. 2020 Aug 7;10(16):5470.
- [14] Danyali S, Moradkhani A, Aazami R, Haghi M. New dual-input zero-voltage switching DC-DC boost converter for low-power clean energy applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021 Apr 9;36(10):11532-42.
- [15] Guo X, Shirkhani M, Ahmed EM. Machine-Learning-Based improved smith predictive control for MIMO processes. *Mathematics*. 2022 Oct 9;10(19):3696.
- [16] Danyali S, Moradkhani A, Aazami R, Mejbelt MT. New Dual-Source High-Gain ZVS DC-DC Converter for Integrating Renewable Power Source and Battery Storage. *Electric Power Systems Research*. 2022 Dec 1;213:108740.
- [17] Hu X, Ma P, Wang J, Tan G. A hybrid cascaded DC-DC boost converter with ripple reduction and large conversion ratio. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2019 Feb 8;8(1):761-70.
- [18] Raj A, Praveen RP. Highly efficient DC-DC boost converter implemented with improved MPPT algorithm for utility level photovoltaic applications. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022 May 1;13(3):101617.
- [19] Ali CB, Khan AH, Pervez K, Awan TM, Noorwali A, Shah SA. High efficiency high gain DC-DC boost converter using PID controller for photovoltaic applications. In 2021 International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN) 2021 Jul 4 (pp. 1-7). IEEE.
- [20] Goyal VK, Shukla A. Isolated DC-DC boost converter for wide input voltage range and wide load range applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020 Oct 13;68(10):9527-39.
- [21] Ahmed HY, Abdel-Rahim O, Ali ZM. New high-gain transformerless dc/dc boost converter system. *Electronics*. 2022 Feb 26;11(5):734.

## Presenting a new method for mathematical modeling of academic class scheduling using fuzzy logic

Sina Ayasseh <sup>1,\*</sup>

Faculty of Electrical Engineering (Electronics-Communication), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

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

\* Corresponding author

### Abstract

Fuzzy systems have a high ability to model the human thinking and inference system. In recent years, suitable answers have been received from fuzzy logic in solving scheduling problems. One of the problems of today's universities is the allocation of classrooms at a certain time. This problem becomes more apparent with the increase in the diversity of academic fields. Scheduling university classes is one of the most widely used areas of scheduling, which is defined as the assignment of courses to time slots according to resources and considering limitations. This issue is expressed differently for each educational institution according to the special needs of that institution. In this research, after referring to the background of the research in different countries and the importance of its investigation, the definition and fuzzy modeling of the class scheduling problem has been discussed and at the end it has been implemented on the program of the Industrial Engineering Department of Shiraz University. Based on the results obtained from the software solution of the model, we have been able to obtain an accurate solution for the problem.

### Keywords

resistance Operations Research; timing; periods of time; Limitations; benefits; Fuzzy modeling

## ارائه روشی نو جهت مدلسازی ریاضی زمانبندی کلاس های دانشگاهی با استفاده از منطق فازی

سینا ایاسه

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

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

### چکیده

سیستم های فازی توانایی بالایی در مدلسازی سیستم تفکر و استنتاج انسانی دارند. در سالهای اخیر از منطق فازی در حل مسائل زمانبندی پاسخ های مناسبی دریافت شده است. یکی از مشکلات امروزی دانشگاهها تخصیص کلاس درس در زمان مشخص می باشد. این مساله با افزایش تنوع رشته های دانشگاهی بیشتر بروز پیدا می کند. زمان بندی کلاس های دانشگاهی یکی از پرکاربردترین حوزه های زمان بندی است که بصورت تخصیص دروس به مقاطع زمانی با توجه به منابع و در نظر گیری محدودیت هایی تعریف می شود. این مسئله برای هر موسسه آموزشی با توجه به مطلوبیت های خاص آن موسسه متفاوت بیان می شود. در این پژوهش پس از اشاره به پیشینه پژوهش در کشورهای مختلف و اهمیت بررسی آن، به تعریف و مدلسازی فازی مسئله زمان بندی کلاس ها پرداخته شده و در پایان روی برنامه گروه مهندسی صنایع دانشگاه شیراز پیاده سازی شده است. براساس نتایج بدست آمده از حل نرم افزاری مدل توانسته ایم حل دقیقی برای مسئله بدست آوریم. **کلمات کلیدی:** تحقیق در عملیات؛ زمان بندی؛ مقاطع زمانی؛ محدودیت ها؛ مطلوبیت ها؛ مدلسازی فازی

نام نویسنده مسئول: سینا ایاسه

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

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳

تاریخ (های) اصلاح مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

### ۱- مقدمه

هوش محاسباتی و در راس آن سیستم های فازی بصورت چشمگیری در اکثر علوم ورود کرده اند. سیستم های فازی قابلیت بالایی در تقریب توابع، درخت تصمیم گیری و ... دارند. تحقیقات بسیار زیادی در زمینه سیستم های فازی انجام شده و روش های بسیار زیادی نیز ارائه و بررسی شده است [۵-۱]. سیستم های فازی دارای چندین نوع هستند که می توان به سیستم های فازی نوع-۱ و سیستم های فازی نوع-۲، که از مهم ترین و معروف ترین انواع آن هستند، اشاره کرد [۹-۶]. همانطور که گفته شد، سیستم های فازی در زمینه های مختلفی و برای کاربردهای گوناگونی بکار می رود. تعیین جداول زمان بندی یکی از مباحث مهم تحقیق در عملیات در زمینه برنامه ریزی است که در حوزه های برنامه ریزی حرکت قطارها، چراغ های راهنمایی، مسابقات ورزشی و رویدادهایی از این قبیل بکار می رود. از آنجایی که در دانشگاه ها نیز برنامه ریزی برای از بین بردن تداخل ها و افزایش رضایت کارکنان و دانشجویان اهمیت ویژه ای دارد در این مقاله به این حیطه پرداخته می شود. طراحی جدول زمان بندی دروس دانشگاه امروزه یکی از مشکلات کارکنان آموزش دانشگاه ها می باشد. با گسترش رشته های تحصیلی و ثبت نام دانشجویان نیاز به یک برنامه که بتواند نیاز جامعه دانشگاهی کشور را برآورده نماید بیش از پیش دیده می شود. برگس و همکاران برنامه ریزی درسی دانشگاه ها و دیگر موسسات را تخصیص وظایف به منابع و نیروی انسانی تعریف می کنند [۱۰]. چون این تخصیص محدود به قوانین کلی و مقررات موسسه مزبور می شود بنابراین برنامه ریزی هر موسسه حالت خاص خود را دارد. باتوجه به پیچیدگی مسئله زمان بندی دروس دانشگاهی در حدود نیم قرن گذشته انواع زیادی از مسائل جداول زمانی پیشنهاد شده که از نظر نوع سازمان مورد نظر و قیدها و روش حل متفاوت اند.

در سال ۱۹۹۸ در زمینه زمان بندی کلاس های دبیرستانی وود مدلی غیرخطی ارائه نموده است [۱۱]. داسکالکی از جمله کسانی است که در مدل عدد صحیح کلاس درس تلاش های بسیار نموده است. وی ابتدا مسئله

زمان بندی مربوط به کلاس های دبیرستان را حل نمود [۱۲] و مدل عدد صحیح

را برای مسئله زمان بندی کلاس های دانشگاهی پیشنهاد کرد و سپس آن را به صورت مطالعه موردی پیاده سازی نموده است [۱۳]. چندی بعد در ایران نیز پژوهشی با عنوان مدل عدد صحیح برای مسئله زمان بندی کلاس های دانشگاهی و مطالعه موردی در دانشگاه امیرکبیر توسط زنجیرانی فراهانی و حاجی یخچالی انجام شد [۱۴]. یک گام فراتر از آن را علیرضایی و همکاران برای بهبود این مسئله به کمک مدل سازی دومرحله ای برنامه ریزی ریاضی برداشتند [۱۵]. الیاکوب و شرالی یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط برای این مسئله پیشنهاد دادند [۱۶]. رنجبر و رستمی با استفاده از یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح خطی، مدلی را برای مسئله برنامه ریزی درسی دانشگاه طراحی کرده اند و در دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه فردوسی مشهد پیاده سازی کردند [۱۷]. برگس و همکاران به صورت موردی برنامه درسی دپارتمان آمار دانشگاه UTPE را با توجه به تمایلات اساتید و قواعد کلی دپارتمان با استفاده از یک مدل برنامه ریزی فازی در مدت کوتاهی تهیه کرده اند [۱۰]. دو مدل عدد صحیح خطی توسط عبداللهی و اسماعیلیان در سال ۲۰۱۵ ارائه شده و این دو مدل در مقاله ای مقایسه شده اند [۱۸]. مقدسی رستمی نیز این مسئله را روی یک نمونه با مدل ریاضی غیرخطی مورد مطالعه قرار داد [۱۹].

در این تحقیق سعی کرده ایم با در نظر گیری محدودیت هایی نظیر عدم

تداخل دروس هم ترم و تخصیص مقطع زمانی ثابت و زوج و فرد به دروسی که واحد آن ها عددی فرد است، علاوه بر محدودیت های کلی مسئله Time Tabling کارایی پاسخ به دست آمده از مدل را بیشتر کنیم. به منظور افزایش سرعت روند برنامه ریزی در پایان، مدل با نرم افزار GAMS حل و گزارش گیری شده است.

### ۲- تعریف مسئله

مسئله زمان بندی کلاس های درس بصورت " فرآیند تخصیص دروس دانشگاهی به زمان های مشخص از برنامه هفتگی با در نظر گرفتن کلاس مناسب و امکانات مورد نیاز ارائه دروس " تعریف می گردد. بطور معمول اهداف مؤسسات

در سال ۱۹۹۸ در زمینه زمان بندی کلاس های دبیرستانی وود مدلی غیرخطی ارائه نموده است [۱۱]. داسکالکی از جمله کسانی است که در مدل عدد صحیح کلاس درس تلاش های بسیار نموده است. وی ابتدا مسئله

اختصاص داده شود مقدار یک می‌گیرد.

متغیر کمکی  $YY_{ijtan}$  نیز وابسته به متغیر اصلی است و در صورتی که بازه زمانی  $t$  از روز  $i$  به درس  $j$  و کلاس  $a$  و استاد  $n$  تخصیص داده شود مقدار یک می‌گیرد.

### ۳-۴- محدودیت‌ها

$$\sum_{j \in A, C_{jn}=1} \sum_{k \leq V_j} \sum_{a \in R} X_{wijktan} \leq 1$$

$$\forall w \in E, i \in D, t \in P, n \in N, \quad (1)$$

$$\sum_{a \in R} \sum_{n \in N, C_{jn}=1} \sum_{k \leq V_j} X_{wijktan} + \sum_{a \in R} \sum_{n \in N, C_{jn}=1} \sum_{k \leq V_j} X_{wifktan} \leq H_{jf} + 2(1 - H_{jf})$$

$$\forall w \in E, i \in D, j \in A, f \in A, t \in P, j \neq f, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in A} \sum_{k \in V_j} \sum_{n \in N, C_{jn}=1} X_{wijktan} \leq 1$$

$$\forall w \in E, i \in D, t \in P, a \in R, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in A, C_{jn}=1} \sum_{k \leq V_j} \sum_{a \in R} X_{wijktan} \leq S_{itn}$$

$$\forall w \in E, i \in D, t \in P, n \in N, \quad (4)$$

$$\sum_{w \in E} \sum_{i \in D} \sum_{t \in P} \sum_{a \in R} \sum_{n \in N, C_{jn}=1} X_{wijktan} = 1$$

$$\forall j \in A, k \leq V_j, \quad (5)$$

$$\sum_{b \in AR} X_{wijktan} \leq MR$$

$$\forall w \in E, i \in D, k \leq V_j, l \in LR, t \in P, a \in R, n \in N, C_{jn} = 1, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in A} \sum_{k \leq V_j} \sum_{t \in P} \sum_{a \in R} \sum_{n \in N, C_{jn}=1} X_{wijktan} = 0$$

$$\forall w \in E, i \in D, \quad (7)$$

$$\sum_{w \in E} \sum_{i \in D} \sum_{k \leq V_j} \sum_{t \in P} \sum_{a \in R} X_{wijktan} = V_j \times Y_{jn}$$

$$\forall j \in A, n \in N, C_{jn} = 1, \quad (8)$$

$$X_{wijktan} \leq Y_{jn}$$

$$\forall w \in E, i \in D, j \in A, k \leq V_j, t \in P, a \in R, n \in N, C_{jn} = 1, \quad (9)$$

$$\sum_{w \in E} \sum_{k \leq (\frac{V_j}{2})+1} X_{wijktan} = 2YY_{ijtan}$$

$$\forall i \in D, j \in A, t \in P, a \in R, n \in N, C_{jn} = 1, \quad (10)$$

$$X_{wij1tan} + X_{wij2tan} \leq YY_{ijtan}$$

$$\forall w \in E, i \in D, j \in A, k \leq V_j, t \in P, a \in R, n \in N, C_{jn} = 1, \quad (11)$$

در محدودیت (۱) تداخل برنامه اساتید امکان پذیر نیست به عبارتی یک استاد نمی‌تواند در یک روز و یک بازه زمانی بیش از یک درس ارائه دهد.

محدودیت (۲) اشاره دارد که دروسی که طبق چارت هم‌ترم محسوب می‌شوند نباید در یک روز و در یک بازه زمانی باشند. تداخل برنامه کلاس‌ها ممکن نیست یعنی در یک بازه زمانی بیش از یک درس در یک کلاس ارائه نشود، این موضوع توسط محدودیت (۳) انجام می‌شود.

در محدودیت (۴) زمان‌بندی برنامه دروس باید با توجه به زمان‌هایی که اساتید برای حضورشان به آموزش ارائه داده‌اند باشد. محدودیت (۵) بیان می‌کند که تمامی دروس و تمامی جلسات آن‌ها حتماً زمان‌بندی شوند. کلاس با امکانات موردنیاز درس موجود باشد که این موضوع توسط محدودیت (۶) بررسی می‌شود. محدودیت (۷) دوره‌های زمانی ممنوعه را حذف می‌کند. در محدودیت (۸) تمام جلسات یک درس به یک استاد تخصیص داده می‌شود. محدودیت (۹) به منظور تعریف متغیر کمکی برای محدودیت (۸) آورده شده است. محدودیت (۱۰) بیان می‌دارد در دو هفته هر دو جلسه از یک درس به صورت یک زمان ثابت و در کلاس ثابت برنامه‌ریزی شود و بقیه جلسات بصورت تخصیص در هفته زوج یا فرد بیان شود. محدودیت (۱۱) به منظور تعریف متغیر کمکی برای محدودیت ۱۰ آورده شده است.

آموزشی در این مسئله ارضا مؤثر محدودیت و بدست آوردن یک جواب قابل قبول می‌باشد، در ادامه به تحقیق این مسئله می‌پردازیم.

تعدادی دروس از میان چارت ترمی برای ارائه در ترم موردنظر در نظر گرفته می‌شوند. دروس هم‌ترم برای هر ورودی براساس چارت ترمی دانشجویان مشخص می‌شوند و نباید تداخل داشته باشند. همچنین، تعداد جلسات یک درس در بازه دوهفته‌ای برابر است با تعداد واحد تخصیص داده شده به درس در چارت گروه. علاوه بر این، هر استاد دارای برنامه زمانی حضور در دانشگاه و متخصص در ارائه دروس خاصی می‌باشد که باید بطور مناسب به دروس اختصاص یابد. لازم به ذکر است هر کلاس دارای امکانات مشخصی است و باید بطور مناسب به دروس براساس ویژگی‌های موردنیاز آن‌ها تخصیص یابند. قابل توجه است که بازه‌های زمانی در هر روز هستند که جلسات در آن ساعات برگزار می‌شوند.

### ۳- مدل برنامه‌ریزی فازی

برای حل مسئله زمان‌بندی کلاس‌های دانشگاه‌ها مدل‌های مختلفی ارائه شده است. بعضی از مدل‌های ارائه شده از مدل عدد صحیح استفاده کرده‌اند و بعضی از مدل غیرخطی. مسئله زمان‌بندی کلاس‌های دانشگاهی مطابق با ویژگی‌های هر دانشگاه متفاوت می‌باشد، با این وجود مدل‌های کلی برای مسئله زمان‌بندی کلاس‌های درس دانشگاهی ارائه شده از جمله مدل گسسته، استفاده از الگوریتم ژنتیک یا جستجوی ممنوعه و ... تاکنون بررسی شده‌اند. در ادامه یک روش مدل‌سازی فازی برای این مسئله ارائه و بررسی شده است. لازم به ذکر است که این مدل تابع هدف ندارد و به همین دلیل تابع هدف عدد ثانی همانند صفر در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱- مجموعه‌های مدل

E: مجموعه هفته‌ها

A: مجموعه دروس

D: مجموعه روزهای هر هفته

K: جلسات یک درس

P: بازه‌های زمانی یک روز

R: مجموعه کلاس‌ها

LR: مجموعه دروسی که برای تدریس به دیتا نیازمند هستند.

AR: مجموعه کلاس‌های دارای دیتا پروژکتور

N: مجموعه اساتید

M: مجموعه اساتید عضو هیات علمی

k: مجموعه جلسات یک کلاس از ۱ تا عدد بزرگترین جلسه

### ۳-۲- مقادیر، پارامترها و جداول ورودی

MR: تعداد کلاس‌هایی که پروژکتور دارند.

Vj: تعداد جلسات درس j

Ui: بازه‌های زمانی ممنوع شده روز i

Hjf: دروس j و f هم‌ترم هستند یا خیر

Sitn: استاد n در روز i در بازه زمانی t حضور دارد یا خیر

Cjn: استاد n توانایی ارائه درس j را دارد یا خیر

### ۳-۳- متغیرهای مدل

متغیر باینری  $X_{wijktan}$  در صورتی که مقدار یک را بگیرد بیانگر این است که جلسه k ام درس j در هفته w روز i بازه زمانی t در کلاس a و توسط استاد n ارائه می‌شود.

متغیر کمکی  $Y_{jn}$  وابسته به متغیر اصلی است و اگر درس j به استاد n

جدول ۱: خروجی نرم‌افزار برای هفته‌های فرد

هفته فرد		شنبه		یکشنبه		دوشنبه		سه‌شنبه		چهارشنبه	
مقطع زمانی	کلاس	استاد	درس	استاد	درس	استاد	درس	استاد	درس	استاد	درس
۸-۱۰	۱۰۸	W	MIS	P	ریاضی ۱	W	MIS	C	تولید	V	محاسبات
	۲۰۳	O	جبر خطی	H	احتمال	G	کنترل پروژه	G	طراحی آزمایش		
	۳۰۴/۲	P	ریاضی ۱	Q	ریاضی ۲	S	معادلات	I	بهینه سازی		
۱۰-۱۲	۱۰۸					C	اقتصاد مهندسی	O	جبر خطی	D	حسابداری
	۲۰۳	J	آمار			J	آمار	R	اقتصاد ۲		
	۳۰۴/۲	Y	فیزیک ۱					C	تولید		
۱۳:۳۰	۱۰۸			G	زمان بندی پروژه						
-	۲۰۳	I	تحقیق ۱	Y	فیزیک ۱						
۱۵:۳۰	۳۰۴/۲			Z	فیزیک ۲	G	طراحی آزمایش				
۱۵:۳۰	۱۰۸	A	تصمیم گیری	R	اقتصاد ۲	H	کنترل کیفیت	M	شبیه سازی		
	۲۰۳	U	ارگونومی	G	زمان بندی پروژه	B	مبانی برق	E	ارزیابی کار و زمان		
	۳۰۴/۲			U	ایمنی و بهداشت	L	روش تولید	I	تحقیق ۱	K	مدیریت
۱۷:۳۰	۱۰۸	F	موجودی	B	مبانی برق	N	نت			T	استاتیک
-	۲۰۳	N	نت	U	ایمنی و بهداشت	T	استاتیک			E	تحقیق ۲
۱۹:۳۰	۳۰۴/۲	U	ارگونومی	X	طراحی ایجاد صنایع	L	کنترل عددی	E	تحقیق ۲	A	تصمیم گیری

جدول ۲: خروجی نرم‌افزار برای هفته‌های زوج

هفته زوج		شنبه		یکشنبه		دوشنبه		سه‌شنبه		چهارشنبه	
مقطع زمانی	کلاس	استاد	درس	استاد	درس	استاد	درس	استاد	درس	استاد	درس
۸-۱۰	۱۰۸	W	MIS	P	ریاضی ۱	C	اقتصاد مهندسی	Q	ریاضی ۲	V	محاسبات
	۲۰۳	O	جبر خطی	H	احتمال	G	کنترل پروژه	G	طراحی آزمایش		
	۳۰۴/۲	S	معادلات	Q	ریاضی ۲	S	معادلات	I	بهینه سازی		
۱۰-۱۲	۱۰۸			M	شبیه سازی	C	اقتصاد مهندسی	H	کنترل کیفیت	D	حسابداری
	۲۰۳					J	آمار	R	اقتصاد ۲		
	۳۰۴/۲	Y	فیزیک ۱			D	حسابداری	C	تولید		
۱۳:۳۰	۱۰۸	Z	فیزیک ۲	G	زمان بندی پروژه	I	بهینه سازی	F	موجودی		
-	۲۰۳	I	تحقیق ۱								
۱۵:۳۰	۳۰۴/۲			Z	فیزیک ۲			G	کنترل پروژه		
۱۵:۳۰	۱۰۸					H	کنترل کیفیت	M	شبیه سازی	L	کنترل عددی
	۲۰۳			L	روش تولید			E	ارزیابی کار و زمان		
	۳۰۴/۲			X	طراحی ایجاد صنایع	L	روش تولید	H	احتمال	K	مدیریت
۱۷:۳۰	۱۰۸	F	موجودی	B	مبانی برق	N	نت				
-	۲۰۳			U	ایمنی و بهداشت	T	استاتیک	E	ارزیابی کار و زمان	E	تحقیق ۲
۱۹:۳۰	۳۰۴/۲	U	ارگونومی	X	طراحی ایجاد صنایع	L	کنترل عددی			A	تصمیم گیری

## ۴- مطالعه موردی

شده‌اند.

## ۵- نتیجه گیری

باتوجه به مزایای بسیاری که استفاده از سیستم های منطق فازی دارا می باشند، در این مقاله، با استفاده از یک مدل فازی، سعی شده است که یک برنامه ریزی مناسب برای زمان بندی کلاس های دانشگاهی ارائه شود. باتوجه به اینکه زمان بندی دروس دانشگاهی در ابتدای هر ترم زمان زیادی می گیرد و هزینه بر است نیاز به یک ابزار تصمیم گیری حس می شود که با دریافت ورودی ها، خروجی مدنظر را به کاربر ارائه دهد. بعد از بررسی و مدل سازی مسئله تخصیص کلاس های درسی، مشاهده می شود که این مدل، قادر به ارائه جواب دقیق برای مسئله است و با هزینه اندکی کارکنان و دانشجویان را به اهداف خود می رساند. پژوهشگر علاقمند می تواند این سیستم را با تخصیص ضریب هزینه در تابع هدف بهبود بخشد.

به منظور بررسی توانمندی مدل ارائه شده پس از نگارش مسئله در نرم افزار GAMS داده های واقعی مربوط به نیمسال دوم تحصیلی ۹۹-۹۸ گروه مهندسی صنایع دانشگاه شیراز به نرم افزار داده شده و نتایج به دست آمده در جدول ۱ و ۲ قابل مشاهده است.

مجموعه ۳۴ درس کارشناسی و کارشناسی ارشد گروه صنایع به صورت ۱ تا ۳۴ و ۲۶ استاد به صورت ۱ تا ۲۶ و کلاس های ۱۰۸ و ۲۰۳ و ۳۰۴/۲ به صورت ۱ تا ۳ تا به مدل داده شده اند. هر سه کلاس دارای سیستم دیتا پروژکتور هستند. استاد ۷، ۸، ۹، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۹ عضو هیات علمی هستند. ۵ مقطع زمانی در روز وجود دارد که شامل ۸-۱۰، ۱۰-۱۲، ۱۳:۳۰-۱۵:۳۰، ۱۵:۳۰-۱۷:۳۰ و ۱۷:۳۰-۱۹:۳۰ می باشند. هر هفته ۵ روز کاری (شنبه تا چهارشنبه) دارد. برنامه دوهفته ای به صورت هفته ۱، فرد و هفته ۲، زوج بدست آمده است. در جدول (۱) و (۲) اساتید به ترتیب ۱ تا ۲۶ با حروف A تا Z نمایش داده

## مراجع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Tian MW, Mohammadzadeh A, Tavooosi J, Mobayen S, Asad JH, Castillo O, Várkonyi-Kóczy AR. A deep-learned type-3 fuzzy system and its application in modeling problems. *Acta Polytech Hung*. 2022 Jan 1;19(2).
- [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. Control engineering solutions during epidemics: A review. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2021;39(2):97-106.
- [6] Tavooosi J. An experimental study on inverse adaptive neural fuzzy control for nonlinear systems. *International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems*. 2020 Jan 1;24(2):135-43.
- [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] Zhang HK, Wang YF, Wang DH, Wang YL. Adaptive robust control of oxygen excess ratio for PEMFC system based on type-2 fuzzy logic system. *Information Sciences*. 2020 Feb 1;511:1-7.
- [9] Huang H, Shirkhani M, Tavooosi J, Mahmoud O. A new intelligent dynamic control method for a class of stochastic nonlinear systems. *Mathematics*. 2022 Apr 22;10(9):1406.
- [10] Borges, A., Leite, A., Ospina, R., Silva, G., "Integer Programming Model for University Courses Timetabling: A Case Study", 2014.
- [11] Wood, J., Whitaker, D., "Student Centred School Timetabling", *The Journal of the Operational Research*, 1146-1152, 1998.
- [12] Daskalki, S., Birbas, T., "Efficient Solution for A University Timetabling Problem Through Integer Programming", *European Journal of Operational Research*, 2003.
- [13] Daskalki, S., Birbas, T., Housos, E., "An Integer Programming Formulation for A Case Study In University Timetabling", *European Journal of Operational Research*, 117-135, 2004.
- [۱۴] زنجیرانی فراهانی، رضا؛ حاجی یخچالی، سیامک؛ مدل عدد صحیح برای مسئله زمان بندی کلاس های دانشگاهی: یک مطالعه موردی، چهارمین کنفرانس مهندسی صنایع، تهران، ۱۳۸۴.
- [۱۵] علیرضایی، محمدرضا؛ خلیلی، مسعود؛ منصورزاده، سید مهدی؛ برنامه ریزی درسی در دانشگاه به کمک مدل سازی دومرحله ای برنامه ریزی ریاضی، شماره ۱۷ دوماهنامه علمی-پژوهشی دانشگاه شاهد، ۹۶-۹۷، تهران، ۱۳۸۵.
- [16] Al-Yakoob, S.M., Sherali, H.D., "A Mixed Integer Programming Approach to A Class Timetabling Problem: A Case Study with Gender Policies and Traffic Consideration", *European Journal of Operational Research* 180, 1028-1044, 2007.
- [17] Ranjbar, M., Rostami, S., "Fortnightly Course Scheduling Problem: A Case Study", 2nd International Industrial Engineering Conference, The 5th Int. Conference of The Iranian Society of Operations Research, 2012.
- [۱۸] عبداللهی، مریم؛ اسماعیلیان، مجید؛ زمان بندی کلاس های درس با استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح، شماره ۴۱ فصل نامه علمی-پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۶۳-۱۸۷، ۱۳۹۴.
- [۱۹] مقدسی رستمی، مصطفی؛ ارائه مدل ریاضی جهت زمان بندی و تخصیص کلاس های دانشگاهی، اولین کنفرانس بین المللی مدیریت حسابداری و علوم تربیتی، تهران، ۱۳۹۴.

# Machine Learning-based Flexible Link Robot Control

Ali Abdali <sup>1,\*</sup> and Verya Monjezi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Control Systems and Instrumentation Department of Iranian Offshore Oil Company, Kharg, Bushehr 7546143572, Iran

<sup>2</sup> Computer Science Department, University of Texas at El Paso, TX79968, USA

E-mail addresses: [ali.ebdali@gmail.com](mailto:ali.ebdali@gmail.com) ; [vmonjezi@miners.utep.edu](mailto:vmonjezi@miners.utep.edu)

\*Corresponding author

Received: 2023/08/03, Revised: 2023/08/30, Accepted: 2023/09/02.

## Abstract

Fuzzy systems have recently attracted the attention of researchers and various methods based on fuzzy logic systems have been presented. This paper presents a novel adaptive neuro fuzzy inference system based on interval Gaussian type-2 fuzzy sets in the antecedent part and Gaussian type-1 fuzzy sets as coefficients of linear combination of input variables in the consequent part. The capability of the proposed ANFIS2 for function approximation and dynamical system identification is remarkable. The structure of ANFIS2 is very similar to ANFIS but in ANFIS2 a layer is added for purpose to type reduction. An adaptive learning rate-based backpropagation with convergence guaranteed is used for parameter learning. Finally, the proposed ANFIS2 are used to control of a flexible link robot arm. Simulation results shows the proposed ANFIS2 with Gaussian type-1 fuzzy set as coefficients of linear combination of input variables in the consequent part has good performance and high accuracy but more training time.

## Keywords

ANFIS, Interval Type-2 Fuzzy Sets, Inverse Control, Flexible Link Robot.

## 1. Introduction

High computation ability, adaptability and parallel processing are the important advantages of neural networks [1-5]. Using the knowledge of expert man as if-then rules and having real concept of parameters are the advantages of fuzzy systems. Among hybrid fuzzy neural networks, ANFIS is very popular and widespread. ANFIS is very simple and intelligible so it has affected many areas such as geography, medical Sciences, meteorological science, chemical and petroleum engineering and etc. [6-8]. A flexible link arm is a distributed parameter system of infinite order, but must be approximated by a lower-order model and controlled by a finite-order controller due to onboard computer limitations, sensor inaccuracy, and system noise. The so-called “control spillover” and “observation spillover” effects then occur, which under certain conditions can lead to instability [9,10].

In recent ten years, type-2 fuzzy logic with more capabilities and more flexibility than type-1 fuzzy logic has been investigated. Castillo et al. investigated type-2 fuzzy logic in more details [11]. Huang and Chen [12] used the combination of quantum inspired bacterial foraging algorithm (QBFA) and recursive least squares (RLS) to tune a type-2 fuzzy system. Tavooosi et al. proposed a different architecture of interval type-2 takagi-sugeno-kang fuzzy neural network [13-15]. They proposed an ANFIS based on type-2 fuzzy sets. Shahnazi [16] used type-2 fuzzy systems to approximate the unknown nonlinearities in MIMO systems control problem. He derived all the adaptive laws via Lyapunov synthesis approach.

Not much study has been done on fuzzy systems with type-1 (or type-2) fuzzy sets in the consequent part. In most of papers the consequent part is singleton [17] or interval type-1 fuzzy sets [18-20] up to now. In continue some of the works in this area are reviewed. In [21] interval type-2 fuzzy integrators in ensembles of ANFIS models for the time series prediction is used. Genetic algorithm is used to optimize of the proposed model. The equations of Type-2 ANFIS and its optimization are not presented. In [22] interval type-2 adaptive network-based fuzzy inference system with type-2 non-singleton fuzzification have introduced. Interval type-1 fuzzy sets have been used as consequent parameters. Mendez and Hernandez [23] presented a type-2 fuzzy ANFIS that interval type-1 non-singleton fuzzy numbers are the inputs and type-2 TSK FLS is the output and the consequent parameters are estimated by the recursive least-squares (RLS) method. They didn't provide further details of learning equations. Bhattacharyya et al. [24] proposed a type-2 fuzzy ANFIS that an interval type-2 fuzzy logic is used to combine the different outputs of the ANFIS classifiers to produce a final optimal result.

Tavooosi and Badamchizadeh proposed a type-2 Takagi-Sugeno-Kang fuzzy neural network with linear consequent part to system identification and modeling in [25]. Rule pruning was the novelty of that paper. Higher learning speed was the goal by reducing the parameter in both antecedent and consequent parts. Tavooosi et al. presented a new method to stability analysis of a class of type-2 fuzzy system in [26]. In [27], Jahangiri et al. proposed a method for stability analysis of a class of neural networks. In [28] a new method to MIMO type-2

fuzzy stability analysis has been presented. Robot manipulators have become increasingly important in the field of flexible automation. So, modeling and control of robots in automation will be very important. Some literatures used fuzzy logic to robot control [29-32].

This paper presents a novel ANFIS based on type-2 fuzzy named ANFIS2. The proposed method uses Interval Gaussian type-2 fuzzy sets in the antecedent part and Gaussian type-1 fuzzy sets as coefficients of linear combination of input variables in the consequent part. The paper is organized as follows. In section 2, type-2 fuzzy systems is viewed. In section 3, the structure of ANFIS2 is investigated. Parameter identification is given at the end of this section. In section 4, learning convergence of ANFIS2 based on lyapunov theory is derived. In section 5, the simulation studies are presented for identification of three nonlinear systems. Finally, Section 6 gives the conclusions of the advocated design methodology.

## 2. A Review on Type-2 Fuzzy Systems

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.

Some difficulties of type-1 fuzzy logic can be solved by using type-2 fuzzy logic. In some systems such as time-series prediction, the exact membership degree is determined in a very difficult manner due to their complexity and their noisy information [33]. So, using type-2 fuzzy systems for describing behavior of these systems can be useful. In [34], some disadvantages of type-1 fuzzy sets are mentioned.

Fig. 1 shows the Gaussian primary membership function and Gaussian secondary membership function. For example, if  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$  and  $x = 1$  then degree of membership is 0.6, if this membership degree is too fuzzy or  $\tilde{0.6}$  then primary membership is Gaussian type-1 fuzzy set with  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$  and secondary membership is Gaussian type-1 fuzzy set with  $m = 0.6$ ,  $\sigma = 0.1$ .

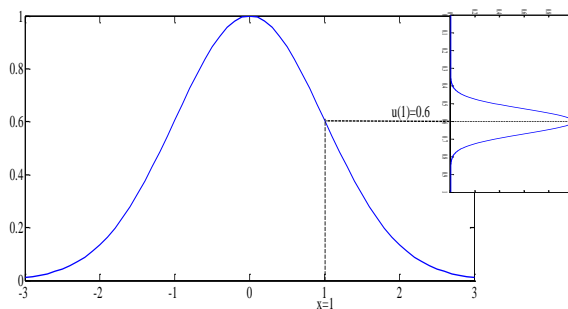


Fig. 1. Gaussian primary and secondary membership functions.

Note that, when secondary membership is not Gaussian type-1 fuzzy set and it is equal to one and in other words secondary membership function is interval set with one magnitude, then fuzzy set called interval type-2 fuzzy set.

Two cases of interval type-2 fuzzy sets are shown in Fig. 2. In Fig. 2-a, a case of a fuzzy set characterized by

a Gaussian membership function with mean  $m$  and a standard deviation that can take values in  $[\sigma_1, \sigma_2]$  and in Fig. 2-b, a case of a fuzzy set with a Gaussian membership function with a fixed standard deviation  $\sigma$ , but an uncertain mean, taking values in  $[m_1, m_2]$  and are shown.

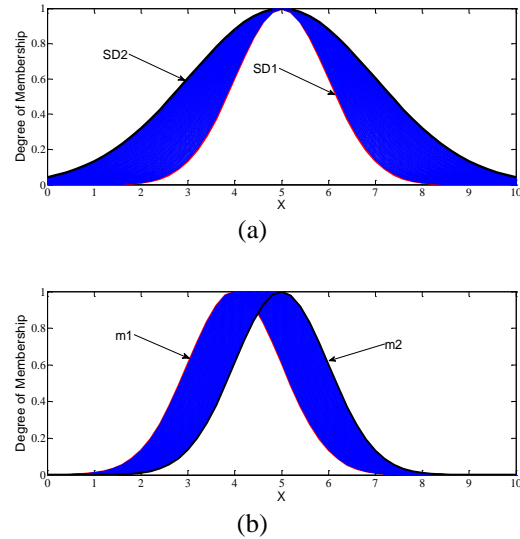


Fig. 2. a) Uncertainty in standard deviation b) uncertainty in mean.

In this paper Gaussian membership function with fixed standard deviation  $\sigma$  and uncertain mean is used (Fig. 2. b).

## 3. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System by Type-2 Fuzzy Sets (ANFIS2)

Similar to type-1 TSK fuzzy systems, the output of type-2 TSK fuzzy systems is a function of their inputs. But in type-2 fuzzy systems the output and its coefficients are type-1 fuzzy sets. In this paper, the proposed ANFIS2 has seven layers that its structure is shown in Fig 3. The two rules of ANFIS2 can be described as follows:

$$R^1: \text{if } x_1 \text{ is } \tilde{A}_1 \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{B}_1 \text{ then } \tilde{y}_1 = \tilde{r}_1 + \tilde{p}_1 x_1 + \tilde{q}_1 x_2$$

$$R^2: \text{if } x_1 \text{ is } \tilde{A}_2 \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{B}_2^k \text{ then } \tilde{y}_2 = \tilde{r}_2 + \tilde{p}_2 x_1 + \tilde{q}_2 x_2 \quad (1)$$

Where  $x_i (i = 1, 2)$  are inputs,  $\tilde{y}_k (k = 1, 2)$  is output of the  $k$ th rule which it is type-1 fuzzy set (since it is a linear combination of Gaussian type-1 fuzzy sets),  $\tilde{A}_i^k$  are antecedent interval type-2 fuzzy sets,  $\tilde{r}_k$ ,  $\tilde{p}_k$  and  $\tilde{q}_k (k = 1, 2)$  are Gaussian type-1 fuzzy sets. For simplicity in description, we select only two inputs and two rules but the proposed ANFIS2 can be generalized to  $n$ -inputs and  $m$ -rules ( $n, m \in N$ ).

The forward-propagation procedure is described as follows:

**Layer 0:** This layer is inputs layer. The number of nodes in this layer is equal to the number of inputs.

**Layer 1:** This layer is fuzzification layer. The output of this layer as follows:

$${}^1\mu_{k,i}(x_i, [\sigma_{k,i}, {}^1m_{k,i}]) = e^{-.5\left(\frac{x_i - {}^1m_{k,i}}{\sigma_{k,i}}\right)^2} \quad (4)$$

$${}^2\mu_{k,i}(x_i, [\sigma_{k,i}, {}^2m_{k,i}]) = e^{-5\left(\frac{x_i - {}^2m_{k,i}}{\sigma_{k,i}}\right)^2} \quad (3)$$

Where  $m_{k,i} \in [{}^1m_{k,i}, {}^2m_{k,i}]$  is uncertain mean for  $k$ th rule and  $i$ th input.

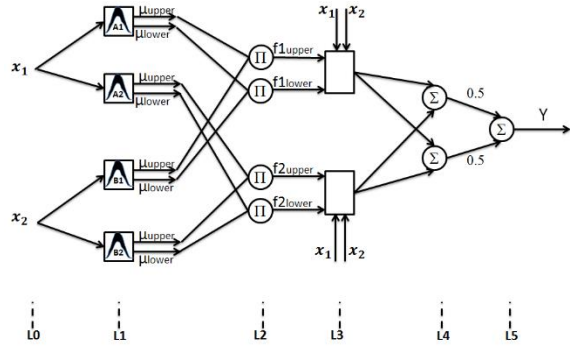


Fig. 3. The structure of ANFIS2.

$$\bar{\mu}_{k,i}(x_i) = \begin{cases} {}^1\mu_{k,i}(x_i, [\sigma_{k,i}, {}^1m_{k,i}]), & x_i < {}^1m_{k,i} \\ 1, & {}^1m_{k,i} \leq x_i \leq {}^2m_{k,i} \\ {}^2\mu_{k,i}(x_i, [\sigma_{k,i}, {}^2m_{k,i}]), & x_i > {}^2m_{k,i} \end{cases} \quad (4)$$

$$\underline{\mu}_{k,i}(x_i) =$$

$$\begin{cases} {}^2\mu_{k,i}(x_i, [\sigma_{k,i}, {}^2m_{k,i}]), & x_i \leq \frac{{}^1m_{k,i} + {}^2m_{k,i}}{2} \\ {}^1\mu_{k,i}(x_i, [\sigma_{k,i}, {}^1m_{k,i}]), & x_i > \frac{{}^1m_{k,i} + {}^2m_{k,i}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

Where  $\bar{\mu}_{k,i}$  is upper membership degree and  $\underline{\mu}_{k,i}$  is lower membership degree.

**Layer 2:** This is ruling layer. Each output node represents the lower ( $\underline{f}^k$ ) and upper ( $\bar{f}^k$ ) firing strength of a rule:

$$\underline{f}^k = \prod_{i=1}^n \underline{\mu}_{k,i} \quad ; \quad \bar{f}^k = \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_{k,i} \quad (6)$$

**Layer 3:** This is consequent layer.

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= \tilde{r}_1 + \tilde{p}_1 x_1 + \tilde{q}_1 x_2 \\ \tilde{y}_2 &= \tilde{r}_2 + \tilde{p}_2 x_1 + \tilde{q}_2 x_2 \\ &\vdots \\ \tilde{y}_k &= \tilde{r}_k + \tilde{p}_k x_1 + \tilde{q}_k x_2 \end{aligned} \quad (7)$$

$\tilde{r}_k, \tilde{p}_k$  and  $\tilde{q}_k$  ( $k = 1, 2$ ) are consequent coefficient that they are Gaussian type-1 fuzzy sets. Note that (7) can be extended to  $\tilde{y}_k$  ( $k = 1, \dots, n$ ). In this paper for simplicity  $k = 2$ .

**Layer 4:** This layer is used for consequent lower-upper firing points [35].

$$\hat{y}_l = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{f}^k (m_{r_k} \sigma_{r_k} + m_{p_k} \sigma_{p_k} x_1 + m_{q_k} \sigma_{q_k} x_2) + \sum_{k=N+1}^M \underline{f}^k (m_{r_k} \sigma_{r_k} + m_{p_k} \sigma_{p_k} x_1 + m_{q_k} \sigma_{q_k} x_2)}{\sum_{k=1}^N \bar{f}^k (\sigma_{r_k} + \sigma_{p_k} + \sigma_{q_k}) + \sum_{k=N+1}^M \underline{f}^k (\sigma_{r_k} + \sigma_{p_k} + \sigma_{q_k})}$$

$$\hat{y}_r = \frac{\sum_{k=1}^L \underline{f}^k (m_{r_k} \sigma_{r_k} + m_{p_k} \sigma_{p_k} x_1 + m_{q_k} \sigma_{q_k} x_2) + \sum_{k=L+1}^P \bar{f}^k (m_{r_k} \sigma_{r_k} + m_{p_k} \sigma_{p_k} x_1 + m_{q_k} \sigma_{q_k} x_2)}{\sum_{k=1}^L \underline{f}^k (\sigma_{r_k} + \sigma_{p_k} + \sigma_{q_k}) + \sum_{k=L+1}^P \bar{f}^k (\sigma_{r_k} + \sigma_{p_k} + \sigma_{q_k})} \quad (8)$$

**Layer 5:** The single node in this layer computes the output.

$$\hat{y} = \frac{\hat{y}_l + \hat{y}_r}{2} \quad (9)$$

Gradient descent with adaptive learning rate backpropagation is used for learning phase [7].

#### 4. Flexible Link Robot Arm

Consider a single-link robotic manipulator coupled to a brushed direct current motor with a no rigid joint. When the joint is modeled as a linear torsional spring, from the Euler-Lagrange equation, the equations of motion for such an electromechanical system can be derived as:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{q}_1 + F_1 \dot{q}_1 + K \left( q_1 - \frac{q_2}{N} \right) + mgd \cos q_1 &= 0 \\ J_2 \ddot{q}_2 + F_2 \dot{q}_2 + \frac{K}{N} \left( q_1 - \frac{q_2}{N} \right) &= K_t i \\ LDi + Ri + K_b \dot{q}_2 &= u \end{aligned} \quad (10)$$

where  $q_1$  and  $q_2$  are the angular positions of the link and the motor shaft,  $i$  is the armature current, and  $u$  is the armature voltage. The inertias  $J_1, J_2$ , the viscous friction constants  $F_1, F_2$ , the spring constant  $K$ , the torque constant  $K_t$ , the back-emf constant  $K_b$ , the armature resistance  $R$  and inductance  $L$ , the link mass  $M$ , the position of the link's center of gravity  $d$ , the gear ratio  $N$  and the acceleration of gravity  $g$  can all be unknown. A flexible link robot arm is shown in Fig. 4.

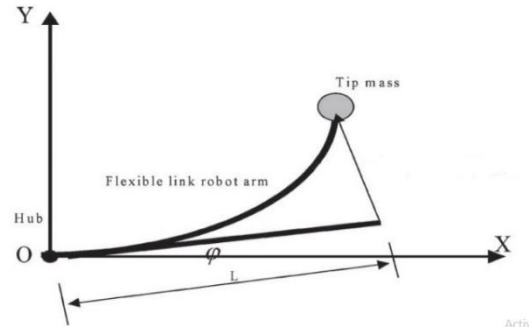


Fig. 4. Configuration of flexible-link robot arm.

#### 5. Simulation Results

In this section, a flexible link robot arm is controlled using ANFIS2. The structure of the robot arm and ANFIS2 based controller is shown in Fig 5. Where the reference signal (desired angle in here) is applied to system then the error between reference signal and the output of robot system (angle of link in here) is calculated. This error must be minimized, so ANFIS2 is adapted to minimize the error.

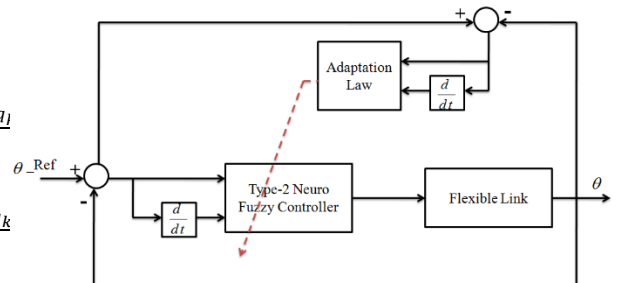


Fig. 5. The structure of the robot arm and ANFIS2 based controller.

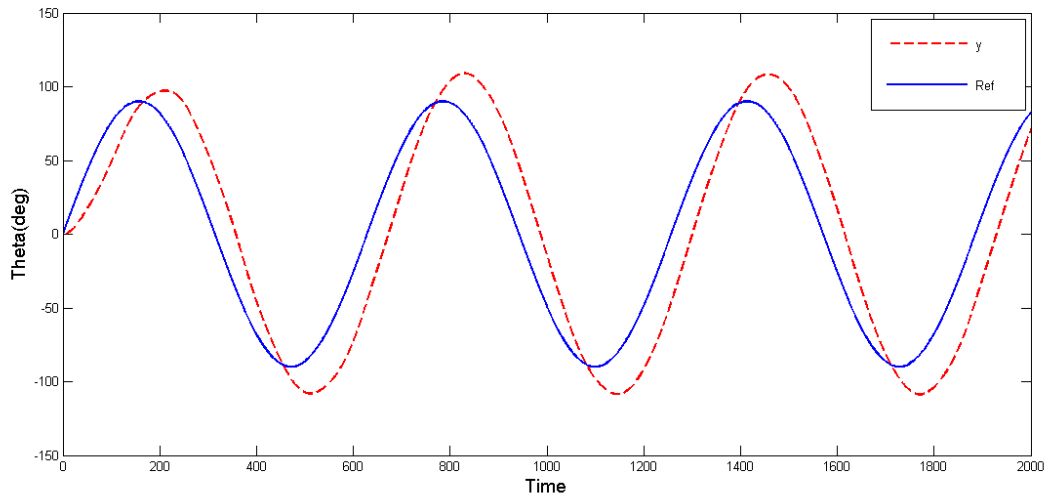


Fig. 6. ANFIS2 based controller with sine angle reference.

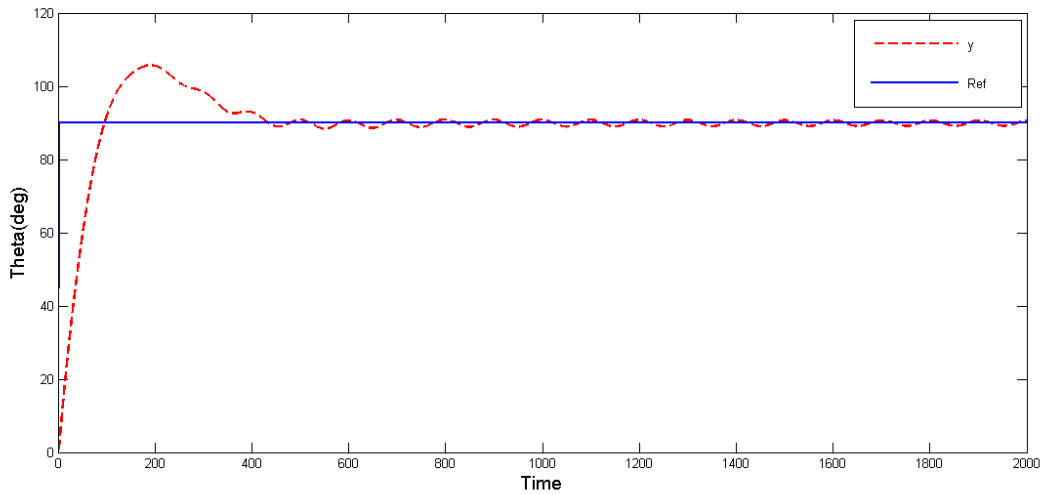


Fig. 7. ANFIS2 based controller with step angle reference.

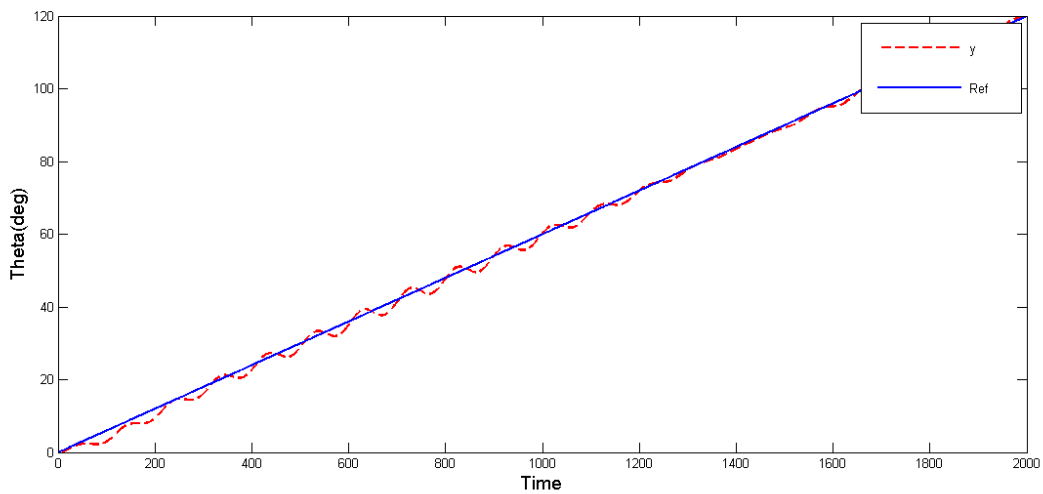


Fig. 8. ANFIS2 based controller with ramp angle reference.

In order to illustrate the effectiveness of the proposed results, the simulation will be conducted to control system, where  $J_1 = 1.625 \text{ kg m}^2$ ,  $J_2 = 1.625 \text{ kgm}^2$ ,  $R = 0.5$  • ,  $K_t = 0.9 \text{ N m/A}$ ,  $K = 0.5868$ ,  $K_b = 0.9 \text{ N m/A}$ ,  $M =$

$4.34 \text{ kg}$ ,  $L = 25.0 \times 10^{-3} \text{ H}$ ,  $g = 9.8 \text{ N/kg}$ ,  $F_1 = 1.625 \times 10^{-2} \text{ N m s/rad}$ ,  $F_2 = 1.625 \times 10^{-2} \text{ N m s/rad}$ ,  $N = 2$ ,  $d = 0.5 \text{ m}$ .

The performance of ANFIS2 with sine angle reference is shown in fig. 6 and the performance of ANFIS2 with step angle reference is shown in fig. 7. Also, figures 5-8 show that adaptive inverse control based on ANFIS2 is suitable and robust strategy to control of a flexible link robot arm.

## 6. Conclusion

In this paper, a novel ANFIS2 was proposed for identification of nonlinear dynamical systems. The proposed ANFIS2 is based on interval Gaussian type-2 fuzzy sets in the antecedent part and Gaussian type-1 fuzzy sets as coefficients of linear combination of input variables in the consequent part that it helps to improve modeling of highly nonlinear systems. Adaptive learning rate helps to prevent the ANFIS2 from trapping into a local minimum and it helps to fast convergence of training algorithm. The test results show the importance and necessity of ANFIS2 to modeling the inverse of uncertain systems and control it.

## References

- [1] J. Tavooosi, A. A. Suratgar, M. B. Menhaj, Nonlinear system identification based on a self-organizing type-2 fuzzy RBFN, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 54 (2016), 26-38.
- [2] Huang H, Shirkhani M, Tavooosi J, Mahmoud O. A new intelligent dynamic control method for a class of stochastic nonlinear systems. *Mathematics*. 2022 Apr 22;10(9):1406.
- [3] Guo X, Shirkhani M, Ahmed EM. Machine-Learning-Based improved smith predictive control for MIMO processes. *Mathematics*. 2022 Oct 9;10(19):3696.
- [4] Aazami R, Heydari O, Tavooosi J, Shirkhani M, Mohammadzadeh A, Mosavi A. Optimal Control of an Energy-Storage System in a Microgrid for Reducing Wind-Power Fluctuations. *Sustainability*. 2022 May 19;14(10):6183.
- [5] 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.
- [6] J. Tavooosi, M. Alaei, B. Jahani, Temperature Control of Water Bath by using Neuro-Fuzzy Controller, 5th Symposium on Advance in Science & Technology, 2011.
- [7] 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.
- [8] J. Tavooosi, M. Alaei, B. Jahani, M.A. Daneshwar, A novel intelligent control system design for water bath temperature control, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5 (12) 1879-1885, 2011.
- [9] 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.
- [10] G.C. Calafiore, A subsystems characterization of the zero modes for flexible mechanical structures, in: *Proceedings of 36th IEEE Conference On Decision and Control, San Diego, CA, 1997*, pp. 1375–1380.
- [11] 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.
- [12] S. Huang, M. Chen, Constructing optimized interval type-2 TSK neuro-fuzzy systems with noise reduction property by quantum inspired BFA, *Neurocomputing* 173 (2015) 1839-1850.
- [13] J. Tavooosi, A. A. Suratgar, M. B. Menhaj, Stable ANFIS2 for Nonlinear System Identification, *Neurocomputing* 182 (2016) 235–246.
- [14] Monjezi V, Trivedi A, Tan G, Tizpaz-Niari S. Information-Theoretic Testing and Debugging of Fairness Defects in Deep Neural Networks. *arXiv preprint arXiv:2304.04199*. 2023 Apr 9.
- [15] 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.
- [16] R. Shahnazi, Observer-based adaptive interval type-2 fuzzy control of uncertain MIMO nonlinear systems with unknown asymmetric saturation actuators, *Neurocomputing* 171 (2016) 1053-1065.
- [17] S.I. Han, J.M. Lee, Recurrent fuzzy neural network backstepping control for the prescribed output tracking performance of nonlinear dynamic systems, *ISA Transactions* 53 (2014) 33–43.
- [18] J. Tavooosi, MA Badamchizadeh, S Ghaemi, Adaptive Inverse Control of Nonlinear Dynamical System Using Type-2 Fuzzy Neural Networks, *Journal of Control* 5 (2) (2011).
- [19] YP Asad, A Shamsi, H Ivani, J Tavooosi, Adaptive Intelligent INverse Control of Nonlinear Systems with Regard to Sensor Noise and Parameter Uncertainty (Magnetic Ball Levitation System Case Study), *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* 9 (1) 148-169.
- [20] T.C. Lin, C.H. Kuo, V.E. Balas, Real-time fuzzy system identification using uncertainty bounds, *Neurocomputing* 125 (2014) 195–216.
- [21] J. Soto, P. Melin, Genetic Optimization of Type-2 Fuzzy Integrators in Ensembles of ANFIS Models for Time Series Prediction, *Recent Advances on Hybrid Approaches for Designing Intelligent Systems Studies in Computational Intelligence* 547 (2014) 79–97.
- [22] H.M. Vaghefi, M.R. Sandgani, M. A. Shoorehdeli, Interval Type-2 Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS) with Type-2 non-singleton fuzzification, *13th Iranian Conference on Fuzzy Systems* (2013) 1–6.
- [23] G.M. Mendez, D.L.A Hernandez, Interval Type-2 ANFIS. In: *Innovations in Hybrid Intelligent Systems*, Springer, Heidelberg (2007) 64–71.
- [24] S. Bhattacharyya, D. Basu, A. Konar, D.N. Tibarewala, Interval type-2 fuzzy logic based multiclass ANFIS algorithm for real-time EEG based movement control of a robot arm, *Robotics and Autonomous Systems* 68 (2015) 104–115.

- [25] J. Tavoosi, M.A. Badamchizadeh, A Class of Type-2 Fuzzy Neural Networks for Nonlinear Dynamical System Identification, *Neural Computing & Application* 23 (3) (2013) 707–717.
- [26] J Tavoosi, AA Suratgar, MB Menhaj, Stability analysis of recurrent type-2 TSK fuzzy systems with nonlinear consequent part, *Neural Computing and Applications* (2015) 1-10.
- [27] F. Jahangiri, A. Doustmohammadi, M.B. Menhaj, An adaptive wavelet differential neural networks based identifier and its stability analysis, *Neurocomputing* 77(2012)12–19.
- [28] J Tavoosi, AA Suratgar, MB Menhaj, Stability Analysis of a Class of MIMO Recurrent Type-2 Fuzzy Systems, *International Journal of Fuzzy Systems* (2016) 1-14.
- [29] J. Tavoosi, A. Shamsi Jokandan, M. A. Daneshwar, A new method for position control of a 2-DOF robot arm using neuro-fuzzy controller, *Indian Journal of Science and Technology* 5 (3) (2012) 2253-2257.
- [30] M.B.B. Sharifian, A. Mirlo, J. Tavoosi, M. Sabahi, Self-adaptive RBF neural network PID controller in linear elevator, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011.
- [31] Jafar Tavoosi, Majid Alaei, Behrouz Jahani, Neuro – Fuzzy Controller for Position Control of Robot Arm, *5th Symposium on Advances in Science and Technology (5thsastech)*, 2011.
- [32] M.B.B Sharifian Jafar Tavoosi, Ahad Mirloo, PMSM Position and Speed Estimation by Moving Horizon Estimation (MHE), *ICEE19\_207*, 2011.
- [33] T. Dereli, A. Baykasoglu, K. Altun, A. Durmusoglu, I.B. Turksen, Industrial applications of type-2 fuzzy sets and systems: A concise review, *Computers in Industry* 62 (2011) 125–137.
- [34] J.R. Castro, O. Castillo, L.G. Martínez, an Interval Type-2 Fuzzy Logic Toolbox for Control Applications, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, London (2007) 1–6.
- [35] C.J. Chen, S.M. Yang, Z.C. Wung, System Identification by Neuro-Fuzzy Model with Sugeno and Mamdani Fuzzy Rules, *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A* 41 (4) (2009) 263 – 270.

## Finite element analysis of deformations and errors caused by temperature changes on the CMM device

Farshad rabiei <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran  
E-mails: [F.rabiei@ilam.ac.ir](mailto:F.rabiei@ilam.ac.ir)

### Abstract

Coordinate measuring device (CMM), one of the measuring devices for reverse engineering that requires constant environmental and environmental conditions. This change of conditions may be unavoidable due to the need of the industry to enter the devices into the workshop environment, and changes are applied to the device structures. This change causes non-uniform deformation and distortion of the structure as well as the code rulers of the device, which affects the measurement results. In this research, in order to investigate the effect of changing environmental conditions on the CMM device and investigate the errors caused by it, the three-dimensional model of the CMM device was designed in ANSYS finite element software and by applying the difference between the ambient temperature and the temperature of the structure, the unstable thermal analysis of the device was performed. has been The overall shape of the structure and the rulers have been changed. For the purpose of validation, the results obtained from the amount of displacement of the rulers and the building of the structure have been compared with the existing analytical relationships, and a very acceptable match is observed. Also, the analysis of deformations and general distortion of the structure has resulted in results regarding the improvement of the design and materials used in the structure.

### Keywords

CMM device, temperature change error, unsteady heat transfer

## تحلیل اجزا محدود تغییرشکلها و خطاهای ناشی از تغییرات دما بر روی دستگاه CMM

فرشاد ربیعی<sup>۱\*</sup>

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

ایمیل نویسندگان: [f.rabiei@ilam.ac.ir](mailto:f.rabiei@ilam.ac.ir)

## چکیده

دستگاه اندازه‌گیری مختصات<sup>۱</sup> (CMM)، یکی از وسایل اندازه‌گیری جهت مهندسی معکوس بوده که نیازمند شرایط محیطی و دمایی ثابت است. تغییر این شرایط به دلیل نیاز صنعت به ورود این دستگاه‌ها به محیط کارگاهی اجتناب ناپذیر بوده و تغییرات دمایی به سازه دستگاه اعمال می‌شود. این تغییرات منجر به تغییر شکل و اعوجاج غیریکنواخت سازه و نیز خطکشی‌های کدی دستگاه می‌شود که نتایج اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق به منظور بررسی اثر تغییر شرایط محیطی بر روی دستگاه CMM و بررسی خطاهای ناشی از آن، مدل سه‌بعدی دستگاه CMM در نرم افزار اجزا محدود ANSYS طراحی شده و با اعمال اختلاف دمای محیط با دمای سازه، تحلیل حرارتی ناپایای دستگاه انجام شده است. تغییر شکل کلی سازه و خطکشی‌ها به دست آمده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج به دست آمده از میزان جابه جایی خطکشی‌ها و ساختمان سازه با روابط تحلیلی موجود مقایسه شده‌اند که تطابق بسیار قابل قبولی مشاهده می‌شود. همچنین تحلیل تغییرشکلها و اعوجاج کلی سازه منتج به نتایجی در خصوص بهبود طراحی و مواد به کار رفته در سازه شده است.

**کلمات کلیدی:** دستگاه CMM، خطای تغییر درجه حرارت، انتقال حرارت ناپایا

نام نویسنده مسئول: فرشاد ربیعی

ایمیل نویسنده مسئول: [f.rabiei@ilam.ac.ir](mailto:f.rabiei@ilam.ac.ir)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۶

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

## ۱- مقدمه

تغییرشکل‌های حرارتی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. تحقیقات مختلفی برای کاهش خطاهای حرارتی و یا جبران خطا آن صورت گرفته است. سانگ و همکاران از روش المان محدود و با مینیمم کردن زمان مورد نیاز برای رسیدن دمای سازه به دمای محیط برای کنترل تغییرشکل‌های حرارتی سازه‌های ماشین ابزار استفاده کردند [۸]. ایباراکی و همکاران موقعیت مؤثر پروب و تاثیر اختلاف بین انبساط حرارتی قطعه کار و خطکش اندازه‌گیری در هنگام تماس با یکدیگر را در حالت پایا و گذرا بررسی کردند [۹]. موقعیت و تعداد سنسورهای اندازه‌گیری با روش‌های تجربی، عددی و شبکه عصبی در تحقیقات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰].

تفاوت خواص فیزیکی و حرارتی اجزای سازه منجر به انبساط‌های مختلف و ایجاد تنش‌ها و کرنش‌های ناخواسته‌ای می‌شود که عملکرد دستگاه و خطکشی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق تغییرشکل‌ها و خطاهای ناشی از اعمال اختلاف دما در حالت ناپایا بر روی دستگاه CMM به روش تحلیل اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته است تا مجموعه سازه و خطکشی‌های اندازه‌گیری را پوشش دهد.

## ۲- مشخصات دستگاه

دستگاه CMM مورد استفاده در بررسی، مدل zeiss prismo7 می‌باشد که در شکل ۱ نمایش داده شده است. ابعاد سازه موجود (بدون احتساب سیستم پروب و پروب‌گیر و حماله)  $1.2m \times 1.2m \times 1m$  و دقت دستگاه  $1\mu m$  می‌باشد. دستگاه دارای دو پایه‌ی ریلی و کشویی از جنس فایبر گلاس، بستر گرانیته و سیستم پروب‌گیر و حماله از جنس سرامیک می‌باشد. پایه‌های ریلی و کشویی بر روی بالشتکی از هوا قرار گرفته‌اند که حرکت در راستای Y را میسر می‌کنند. سیستم پروب‌گیر و حماله هم توانایی حرکت در راستای X و Z را دارا می‌باشند. سه خطکشی کدی دستگاه توسط چسب به سازه اتصال یافته‌اند.

دستگاه‌های اندازه‌گیری CMM به طور گسترده‌ای در بررسی هندسه و ابعاد قطعات مکانیکی، مشخصات اندازه‌گیری، مهندسی معکوس و بهبود فرایندهای ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد اگرچه دستگاه‌های CMM به وسیله‌ی دقت بالای آنها معرفی می‌شوند اما هنوز مسائل مربوط به عدم دقت و عدم صحت در آنها مطرح است. منابع این خطاها به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

۱) قطعات و پروب‌های دستگاه اندازه‌گیری

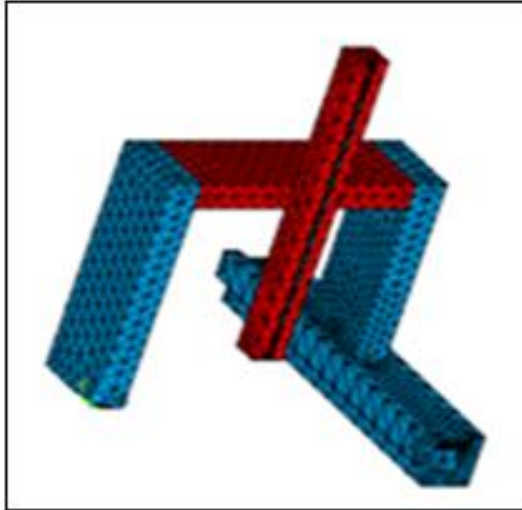
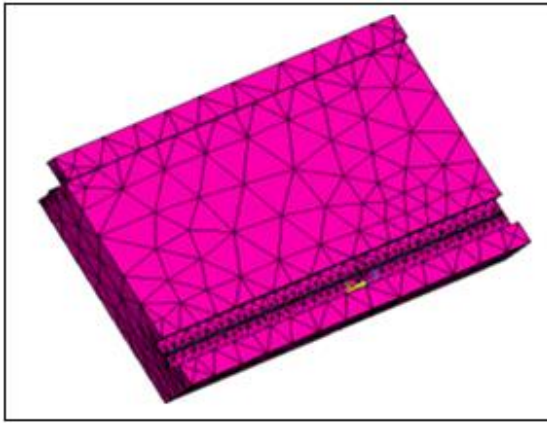
۲) استراتژی نمونه‌رَداری

۳) پردازش داده

۴) محیط اندازه‌گیری [۱].

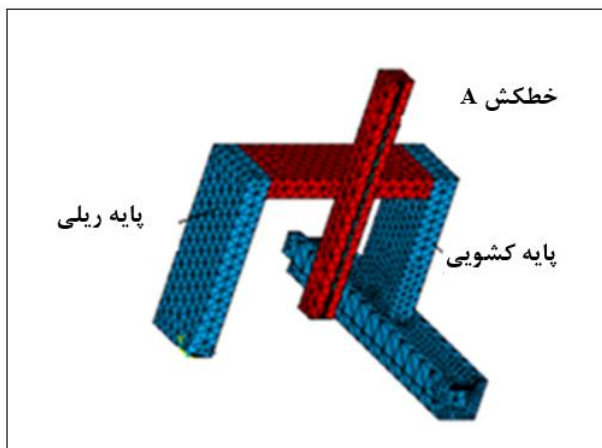
ثابت شده است که سهم جابه‌جایی‌های حرارتی سازه ماشین‌های ابزار ممکن است بیش از ۵۰٪ کل خطای ماشین‌کاری باشد [۴-۲]. از طرفی در دنیای صنعتی امروز رشد فزاینده‌ای برای استفاده از سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر وجود دارد به همین دلیل دستگاه‌های CMM بیشتر در خارج اتاق تحت کنترل و نزدیک کارگاه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از طرفی دمای محیط معمولاً با دمای بین المللی استاندارد وسایل اندازه‌گیری که از نظر تئوری دمای  $20^\circ$  سانتی‌گراد در نظر گرفته شده متفاوت است. بنابراین انحراف دمای حاصل از شرایط کارگاهی بر روی فرایند اندازه‌گیری باید مد نظر قرار داده شود [۵، ۶]. انواع مختلفی از خطاهای حرارتی در طول اندازه‌گیری اتفاق می‌افتد. این اختلاف از دو مساله نشأت می‌گیرد. یکی توزیع دما در سازه ماشین و دیگری انتخاب المان‌های موجود در سازه می‌باشد. از موارد فوق نیاز به جبران خطای حرارتی به خوبی احساس می‌شود. به دلیل مشکل بودن اندازه‌گیری مستقیم، از روش‌های غیرمستقیم برای جبران خطای

<sup>1</sup> Coordinate Measurement Machine: CMM



شکل شماره ۳: دو قسمت مجزای سازه، تصویر بالا بستر گرانیتی سازه تصویر پایین قسمت متحرک سازه.

سازه‌ی متحرک از یک پایه ریلی و یک پایه کشویی فایبر گلاسی (آبی رنگ)، یک ستون افقی و یک سیستم حماله و پروب‌گیر سرامیکی تشکیل شده است (قرمز رنگ)، بر روی حماله خطکش A قرار دارد که توسط چسب به حماله سرامیکی متصل شده است (شکل ۴).



شکل شماره ۴: دو قسمت مجزای سازه، تصویر بالا بستر گرانیتی سازه تصویر پایین قسمت متحرک سازه.

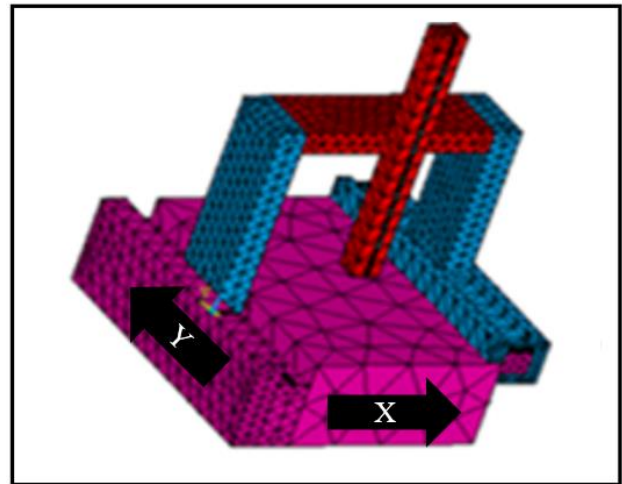
دستگاه برای  $20^{\circ}C$  استاندارد شده و تغییر دمای  $10^{\circ}C$  برای آن در نظر گرفته شده است.



شکل شماره ۱: دستگاه CMM.

### ۳- آنالیز المان محدود سازه CMM

مدل دستگاه CMM در نرم افزار ANSYS طراحی شده است (شکل ۲). سطوح تماسی از طریق قید Glue Volumes به هم متصل شده‌اند که انتقال حرارت در اتصالات را ممکن می‌سازد. سیال پیرامون سازه هوای ساکن با ضریب انتقال حرارت  $h = 60 (W/m^2.K)$  و دمای آن  $30^{\circ}C$  در نظر گرفته شده است. دمای اولیه‌ی سازه  $20^{\circ}C$  (دمای استاندارد) است. المان Coupled Field نوع 98 Scaler Tet به دلیل قابلیت رفتار حرارتی-سازه‌ای آن مورد استفاده قرار گرفته است. توزیع المان‌ها از نوع Global، مش‌زنی از نوع Free و شکل مش از نوع Tet مورد استفاده قرار گرفته است.

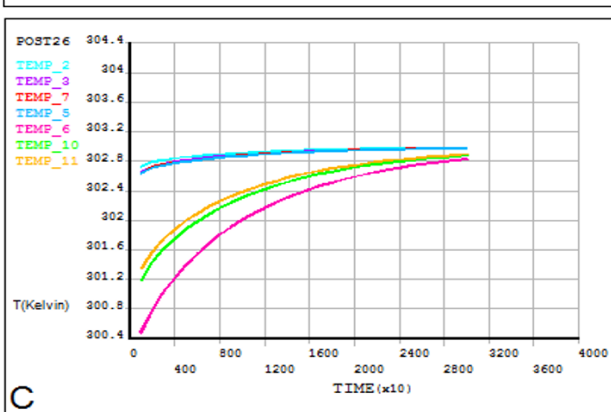
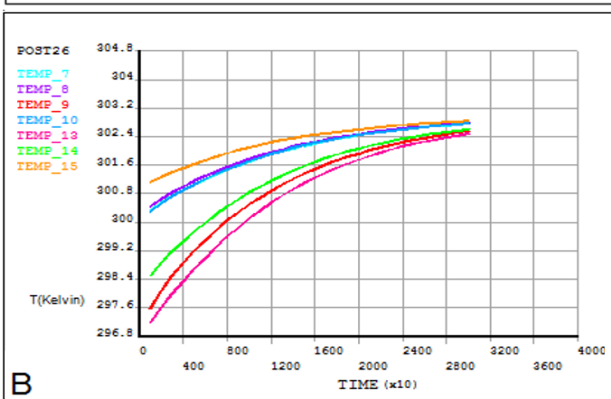
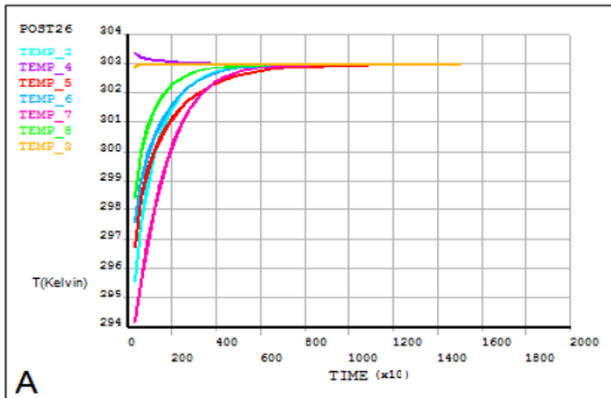


شکل شماره ۲: نمای کلی سازه‌ی CMM.

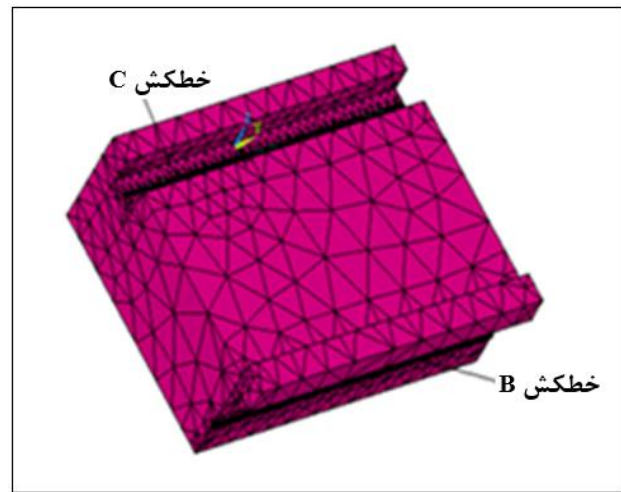
قیود مرزی مدل با دستگاه واقعی تقریباً یکسان می‌باشد. سازه را می‌توان به دو بخش مجزا تقسیم کرد چرا که اتصال ما بین آنها از طریق بالشتک هوا ایجاد شده است (شکل ۳).

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی و حرارتی مواد

گرمای مخصوص $\frac{J}{Kg^{\circ}C}$	رسانندگی حرارتی $\frac{W}{m^{\circ}C}$	ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{^{\circ}C}$	چگالی $\frac{Kg}{m^3}$	نسبت پواسون	مدول یانگ $(Pa)$	
1000	0.058	$8 \times 10^{-6}$	145	0.17	$7 \times 10^{-6}$	شیشه
200	0.33	$12 \times 10^{-6}$	1.8	0.45	$10^{10}$	چسب
800	2.07	$10^{-6}$	2600	0.2	$2 \times 10^{11}$	سرامیک
795	0.036	$7 \times 10^{-6}$	105	0.26	$8.18 \times 10^{10}$	فایبرگلاس
820	130	$8 \times 10^{-6}$	10000	0.2	$2 \times 10^{10}$	گرانیت



بر روی بستر گرانیتی دو خطکش B و C قرار دارد که توسط چسب به بستر گرانیتی متصل شده اند (شکل ۵).



شکل شماره ۵: بستر گرانیتی و خطکشهای B و C.

پایه‌های ریلی و پایه کشویی در راستای Y می‌توانند حرکت کنند و پایه ریلی دارای مقداری لقی محدود در راستای Y می‌باشد که می‌تواند حرکتی جزئی در این راستا داشته باشد. بستر گرانیتی هم بر روی زمین قرار دارد.

خواص مکانیکی و حرارتی اجزای سازنده سازه در جدول ۱ ذکر شده است.

#### ۴- نتایج

پس از پایان تحلیل زمان لازم برای پایداری حرارتی سازه استخراج شده است که برای قسمت متحرک حدود  $15000 S$  و برای بستر گرانیتی حدود  $30000 S$  می‌باشد. اهمیت این زمان در این است که میزان تغییر شکل و جابه‌جایی سازه در این زمان به حالت ثابت می‌رسد.

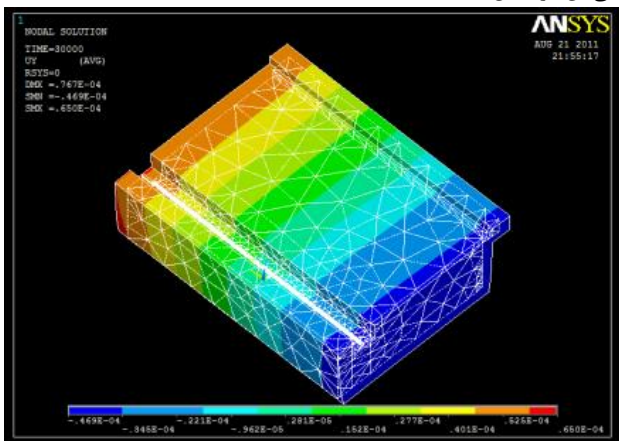
تغییرات دما برای هفت نقطه از هر یک از خطکش‌ها، پایه ریلی و پایه کشویی در شکل ۶ بر حسب زمان نشان داده شده است:

نتایج مربوط به تغییر شکل کلی قسمت متحرک در پایان 15000 s که مربوط به زمان پایداری حرارتی این قسمت است در شکل ۷ آمده است. نقطه-چین‌ها حالت اولیه سازه را نشان می‌دهند:

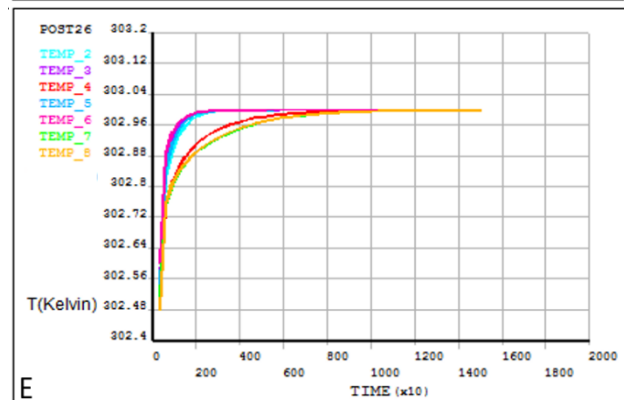
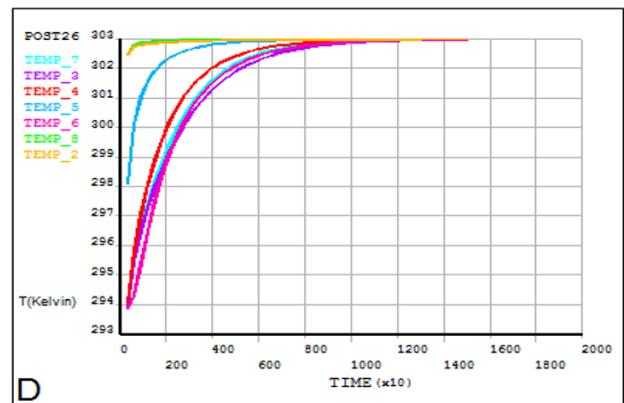


شکل شماره ۷: تغییر شکل کلی قسمت متحرک سازه.

بستر گرانیتهی پس از 30000 s به تعادل حرارتی می‌رسد که تغییر شکل کلی آن در شکل ۸ آمده است:



شکل شماره ۸: تغییر شکل کلی بستر گرانیتهی.



شکل شماره ۶: تغییر دمای هفت نقطه‌ی دلخواه از (A) خطکش (B، C، D، E) پایه ریلی و (E) پایه کشویی بر حسب زمان.

میزان جابه‌جایی نقاط ابتدایی و انتهایی هر خطکش پس از رسیدن به تعادل حرارتی و متعاقباً میزان تغییر طول هر یک از خطکش‌ها از نرم‌افزار استخراج شده است. به دست آوردن روابط انتقال حرارت حاکم بر مسأله غیرممکن و یا بسیار مشکل می‌باشد بنابراین برای اعتبار سنجی این مقادیر از رابطه انبساط یک بعدی استفاده شده است:

$$\Delta l = l \alpha \Delta T \quad (1)$$

این رابطه میزان تغییر طول آزاد میله ای به طول  $l$  را در اثر تغییر دمای  $\Delta T$  بیان می‌کند که  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی بر حسب یک درجه سانتی‌گراد تغییر دمای میله است.

جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج تحلیلی با نتایج نرم افزار

خطکش	نرم افزار ( $\mu\text{m}$ )	رابطه تحلیلی ( $\mu\text{m}$ )	میزان خطا (درصد)
A	15.2	11.8	28.8
B	100.9	102.4	1.5
C	100.3	102.4	2.0
پایه ریلی	63.6	63	0.9
پایه کشویی	52.5	52.9	0.7

## ۵- نتیجه گیری

شده‌اند که تطابق بسیار قابل قبولی مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که تغییر درجه حرارت می‌تواند تأثیر زیادی بر روی اعوجاج حرارتی سازه و خطکشها و متعاقباً نتایج اندازه‌گیری داشته باشد. برای کاهش این خطاها می‌بایست پارامترهای تعداد درجه آزادی و نحوه اتصال اجزای مختلف به یکدیگر، خواص حرارتی خصوصاً ضریب انبساط حرارت و طول اجزای مختلف سازه مورد توجه قرار گیرند.

در این تحقیق به منظور بررسی اثر تغییر شرایط محیطی بر روی دستگاه CMM و بررسی خطاهای ناشی از آن، مدل سه‌بعدی دستگاه CMM در نرم افزار اجزا محدود ANSYS طراحی شده و با اعمال اختلاف دمای محیط با دمای سازه، تحلیل حرارتی ناپایای دستگاه انجام شده است. تغییر شکل کلی سازه و خطکش‌ها به دست آمده است. به منظور اعتبار سنجی، نتایج به دست آمده از میزان جابه‌جایی خطکش‌ها و ساختمان سازه با روابط تحلیلی موجود مقایسه

## مراجع

- [1] Ito, S., et al., *Measurement of form error of a probe tip ball for coordinate measuring machine (CMM) using a rotating reference sphere*. Precision Engineering, 2020. **61**: p. 41-47.
- [2] Montazerian, A., J.A. Øverli, and S. Goutianos, *Thermal conductivity of cementitious composites reinforced with graphene-based materials: An integrated approach combining machine learning with computational micromechanics*. Construction and Building Materials, 2023. **395**: p. 132293.
- [3] Tavoosi J, Shirkhani M, Azizi A. Control engineering solutions during epidemics: A review. International Journal of Modelling, Identification and Control. 2021;39(2):97-106.
- [4] Balsamo, A., D. Marques, and S. Sartori, A method for thermal-deformation corrections of CMMs. CIRP annals, 1990. 39(1): p. 557-560.
- [5] Štrbac, B., et al., Investigation of the effect of temperature and other significant factors on systematic error and measurement uncertainty in CMM measurements by applying design of experiments. Measurement, 2020. 158: p. 107692.
- [6] Mian, N.S., S. Fletcher, and A. Longstaff, Reducing the latency between machining and measurement using FEA to predict thermal transient effects on CMM measurement. Measurement, 2019. 135: p. 260-277.
- [7] Lin, H., F. Keller, and M. Stein, Influence and compensation of CMM geometric errors on 3D gear measurements. Measurement, 2020. 151: p. 107110.
- [8] Sang, Y., Y. Yan, C. Yao, and G. He, A new scanning lines distribution strategy for the form error evaluation of freeform surface on CMM. Measurement, 2021. 181: p. 109578.
- [9] Ibaraki, S. and R. Okumura, A machining test to evaluate thermal influence on the kinematics of a five-axis machine tool. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021. 163: p. 103702.
- [10] Lee, K.-H. and G.J. Yun, Design optimization of thermally conductive support structure for laser powder-bed fusion process with part-scale thermal history. Additive Manufacturing, 2022. 51: p. 10262



# Investigation and modeling of the inrush current generated by the capacitors switching in two modes the presence of current limiting inductor and its absence

Ali Yazdani Baghmaleki <sup>1,\*</sup> and Asad Shemshadi <sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Faculty of Electrical Engineering, Arak university of technology, Markazi, Arak, Iran

E-mail addresses: [AliYazdani7799@gmail.com](mailto:AliYazdani7799@gmail.com) ; [shemshadi@arakut.ac.ir](mailto:shemshadi@arakut.ac.ir)

\*Corresponding author

Received: xx, Revised: xx, Accepted: xx.

## Abstract

Inrush current is a transient current that flows when capacitors are initially switched on. This high magnitude current can pose various issues, such as affecting circuit breakers, causing voltage dips, and damaging the capacitors themselves. Therefore, it is essential to investigate and understand its characteristics. When a current limiting inductor is present in the circuit, it restricts the flow of the inrush current by limiting its rate of rise. This helps in reducing the peak magnitude of the current and its potential harmful effects. The inductor adds impedance to the circuit, which slows down the rate of change of current. On the other hand, in the absence of a current limiting inductor, the inrush current can flow with full force, reaching high peak values. Switching in high-voltage capacitive banks used to control voltage and reactive power at high-pressure substations usually results in significant inrush currents and transient states. The ripples in the waveform cause damage to the power system and capacitive banks. In this way, it reduces the life of capacitive units or, if it continues, causes complete failure of capacitive banks. The use of current-limiting inductors in capacitive banks reduces the transient time in capacitive banks at the moment of switching and reduces the inrush current. In this paper, we use MATLAB Simulink to investigate the switching effect for a 20 kV capacitor bank with a capacity of 4.8Mvar, first without current-limiting inductor, and then with it and compare their results.

## Keywords

Capacitor Bank, Inrush Current, Current-limiter Inductor.

## 1. Introduction

Investigation and modeling of the inrush current generated by capacitors switching is important to understand the behavior and impact of these currents on electrical systems. This analysis becomes crucial in cases where current limiting inductors are present or absent, as their presence can significantly influence the inrush current. Capacitor bank is one of the important equipments used in high voltage substations and the need to use capacitive banks in today's power grids is obvious. These banks are usually used in parallel in the above distribution and transfer substations for purposes such as power factor correction, voltage regulation, loss reduction, etc. Of course, this equipment also has weaknesses, the most important of which are Inrush current, switching problems, protection requirements and incidental costs [1-4].

Capacitors should be operated in a range less than the nominal voltage and frequency values. Capacitors are capable of withstanding switching passages with a peak voltage of up to  $2\sqrt{2}$  times the rated value of the effective voltage without reducing their expected life. These overvoltages may cause a partial discharge in the

capacitive unit. Trapped loads and gases produced in the primary half cycle further intensify the discharge in the secondary half cycle. Accumulation of these damages causes more severe overvoltage damages with increasing time and finally failure of capacitor insulation. [5-8]

Short circuit caused by discharging capacitors during electrification in capacitor banks causes transient switching states in capacitor banks. This short circuit causes very high inrush current and consequently voltage perturbations. Inrush currents cause pressure on switching devices, fuses and capacitive units. [9-11] When there is more than one capacitor bank on a bus, electrification of the capacitor bank reduces the source impedance for the switching moment. As a result, it causes very high transient voltage in all capacitive banks connected to the bus. This voltage will eventually cause the capacitive unit to fail and reduce its useful life.[12]

To model the inrush current, various techniques can be employed, such as mathematical equations, simulation software, or circuit analysis tools. These models take into account factors like capacitor characteristics, circuit impedance, and the presence or absence of a current limiting inductor. By investigating and modeling the

inrush current, engineers can determine the necessary measures to mitigate its impact. This may include the addition of current limiting inductors, using soft-start circuits that gradually ramp up the voltage, or implementing control strategies to manage the switching of capacitors. Overall, the investigation and modeling of inrush current provide valuable insights for designing and operating electrical systems effectively and safely [13].

## 2. Inrush Current in Capacitor Switch

Capacitor switching applications are not limited to capacitive currents but are also used in the process of electrifying capacitor banks, overhead lines and cables. Capacitor bank switching is known for generating a large amount of transient voltage in power switch contacts.

There are many large capacitor banks for voltage regulation, to improve the PF (Power Factor), and capacitor banks are also widely used in filtering high harmonics in the overall system.

In the process of distributing the power system, there are cable networks that create a capacitive load. In case of any current interruption (power failure) of the load, the capacitive capacity of the system is charged and this charge in the capacitors causes damage to the dielectric due to high voltage.

When a large inrush current flows through the substations, the system must withstand the conditions created in the protection system as well as during switching. When there is voltage in the line, this voltage begins to fluctuate at an almost low frequency and magnitude. It doubles the voltage peak in the circuit, which can cause serious hazards. This article will discuss how to minimize high inrush current and what are the basic recommendations for it.

There are methods for placing capacitors and inductors in the circuit that can significantly minimize the amount of inrush current generated at the moment of switching. Which are explained below:

### 2.1. Single Capacitor Bank Circuit

Consider the following single-phase circuit. This circuit has a switch of one capacitor and two inductors and it is assumed that the resistance of the circuit is almost zero and the value of inductor L1 is more than L2.

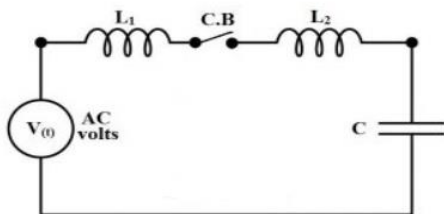


Fig. 1. A Single Capacitor Bank Circuit.

There is a power switch in the circuit to interrupt the circuit. This shape of the circuit is called a single capacitive bank.

In this case, the current depends on the parameters of the circuit and the initial state of the circuit.

Suppose a capacitor with voltage  $v_0$  is charged at time  $t_0$ .

The current can be calculated from the following statement:

$$i = (V_t - V_0) \frac{1}{\sqrt{\frac{L_1}{C}}} \sin \omega_0 t \quad (1)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C}} \quad (2)$$

In this scenario, the damping current is reduced and the total current is established in the circuit.

### 2.2. Back-to-Back Capacitor Bank Circuit

This scenario is known as back-to-back capacitive bank switching.

Consider the following circuit for it:

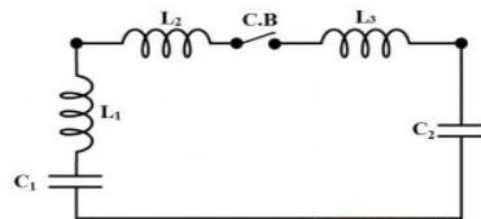


Fig. 2. A Back-to-Back Capacitor Bank Circuit

Consider the following single-phase circuit. This circuit has

In this case, when the switch is closed, there are two capacitors and two inductors.

The power switch is present at point b-b (ie the voltage difference between the two power switch contacts) when it is disconnected and in the event of any dielectric failure.

Therefore, the current formula can be obtained in the following way:

$$i(t) = V_{0b-b'} \frac{1}{\sqrt{(L_1 - L_2) \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)}} \sin \omega_2 t \quad (3)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\left( \frac{1}{L_1 + L_2} \right) \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (4)$$

$$V_{0b-b'} = V_m \frac{1}{\sqrt{1 - \omega^2 (L_1 + L_2)}} \quad (5)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_1 C}} \quad (6)$$

In this case, the current can be about ten times more than the maximum current in the circuit. But this current only affects one (local) capacitor and the rest of the system is safe.

### 2.3. Current-Limiting Inductor

To deal with the effects of inrush current, one of the most simple and practical ways is to use inductor in series

with the capacitor, and this is the main topic of this article, which we will simulate later.

The purpose of using a reactor is to limit the rate of increase of transient current and its value is calculated from the following equations:

$$L_p = \frac{V_p}{2\pi \times f \times I_p}$$

$$L = \frac{L_p}{n}$$

Where  $V_p$  is the peak voltage of the network (in KV),  $I_p$  is the peak current transient (in amperes),  $n$  is the number of parallel capacitive banks, and  $L_p$  is the limiting reactor inductance for  $n$  parallel capacitive banks.

According to KCL, we know that inductor current does not jump; so it can be a good tool to limit the increasing current of the capacitor at the moment of connection to the network. Based on this, the contactor for switching capacitors have been developed that are equipped with a small limiting inductor with an air core.

### 3. Simulation of Inrush Current

In this section, we simulate the offensive current created by capacitive switching in MATLAB. The simulation performed for 20KV capacitors with 4.8Mvar reactive power capacity.

First, we do this simulation for a situation where there is no current limiting inductor in the circuit.

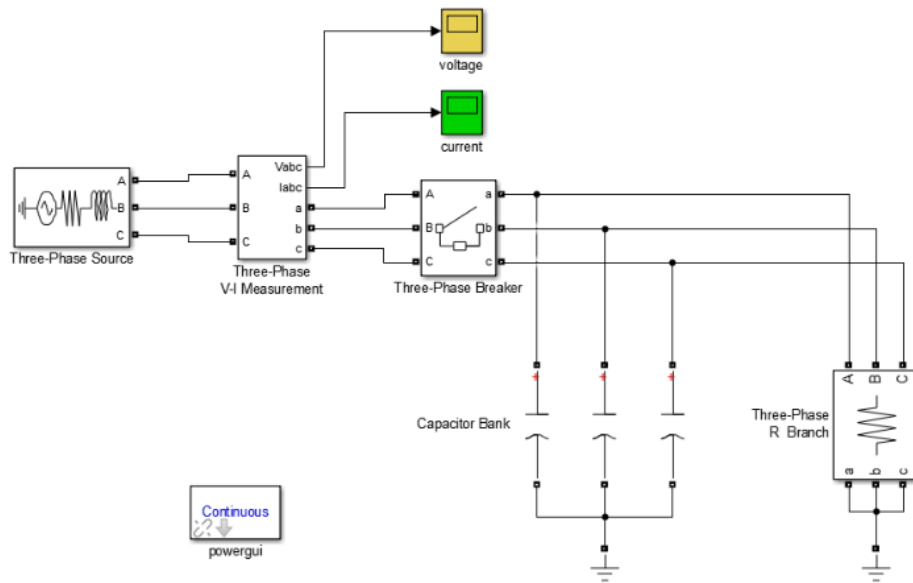
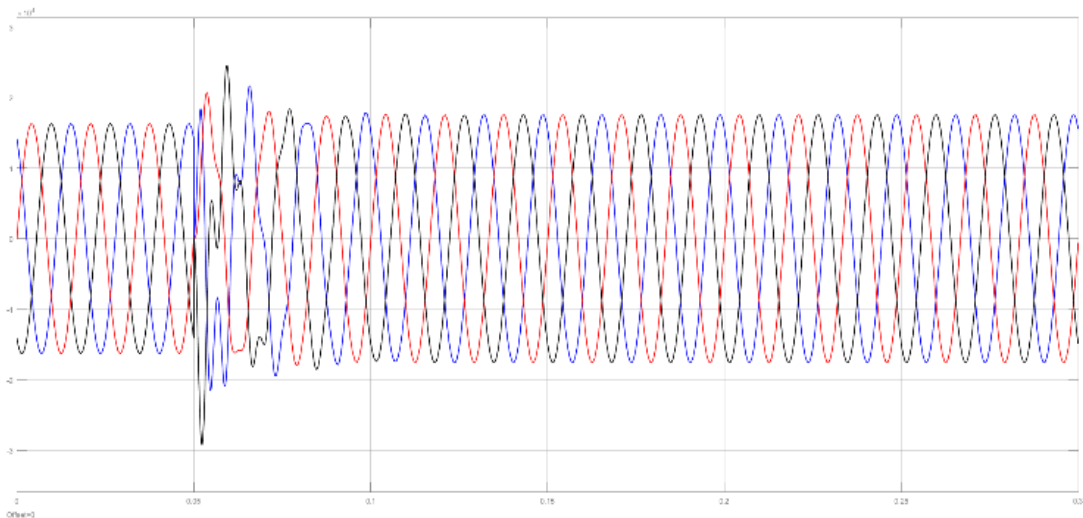
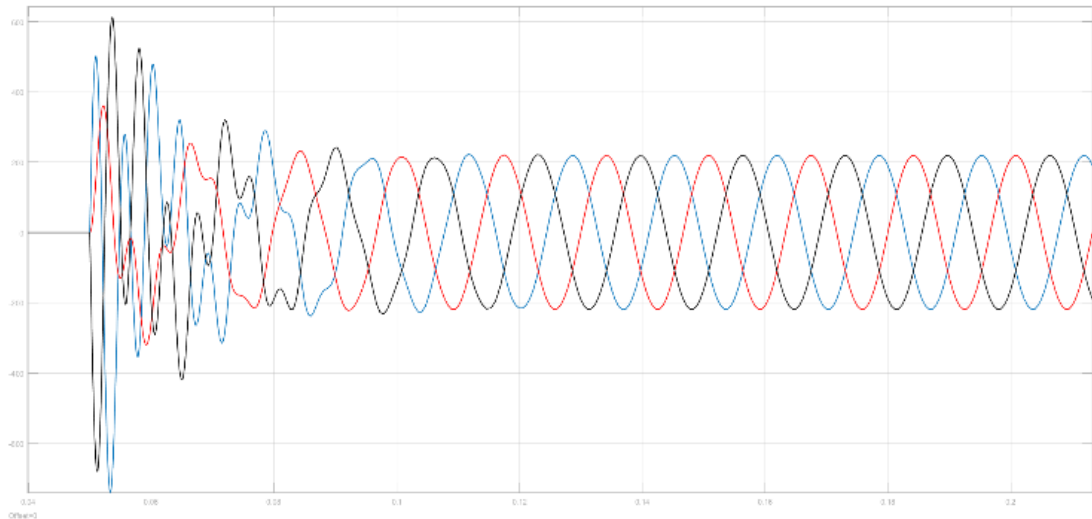


Fig. 3. Capacitor bank switching model without current limiter inductor.



(a)



(b)

Fig. 4. Capacitor switching curves without inductor current limiter (a)voltage curve (b)current curve.

As can be seen and expected, after capacitive switching, a very large current (inrush current) is generated in the circuit, and as previously discussed, this

current causes severe damage to the power system, so it is necessary to reduce this current.

In this part of the simulation, current limiting inductors are placed in series with capacitors.

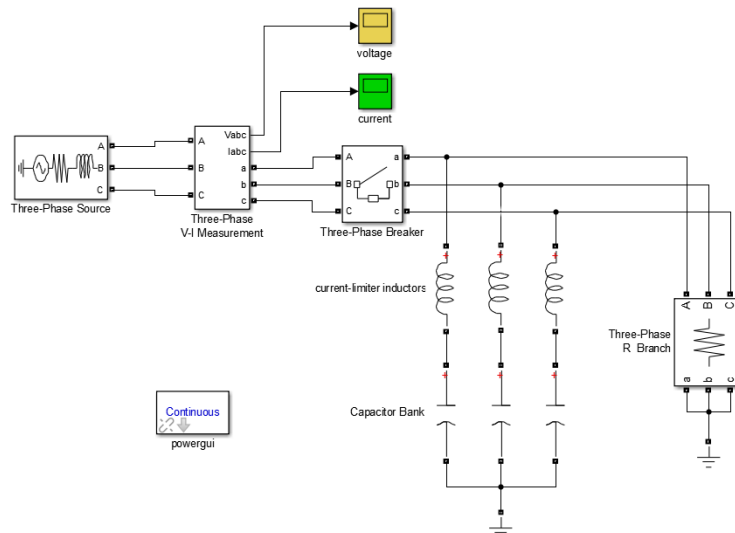
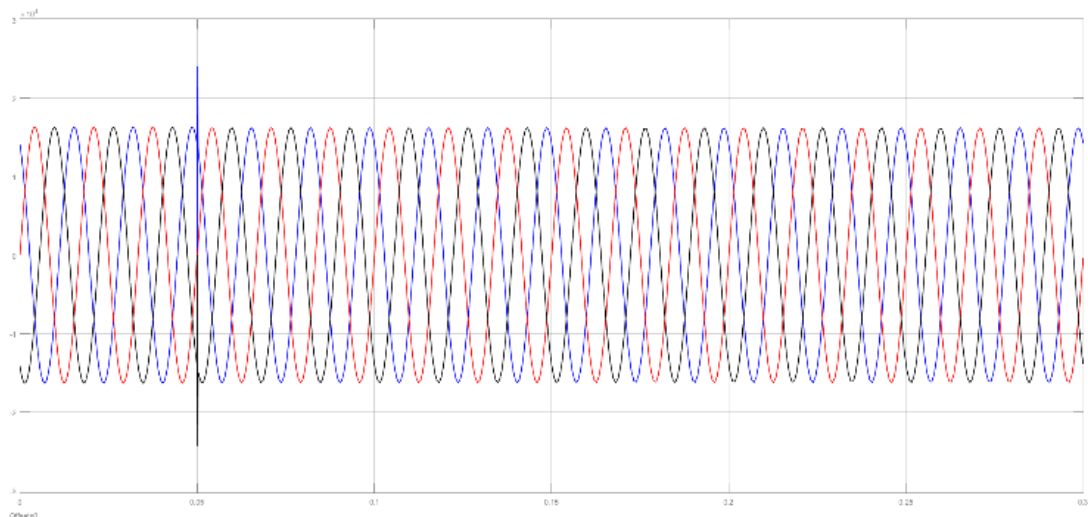
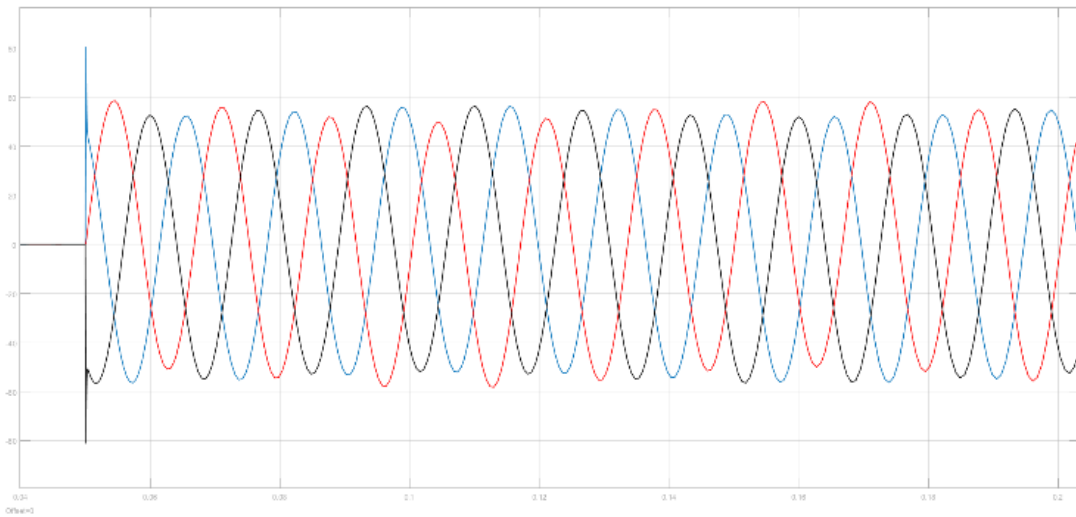


Fig. 5. Capacitor bank switching model without current limiter inductor.



(a)



(b)

Fig. 6. Capacitor switching curves with current limiting inductor (a) voltage curve (b) current curve

As can be seen, the series of current-limiting inductors and capacitors has caused the inrush current to be reduced to a desirable level. Reduction of the inrush current has occurred in a very short time. Voltage curve perturbations are also reduced and all these makes the power system less damaged.

#### 4. Comparison Criteria

A Power system use capacitive banks according to their structure and applications and use different methods to deal with inrush current caused by switching.

In this paper, methods are proposed that each has its own characteristics. It should be noted that each method of dealing with inrush current has its own criteria and the comparison of these methods is appropriate to the power system used.

In this paper, the method of using current limiting inductor was further investigated and simulated for switching a 20 kv capacitive bank with a reactive power capacity of 4.8 Mvar.

comparison of Figures 5 and 6 shows well that the presence of current-limiting inductor reduces the voltage perturbations in the power system And when the current limiter inductor is not used, a large inrush current is created in the network at the moment of switching capacitor bank, which can cause serious damage.

#### 5. Conclusion

Switching on capacitive banks causes an unwanted transient state that may damage the capacitive units and over time cause the capacitive bank to fail completely. The use of resistors and current-limiting inductors reduces the transient effects of switching in capacitive banks and reduces the inrush current. One way to show this clearly is to use MATLAB Simulink and simulate with it.

In this paper, this was done for a 20 KV capacitive bank with a reactive power capacity of 4.8 Mvar, and in two cases, the presence of a limiting inductor and its absence, we were able to observe the inrush current and voltage perturbations at the switching moment. In the first stage of switching in the capacitive bank without current limiting inductor was simulated, which resulted in severe distortion in the voltage and current waveform,

and also the current level was extremely high. But in the second stage, current limiter inductor was used, which resulted in an extraordinary reduction of distortion in the voltage waveform, which was close to zero. Also, the distortion of the current waveform was minimized and the amount of current was reduced compared to the previous stage. With this method, the voltage transient mode is greatly reduced and even close to zero, and also the level of short circuit current is significantly reduced so that it does not pose a problem for capacitor bank units and other devices of power systems.

#### References

- [1] M. Beanland, T Speas, "Pre-insertion Resistors in high Voltage Capacitor Bank Switching" Western Protective Relay Conference, pp Switching" Western Protective Relay Conference, pp 1-2, October , October 19-21, 2004
- [2] Kalyan K. Mustaphi, Govind Gopakkumar, Huihus Yan and Dr Bruce A Mork, "Shunt capacitor bank switching transients: A tutorial and case study" Minnesota Power System Conference, pp 1-4, November 2-4, 1999.
- [3] E.H. Camm, "Shunt capacitor overvoltage and a reduction technique", 1999IEEE/PES transmission and distribution conference and exposition New Orleans, pp 1-5, April 14, 1999
- [4] IEEE Std 18™, "IEEE Standard for Shunt Power Capacitors", 2002.
- [5] IEEE Std 1036™, "IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors", 2010
- [6] IEEE C37.06, "AC high-voltage circuit breakers rated on symmetrical current basis preferred rating and related required capabilities", 2000.
- [7] George V Fantozzi, "Selecting a capacitor switching overvoltage control method effective in preventing nuisance tripping of adjustable speed drives", in EEI ES & Committee meeting, pp Committee meeting, pp 1-2, April , April 4, 1995
- [8] Softic M, Tokic A, Uglesic I (2012) 7th Vienna international conference on mathematical modeling measurement, modeling and simulation of capacitor bank

switching transients, IFAC proceedings volumes, Volume 45, Issue 2, 2012, pp 1254–1259.

[9] Tavooosi, J.; Shirkhani, M.; Abdali, A.; Mohammadzadeh, A.; Nazari, M.; Mobayen, S.; Asad, J.H.; Bartoszewicz, A. A New General Type-2 Fuzzy Predictive Scheme for PID Tuning. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 10392. <https://doi.org/10.3390/app112110392>

[10] Iranmehr H, Aazami R, Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A-R, Mohammadzadeh A, Mosavi AH and Guo W (2022) Modeling the Price of Emergency Power Transmission Lines in the Reserve Market Due to the Influence of Renewable Energies. *Front. Energy Res.* 9:792418. doi: 10.3389/fenrg.2021.792418

[11] 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.

[12] Guo X, Shirkhani M, Ahmed EM. Machine-Learning-Based improved smith predictive control for MIMO processes. *Mathematics.* 2022 Oct 9;10(19):3696.

[13] 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.

## Modeling and analysis of soil data with the aim of copper exploration in Nain region

Aydin Rahimi Harzvili

Bushehr, Asalouye, South Pars Gas Complex Company, 75391311  
E-mails: Aydin.rahimi1993@gmail.com

### Abstract

Nain exploration area is one of the areas of interest of Isfahan Mobarakeh Steel Company for the exploration of metal deposits, including copper. Due to their low grade and high tonnage, copper deposits have gained attention in recent decades, and their exploration methods have improved as well. In this study, due to the importance and effective application of different geophysical methods in searching for different deposits and studying the formation of mineral deposits, these methods were used in the east of Nain range. First, the magnetometric data were processed and then their 3D inverse modeling was done. The results show a mass with low magnetic self-reactivity in the center of the model and at a relatively high depth, which corresponds to gabbroic intrusive masses at the surface. This mass is surrounded by another mass with high resistivity (more than SI 0.168) which has a ring structure. Next, the specific resistance and induced polarization data were inverted along a taken profile. By preparing sections of existing data models and comparing them with the geological information of the region, the presence of a lenticular metal mineralization body was shown. Also, there has been an increase in the copper grade around the intrusive gabbro masses, which has been associated with an increase in the magnetic susceptibility in this area. This indicates the effect of hydrothermal fluids with the origin of gabbroic intrusive mass on the alteration of peridotites and the increase of magnetic susceptibility.

### Keywords

Copper, inverse modeling, magnetoresistance, specific resistance, discovery, Metal deposits

## مدلسازی و تحلیل داده های خاک با هدف اکتشاف مس در منطقه نائین

آیدین رحیمی هرزویلی

یوشهر، عسلویه، شرکت مجتمع گازی پارس جنوبی

ایمیل نویسندهگان: **Aydin**

### چکیده

محدوده اکتشافی نائین، یکی از محدوده های مورد توجه شرکت فولاد مبارکه اصفهان برای اکتشاف کانسارهای فلزی و از جمله مس است. کانسارهای مس به دلیل عیار پایین و تناژ بالا در دهه های اخیر مورد توجه قرار گرفته و روش های اکتشاف آنها نیز بهبود یافته است. در این تحقیق با توجه به اهمیت و کاربرد روش های مختلف ژئوفیزیک در جستجوی ذخایر مختلف و بررسی تشکیل ذخایر معدنی، از این روش ها در شرق رشته کوه نائین استفاده شد. ابتدا داده های مغناطیسی سطحی مورد پردازش قرار گرفتند و سپس نسبت به مدل سازی وارون سه بعدی آنها اقدام شد. نتایج حاصل نشان دهنده یک توده با خودپذیری مغناطیسی پایین در مرکز مدل و در اعماق نسبتاً زیاد است که در سطح منطبق با توده های نفوذی گابرویی می باشد. این توده توسط توده ی دیگر با خودپذیری بالا (بیشتر از SI 168/0) که دارای ساختار حلقوی است، احاطه شده است. در ادامه داده های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در امتداد یک پروفیل برداشت شده، وارون سازی شدند. با تهیه مقاطعی از مدل های داده های موجود و مقایسه آنها با اطلاعات زمین شناسی منطقه، وجود یک تنه کانی سازی فلزی عدسی شکل نشان داده شد. همچنین افزایش عیار مس در اطراف توده های نفوذی گابرو رخ داده است که با افزایش خودپذیری مغناطیسی در این محدوده همراه بوده است. این مهم نشان دهنده تاثیر سیالات هیدروترمال با منشاء توده نفوذی گابرویی بر دگرسانی پریدوتیت ها و افزایش خودپذیری مغناطیسی دارد.

**کلمات کلیدی:** مس، مدلسازی وارون، خودپذیری مغناطیسی، مقاومت ویژه، اکتشاف.

نام نویسنده مسئول: آیدین رحیمی هرزویلی

ایمیل نویسنده مسئول: [Aydin.rahimi1993@gmail.com](mailto:Aydin.rahimi1993@gmail.com)

تاریخ ارسال مقاله:

تاریخ (های) اصلاح مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

### ۱- مقدمه

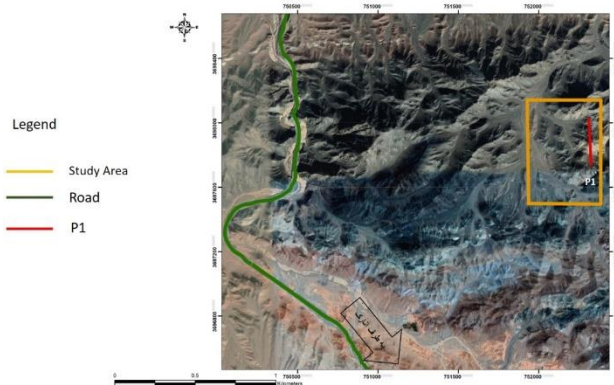
بی‌هنجاری های سیگنال های فیزیکی ناشی از تغییرات خواص فیزیکی توده های زیر سطحی را اندازه گیری میکنند. به این ترتیب می توان با انجام مدلسازی وارون داده های ژئوفیزیکی به مدلی از تغییرات خصوصیات فیزیکی زمین دست یافت [۱۰-۸]. تفسیر زمین شناسی مدل یاده شده، به تعیین شکل، محدوده و عمق توده های زیر سطحی می انجامد. معمولاً در اکثر بررسی های ژئوفیزیکی ذخایر معدنی برای افزایش سطح اعتماد به تفسیرهای انجام شده، از داده های چند روش ژئوفیزیکی و تفسیر توأم مدل های به دست آمده از وارون سازی آنها استفاده می شود [۱۴-۱۱].

مطالعه حاضر، به بررسی داده های ژئوفیزیکی برداشت شده در شرق محدوده اکتشافی نائین می پردازد. هدف از این مطالعه، بررسی ارتباط بی‌هنجاری های ژئوفیزیکی با کانی سازی مس در محدوده می باشد. در این راستا، ابتدا شرایط زمین شناسی محدوده مورد مطالعه معرفی شده و بی‌هنجاری لیتوشیمیایی عنصر مس به اجمال مورد اشاره قرار می گیرد [۱۸-۱۵]. سپس داده های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده معرفی شده و با انجام پردازش های مختلف و مدل سازی وارون، مدل های خودپذیری مغناطیسی، مقاومت ویژه و شارژپذیری الکتریکی در محدوده ارائه می شود. در نهایت، با تفسیر توأم مدل های یاد شده و مقایسه آنها با اطلاعات زمین شناسی و ژئوشیمی موجود در محدوده، یک محل مناسب برای انجام حفاری اکتشافی معرفی می گردد [۲۲-۱۹].

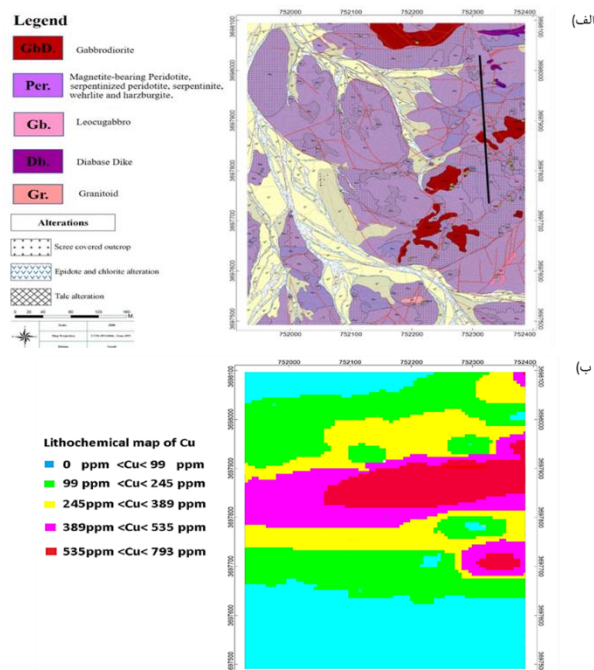
در این مقاله، برای اکتشاف کانسارهای فلزی از جمله مس به منطقه نائین پرداخته شده است که یکی از مناطق محبوب شرکت فولاد مبارکه اصفهان می باشد. باتوجه به عیار پایین و تناژ بالای مس، این پژوهش به کاربرد روش های

سیستم های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ممکن است به عنوان پلتفرم های مبتنی بر رایانه برای جمع آوری، مدیریت، تجزیه و تحلیل و تجسم داده های مکانی و افرادی که آنها را مدیریت می کنند تعریف شود. توانایی تجزیه و تحلیل کمی مقادیر زیادی از داده های اکتشاف فضایی برای تولید هدف پیشی گرفته است. برنامه های کاربردی مبتنی بر GIS برای اکتشاف مواد معدنی که شامل جمع آوری، تجزیه و تحلیل و ترکیب اطلاعات از منابع و مقیاس های مختلف است [۴-۱]. انواع مختلفی از مدل های ذخایر وجود دارد که ویژگی های زمین شناسی معمولی و تنظیمات زمین شناسی منطقه ای ذخایر معدنی را توصیف می کنند. این ذخایر منحصر به فرد هستند، زیرا هر کدام به نوعی با سایر ذخایر متفاوت هستند، حتی اگر می توان آنها را به انواع ژنتیکی طبقه بندی کرد که طیف گسترده و تعداد زیادی ویژگی مشترک دارند. علاوه بر فرآیندهای پیچیده زمین که مسئول تشکیل ذخایر معدنی هستند، همچنین باید توجه داشت که خود نهشته ها نیز می توانند به عنوان محصول نهایی زنجیره ای از رویدادهای زمین شناسی توصیف شوند. می شود می شود می شود [۷-۵].

در سال های اخیر، با کاهش عیار و تناژ کانسارهای سطحی همچنین افزایش روزافزون صنایع مختلف به مواد معدنی و به ویژه فلزات، اکتشاف و بهره برداری از کانسارهای عمیق با تناژ و عیار پایین نیز دارای صرفه اقتصادی محسوب می شوند. به دلیل پایین بودن عیار کانسارهای یاد شده و یا واقع شدن آنها در اعماق زیاد، روش های سنتی اکتشاف مبتنی بر مشاهده رخنمون کانسارها در سطح چندان جوابگوی نیاز صنایع نیستند. همین مساله سبب توجه بیش از پیش به روش های اکتشافی ژئوفیزیکی شده است. این روش ها



شکل شماره ۱: تصویر ماهواره‌ای از محدوده نائین و راه دسترسی. مستطیل نارنجی رنگ محدوده برداشت داده‌های مغناطیسی و محل قرارگیری پروفیل برداشت مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۲: الف) نقشه زمین‌شناسی محدوده نائین. خط سیاه رنگ محل پروفیل برداشت داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی را نشان می‌دهد. ب) نقشه آنومالی لیتوژئوشیمی عنصر مس در محدوده اکتشافی نائین.

### ۳- روش های اکتشاف ژئوفیزیکی

در دهه های اخیر، تقاضای مکرر و افزایشی برای بهره برداری فلزات و کانی ها موجب شده است که روش های ژئوفیزیکی برای آشکارسازی ها با دقت بالا انجام می شود. روش های ژئوفیزیکی فقط توانایی آشکارسازی ناپیوستگی زمین شناسی را دارند. ناپیوستگی ها در مکان های با متمایز فیزیکی از مجاور خود پدیدار می شود. روش های اکتشاف ژئوفیزیکی بطور کلی به چهار روش تقسیم می شوند:

#### ۱-۳ روش لرزه‌ای

این روش بر مبنای شیوه اندازه گیری زمان دریافت موج لرزه ای انجام می شود که به دو روش بازتابی و انکساری استفاده می شود. روش لرزه ای بازتابی موجب اندازه گیری زمان انتشار موج لرزه ای می شود. این موج از سرچشمه انرژی رها می شود و به یک سطح بازتاب کننده بازتاب می شود و در زمین به گیرنده

ژئوفیزیکی در جستجوی ذخایر مختلف و بررسی تشکیل ذخایر نفتی می پردازد که در قسمت شرقی رشته کوه نائین مورداستفاده قرار گرفته است. این روش ابتدا داده های مغناطیس سنجی را پردازش می کند و سپس مدل سازی وارون سه بعدی آن انجام می شود. نتایج بدست آمده نشان می دهد که یک توده با خودپذیری مغناطیسی پایین در مرکز مدل و در اعماق نسبتا زیاد وجود دارد که در قسمت منطبق با توده های نفوذی گابرویی یافت شده است.

بخش های مقاله به شرح زیر است:

در بخش اول در مورد مقدمه این پژوهش صحبت شده است که مربوط به روش های اکتشاف می باشد و در قسمت دوم راجب موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به محدوده نائین پرداخته شده است. در بخش سوم به روش های اکتشاف ژئوفیزیکی بطور مختصر پرداخته شده است و روش های آن مورد بررسی قرار گرفته شده است. بخش چهارم به آماده سازی و پردازش داده های مغناطیس سنجی پرداخته شده است. بخش پنجم در مورد داده های مدل سازی وارون مغناطیسی صحبت شده است و در بخش ششم نیز مطالعات مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی آورده شده است. در بخش هفتم نتیجه گیری و پیشنهادات آورده شده است.

### ۲- موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی

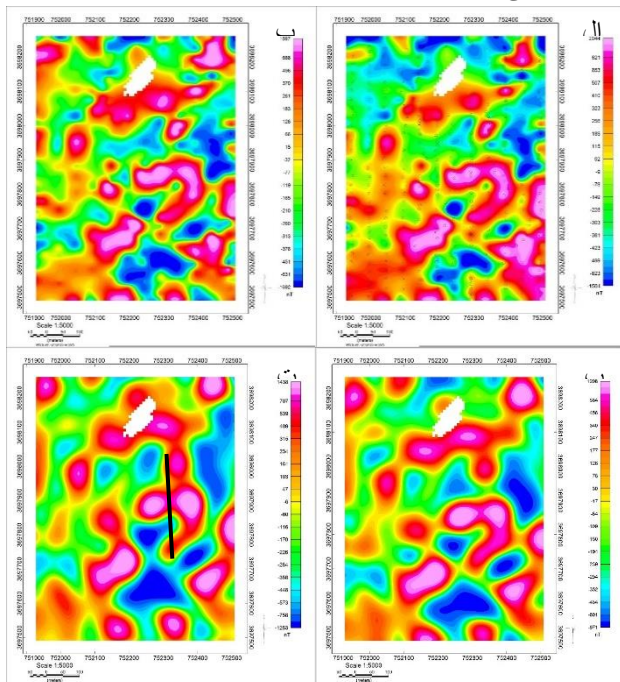
محدوده نائین در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال شهر انارک و در استان اصفهان واقع شده است. تصویر ماهواره ای محدوده در شکل ۱ نمایش داده شده است. راه دسترسی به این محدوده از طریق کنارگذر جاده آسفالت خور-انارک است. این محدوده بخشی از پهنه اکتشافی انارک می باشد که براساس تقسیم بندی ساختاری-رسوبی ایران، جزئی از زون ایران مرکزی محسوب می شود. ایران مرکزی یکی از واحدهای زمین شناسی اصلی ایران است که دارای ساختاری پیچیده شامل مجموعه ای از سنگ های رسوبی عمدتا کربناته به همراه سنگ های آتشفشانی و نفوذی می باشد. در شکل ۲-الف نقشه زمین شناسی محدوده با مقیاس ۱:۱۰۰۰ نمایش داده شده است. بر اساس این نقشه، لیتولوژی غالب در این محدوده از سنگ های پریدوتیتی است که با درجات مختلف دگرسان شده و آثار سرپانتینی شدن و حضور تالک در آنها مشاهده می شود. همچنین توده های گابرو در نیمه شرقی محدوده، در میان سنگ های پریدوتیتی نفوذ کرده اند. در حاشیه های شمالی و جنوبی محدوده نیز رسوبات کربناته و مارن های قرمز رنگ ظاهر شده است. حضور سازند لاخ که حاوی سنگ های کربناته دگرگون شده تا حد مرمر و مرمرهای سیلیسی شده می باشد، از دیگر ویژگی های زمین شناسی این محدوده محسوب می شود. سن این سنگ ها در حدود پروتروژئوئیک میانی تا بالایی تعیین شده است.

پی جویی های اکتشافی در محدوده نائین توسط شرکت فولاد مبارکه اصفهان در حال انجام است. از مهم ترین محورهای پی جویی های صورت گرفته، بررسی ارتباط ساختارهای زمین شناسی با کانی سازی مس در محدوده بوده است که نقشه هاله های آنومالی آن در شکل ۲-ب نمایش داده شده است. بجز ناحیه آبی رنگ، سایر زون های رنگی نمایش داده شده دارای عیار مس بیش از کلارک جهانی (۲۰۰ گرم بر تن) هستند که این مقدار در زون های قرمز رنگ به بیش از ۷۹۰ گرم بر تن می رسد. بر اساس این نقشه، بیشینه عیار مس در مرکز تا شرق محدوده مشاهده می شود که با حرکت به سوی غرب از شدت آن کاسته می شود. البته بی هنجاری قابل توجه و کوچک تر دیگری در نیمه جنوبی شرق نقشه نیز مشاهده می شود. وجود چند معدن مس متروکه در محدوده، شناخته شده بودن این بی هنجاری ها از دهه های قبل را تایید می کند.

به قطب (RTP) انجام می‌گیرد تا بی‌هنجاری مورد نظر متقارن و تک‌قطبی شده و دقیقاً روی منشا پیدایش خود قرار گیرد.

در محدوده نائین اندازه‌گیری مگنتومتري به صورت شبکه‌ای منظم از پروفیل‌ها در امتداد شمالی-جنوبی و فواصل بین پروفیلی ۵۰ متر و فاصله بین نقاط برداشت ۲۵ متر انجام شده است. برداشت این محدوده توسط دستگاه‌های مگنتومتر پروتون از نوع GEM SYSTEM مدل GSM-19T ساخت کشور کانادا انجام شده است. به منظور پردازش داده‌ها و شناسایی دقیق‌تر بی‌هنجاری‌ها ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj، میدان مغناطیسی مرجع زمین (IGRF) به مقدار ۴۷۸۹۱.۱۰ نانوتسلا از داده‌ها کاسته شد. سپس، با پردازش یک چند جمله‌ای درجه ۳، روند ناحیه‌ای موجود در محدوده محاسبه شده و از داده‌ها کاسته شد. همچنین با اعمال فیلتر پایین‌گذر با طول موج ۱۰۰ متر، اثر نوفه‌ها و پدیده‌های ریز سطحی از داده‌ها حذف شد. شکل‌های ۳-الف، ۳-ب و ۳-پ به ترتیب این مراحل پردازشی را نشان می‌دهند. شکل ۳-الف داده‌های مغناطیسی TMI اندازه‌گیری شده را پس از حذف IGRF نشان می‌دهد. همچنین در این شکل محل ایستگاه‌های برداشت داده نشان داده شده است. شکل ۳-ب، داده‌های شکل ۳-الف را بعد از حذف روند ناحیه‌ای درجه ۳ نشان داده است. داده‌های نقشه ۳-ب، پس از اعمال فیلتر پایین‌گذر ۱۰۰ متری به داده‌های نقشه شکل ۳-پ تبدیل شده‌اند. در این شکل، میدان مغناطیسی باقی‌مانده از ۹۷۱- تا ۱۲۰۸ نانوتسلا تغییر میکند. همچنین برای متقارن نمودن بی‌هنجاری مغناطیسی فیلتر برگردان به قطب بر این داده اعمال شد. شکل ۳-ت نتیجه اعمال RTP بر داده‌های باقی‌مانده در شکل ۳-پ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ناهنجاری بیشینه در مرکز توده مقداری در حدود ۱۴۳۸ نانوتسلا را نشان می‌دهد.

مقایسه شکل ۳-ت و نقشه زمین‌شناسی محدوده در شکل ۲-الف، نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های مثبت عموماً بر سنگ‌های پریدوتیتی و ویژه پریدوتیت‌های سربانتینیزه شده تمرکز یافته‌اند. همچنین بی‌هنجاری‌های منفی واقع در مرکز و نیمه جنوبی شکل ۳-ت، انطباق قابل توجهی با محل قرارگیری توده‌های نفوذی گابرویی در محدوده دارد.



شکل شماره ۳: مراحل پردازش داده‌های مغناطیسی. الف) نقشه شدت میدان مغناطیسی کل (TMI) محدوده مورد مطالعه پس از حذف اثر IGRF به همراه محل نقاط برداشت. ب) نتیجه محاسبه و حذف فیلتر روند با درجه ۳ از

می‌رسد. روش انکساری لرزه‌ای موجب اندازه‌گیری زمان انتشار یک موج لرزه‌ای انکساری و که در سطح ناپیوستگی محیط انتشار شده است، می‌شود.

### ۲-۳ گرانی سنجی (ثقل سنجی)

در روش اکتشافی گرانی سنجی یا ثقل سنجی، اندازه‌گیری تغییرات جزئی جاذبه‌های ناشی از سنگ‌ها و کانی‌ها مدنظر است. مبنای روش ذکر شده بر اساس قانون جاذبه نیوتون می‌باشد.

### ۳-۳ روش الکتریکی

اساس روش الکتریکی بر مبنای اندازه‌گیری خواص الکتریکی سنگ‌ها می‌باشد و شناسایی خواص الکتریکی سنگ‌ها روش‌های مختلف و بسیاری دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به قابلیت هدایت الکتریکی، پتانسیل خودزا و القاپذیری اشاره کرد. از مرسوم‌ترین روش‌های موجود برای روش الکتریکی، استفاده از جریان الکتریکی می‌باشد که به طور طبیعی در طبیعت وجود دارد.

### ۴-۳ روش تشعشع سنجی

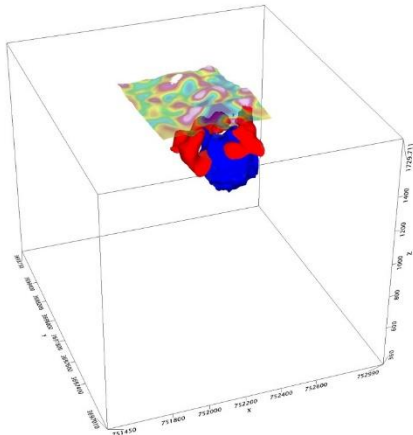
باتوجه به نیاز شدید نیروگاه‌های هسته‌ای به اکتشاف ذخایر اورانیوم و سایر عناصر رادیواکتیو، باعث شده است که روش‌های متعددی برای این بخش ارائه شود. برای پیشرفت در روش تشعشع سنجی ابزار و وسایل خاص مانند دستگاه‌های کاشف تشعشع خواهیم بود. باتوجه به ارزانی این دستگاه‌ها موجب شده است که عملیات‌های انجام شده در این مورد با پیشرفت بسیار خوبی همراه شود.

### ۴- آماده‌سازی و پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی

هدف اصلی مغناطیس‌سنجی شناسایی کیفی و کمی تغییرات خودپذیری مغناطیسی در زمین است. بسته به مقدار خودپذیری مغناطیسی توده‌ها، میزان مغناطش آنها در حضور میدان مغناطیسی بیرونی متفاوت بوده و در نتیجه میدان مغناطیسی تولید شده توسط آنها نیز متفاوت خواهد بود. برآیند میدان ناشی از مغناطش توده‌ها و میدان خارجی موجود در محدوده، برابر میدان مغناطیسی کل در هر نقطه خواهد بود. مگنتومترهای پروتونی که رایج‌ترین مغناطیس‌سنج‌های مورد استفاده در امور اکتشافی هستند، شدت میدان مغناطیسی کل (TMI) را در هر نقطه اندازه‌گیری می‌نمایند. به این ترتیب، داده‌های مغناطیسی برداشت شده، تنها مربوط به اهداف اکتشافی نیستند و لازم است تا با انجام پردازش‌های مختلف، میدان مغناطیسی غیر مرتبط با توده‌های هدف از داده‌ها کاسته شود. به این منظور تصحیحات و فیلترهای متنوعی پیشنهاد شده‌اند تا ضمن تقویت بی‌هنجاری ناشی از اهداف پی‌جویی، اطلاعاتی از محل قرارگیری و عمق تقریبی توده و ساختارهای زمین‌شناسی محدوده نیز به دست آید. در این راستا، ابتدا مقدار میدان مغناطیسی استاندارد مرجع (IGRF) زمین از میدان‌های اندازه‌گیری شده حذف می‌گردد. پس از کاستن IGRF، امکان دارد تغییرات دارای روندهای بزرگ در داده‌ها مشاهده شود. روندهای یاد شده عموماً توسط پدیده‌های عمیق، بزرگ و ناحیه‌ای با طول موج‌های بزرگ ایجاد شده‌اند. این پدیده‌ها معمولاً هدف بررسی‌های اکتشافی نیستند و شناسایی توده‌های معدنی را با مشکل مواجه می‌کنند. بنابراین، پدیده‌های عمیق و اثرات ناحیه‌ای با استفاده از فیلتر پایین‌گذر مناسب محاسبه شده و از داده‌ها کسر می‌شود. همچنین بسیاری از پدیده‌های کوچک سطحی که اثرشان تنها در حد یک نقطه یا تنها روی یک پروفیل مغناطیس‌سنجی ظاهر شده است، از لحاظ تحلیلی قابل اعتماد نیستند و با انجام فیلتر پایین‌گذر از داده‌ها حذف می‌شوند. داده‌های باقی‌مانده از پردازش‌های یاد شده، صرفاً مربوط به توده‌های با ابعاد و عمق مورد انتظار اهداف اکتشافی خواهد بود. با این وجود، این داده‌ها از بی‌هنجاری‌ها، رفتاری دو قطبی داشته و از بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی تشکیل شده‌اند که هیچ‌کدام دقیقاً بر محل منابع مغناطیسی قرار ندارند و همین امر تفسیر داده‌ها را مشکل می‌نماید. به منظور ارائه تفسیر ساده‌از بی‌هنجاری مغناطیسی و کاهش رفتار دوقطبی داده‌ها، پردازش برگردان

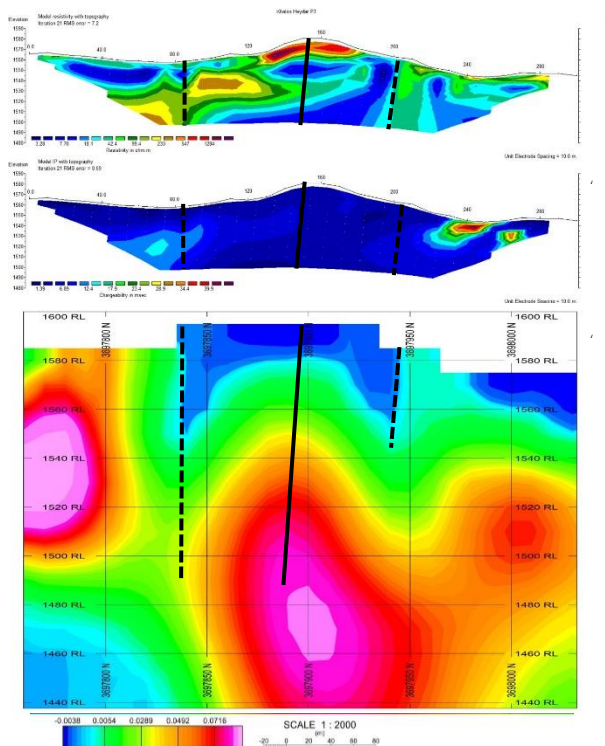
گرفته است.

با توجه به در اختیار بودن داده IP/Res تنها در یک پروفیل، مدل سازی وارون داده ها صرفا به صورت دوبعدی و با استفاده از نرم افزار Res2Dinv استفاده شده است. در این مدل سازی پس از طی ۲۱ تکرار، خطای مرتبط با پردازش داده های مقاومت ویژه به ۷/۲٪ و خطای داده های پلاریزاسیون القایی به ۵۹٪/۰ رسید. مدل های تخمین زده شده برای مقاومت ویژه و شارژ پذیری الکتریکی به ترتیب در شکل های ۵-الف و ۵-ب نمایش داده شده اند. همچنین مقطعی قائم از مدل خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده در محل پروفیل IP/Res نیز در شکل ۵-پ نمایش داده شده است که در ادامه توضیح داده می شود.



شکل شماره ۴: مدل سه بعدی تخمین زده شده برای خودپذیری

مغناطیسی حاصل از وارون سازی داده های مغناطیسی محدوده به همراه نقشه RTP که در بالای مدل و در سطح زمین نشان داده شده است. سطح توده با خودپذیری پایین تر از SI 001/0 به رنگ آبی و توده های با خودپذیری بالاتر از SI 168/0 به رنگ قرمز نشان داده شده است.



شکل شماره ۵: مقطع حاصل از وارون سازی داده های الف) مقاومت ویژه الکتریکی و ب) پلاریزاسیون القایی. ج) یک مقطع قائم از خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده در محل پروفیل IP/Res. خط چین ها در هر

داده های نقشه ۳-الف. پ) نتیجه اعمال فیلتر پائین گذر با حذف پدیده های با طول موج کمتر از ۱۰۰ متر از داده های نمایش داده شده در شکل ۳-ب. ت) نقشه برگردان به قطب (RTP) داده های نمایش داده شده در شکل ۳-پ. خط سیاه رنگ محل برداشت پروفیل IP/Res نشان داده شده در شکل ۲-الف را نشان می دهد.

#### ۵- مدل سازی وارون داده های مغناطیسی

هر چند پردازش های معمول داده های مغناطیسی محل تقریبی قرار گیری منبع مغناطیسی را ارائه می کنند، اما اطلاعاتی در مورد شکل و گسترش عمقی توده ها به دست نمی دهند. به منظور تعیین شکل، گستره و عمق قرار گیری توده مورد نظر معمولا از مدل سازی وارون داده های مغناطیسی استفاده می شود. در مطالعه حاضر مدل سازی وارون سه بعدی داده های با استفاده از الگوریتم غیرخطی لی و اولدنبرگ (۱۹۹۶) و توسط نرم افزار UBC Mag3d 4.0 انجام شده است. در الگوریتم یاد شده، ابتدا زمین به تعدادی شبکه به نام مش شامل تعدادی بلوک مکعب مستطیلی با ابعاد و عمق از پیش تعیین شده تقسیم می شود. مقدار خودپذیری زمین در هر یک از بلوک ها در ابتدا مجهول است و پارامتر مدل نامیده می شود. با انجام مدل سازی وارون، مقادیر خودپذیری مجهول در هر یک از این بلوک ها تخمین زده می شود.

در این مطالعه، مدل سازی وارون با استفاده از یک شبکه مش با تعداد سلول  $90 \times 110 \times 102$  در جهات شمالی، شرقی و عمقی انجام شد. ابعاد افقی بلوک ها در سطح زمین ۱۰ متری در نظر گرفته شد. این ابعاد به تدریج با دور شدن از مرکز و نزدیک شدن به دیواره های جانبی افزایش یافتند به گونه ای که در مرزهای جانبی مش، این ابعاد به ۶۰ متر رسید. در جهت عمق نیز ابعاد سلول ها در بلوک های واقع در سطح زمین از ۵ متر شروع شد و با افزایش عمق به صورت تدریجی به ۲۶ متر رسید.

در انجام مدل سازی یاد شده پس از طی ۱۰ تکرار، ریشه مجموع مربعات خطای تخمین (RMS) به ۱/۰۱ رسید. مدل به دست آمده از این وارون سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این شکل تنها بخشی از مدل یاد شده شامل توده آبی رنگ با خودپذیری کمتر از SI 001/0 و توده های قرمز رنگ با مقدار خودپذیری مغناطیسی در حدود SI 168/0 و بیشتر نمایش داده شده است. همچنین، نقشه داده های مغناطیسی شکل ۳-ت، بالای مدل یاد شده برای مقایسه قرار داده شده است. بنابراین شکل، توده های قرمز رنگ با خودپذیری مغناطیسی بالاتر در سطح قرار داشته و توده آبی رنگ با خودپذیری مغناطیسی پایین تر در عمق بیشتر و در وسط توده های با خودپذیری بالاتر قرار گرفته اند. محل توده های با خودپذیری بالاتر و پایینتر به ترتیب با محل بی هنجاری های مثبت و منفی در نقشه داده های مغناطیسی باقیمانده برگردان به قطب شده انطباق دارد. با توجه به انطباق بی هنجاری های یاد شده بر توده های پریدوتیتی و گابرویی، می توان گفت که احتمالا توده آبی رنگ، شکل و گسترش عمقی توده نفوذی گابرویی در میان توده های سطحی پریدوتیتی را نشان می دهد.

#### ۶- مطالعات مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی

با توجه به وجود معدن کاری مس در چند نقطه در شرق محدوده، برداشت داده های ژئوالکتریک شامل داده های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در جهت عمود بر گسترش یافتگی بی هنجاری مس انجام شد. این برداشت در یک پروفیل IP/Res با طول ۳۰۰ متر و با آرایش قطبی-دوقطبی و فواصل الکترودی ۱۰ متر با روند تقریباً شمالی-جنوبی صورت گرفته است. برداشت داده ها تا پرش ۱۶ ادامه یافته است. محل این پروفیل در نقشه زمین شناسی شکل ۲-الف نمایش داده شده است. ابتدای پروفیل در سر جنوبی آن در نظر گرفته شده است. اندازه گیری داده ها با استفاده از دستگاه GDD ساخت کشورکانادا انجام

دگرسانی بالا در حد تالک در وسط پروفیل است که دقیقا در شمال یک توده گابرویی قرار گرفته است. با توجه به اینکه گابروها در همه جا با کاهش خودپذیری مغناطیسی همراه بوده اند، احتمالا سیالات هیدروترمال عامل دگرسانی پریدوتیت ها از توده نفوذی گابرویی نشأت گرفته است. بنابراین می توان انتظار داشت، که هر جا افزایش خودپذیری مغناطیسی در این محدوده به شکل چشمگیر رخ داده است، ناشی از حضور تاثیر سیالات هیدروترمال با منشأ توده نفوذی گابرویی بوده است. در اینصورت انتظار می رود که حفر چاه در حاشیه این توده ها و محل توده های با خودپذیری مغناطیسی بالا، به مشاهده نمونه های با کانی سازی فلزی قابل توجه و از جمله کانه های مس منجر شود. از این رو، در شکل های ۵-الف تا ۵-پ، حفر یک چاه اکتشافی با شیب ۸۰ درجه و در فاصله ۱۵۰ متری از ابتدای پروفیل پیشنهاد شده است. در صورت امید بخش بودن نتایج حفاری در محل یاد شده، می توان در سایر مناطقی که دارای بی هنجاری مغناطیسی بالا بوده اند نیز اقدام به حفاری نمود.

قرار گیری محدوده مورد مطالعه در ایران مرکزی و وجود توده های پریدوتیتی دگرسان شده و مجموعه ای از سنگهای رسوبی کربناته تا شیل های دگرگون شده، شاید نشان دهنده احتمال تشکیل کانسارهای ماسیو سولفید الترامافیک باشد. حضور کانی سازی توام مگنتیت و مس نیز می تواند شاهد دیگری بر این مدعا باشد. با این وجود، عدم مشاهده بازالت های بالشی که بیانگر وجود افیولیت باشند این احتمال را کاهش داده است. عیار مس مشاهده شده در نمونه های لیتوشیمیایی نیز بیشتر به عیار معمول در کانسارهای پورفیری شباهت دارد. وجود توده نفوذی با خودپذیری مغناطیسی کمتر در عمق و افزایش خودپذیری مغناطیسی در سنگهای میزبان نیز یادآور کانسارهای پورفیری است که عموما ناشی از نفوذ توده های دیوریتی و مونزونیتی در سنگهای آندزیتی و داسیتی هستند. هر چند کانسار پورفیری با نفوذ توده های گابرویی در پریدوتیتی در مطالعات پیشین یافت نگردید. همچنین، جز کلریت و اپیدوت، هیچ آلتراسیونهای مرتبط با کانسارهای پورفیری در محدوده مشاهده نشده است. هر چند این دو آلتراسیون با توده های ماسیو سولفید مافیک تیپ قبرسی نیز در ارتباطند. در مجموع نیاز به انجام مطالعات بیشتری برای شناسایی ژنز کانی سازی مس در این محدوده احساس می شود. بویژه انجام سن سنجی دقیق سنگهای الترامافیک محدوده و انجام تحلیل های ژئوشیمیایی چند عنصری می تواند گامی در جهت رفع ابهامات یاد شده باشد.

## مراجع

- [۱] معتقد، ساسان، نخلیان، امین، عمادعلی، لطف الله، افتخاری، محمودیان، حشمت الله. تعیین فرکانس طبیعی خاک شهر بهبهان با استفاده از تحلیل داده های میکروترمور. جغرافیا و مخاطرات محیطی. Feb ۲۰۲۳. 24.
- [2] Yousefi M, Kreuzer OP, Nykänen V, Hronsky JM. Exploration information systems—A proposal for the future use of GIS in mineral exploration targeting. *Ore Geology Reviews*. 2019 Aug 1;111:103005.
- [3] Huang H, Shirkhani M, Tavosi J, Mahmoud O. A new intelligent dynamic control method for a class of stochastic nonlinear systems. *Mathematics*. 2022 Apr 22;10(9):1406.
- [۴] آل شیخ، رجیبی. بررسی روش های وزن دهی اطلاعات مکانی در GIS (مطالعه موردی: تهیه نقشه پتانسیل معدنی). نشریه سنجش از دور و GIS ایران. ۲۰۰۹. Jun 22;1(1).
- [5] Natasha N, Shahid M, Bibi I, Iqbal J, Khalid S, Murtaza B, Bakhat HF, Farooq AB, Amjad M, Hammad HM, Niazi NK. Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *Science of the Total Environment*. 2022 Feb 20;808:152024.

شکل محل وجود دو گسل و خط پر محل یک گمانه اکتشافی پیشنهادی در محدوده را نشان میدهد.

در شکل ۵-الف، چندین جا به جایی در تغییرات جانبی و قائم مقاومت ویژه الکتریکی و قائم مشاهده می شود که احتمالا مربوط به گسل های موجود در مسیر پروفیل هستند. از میان این گسل های احتمالی، دو گسل به طور واضح تاثیر خود را بر مدل شارژپذیری الکتریکی در شکل ۵-ب و مقطع قائم مدل خودپذیری مغناطیسی در شکل ۵-پ نمایش داده اند. برای مثال در شکل ۵-ب، اثر این گسلها به تقسیم شده به سه قسمت با شارژپذیری بالا در سمت راست، شارژپذیری پایین در بین دو گسل و شارژپذیری متوسط در سمت چپ نشان داده اند. اثر این گسلها در مقطع خودپذیری مغناطیسی وضوح بیشتری دارد و نشان می دهد که سطح زمین بین این دو گسل به وضوح خودپذیری مغناطیسی کمتری نسبت به اطراف خود دارد. مقایسه محل قرار گیری این گسلها با گسلهای موجود در نقشه زمین شناسی شکل ۲-الف، وجود دو گسل در محل های تقریبی ۸۵ متری و ۲۰۲ متری از انتهای جنوبی پروفیل را تایید می کند. نکته قابل توجه دیگر وجود توده ای با مقاومت ویژه زیاد و بیش از ۱۰۰۰ اهم متر در سطح زمین در محل وسط پروفیل است. مقایسه این شکل با شکل ۲-الف نشان می دهد که یک توده پریدوتیت با دگرسانی بالا در حد تالک در وسط پروفیل و در فاصله ۱۴۰ تا ۱۶۰ متر از انتهای جنوبی آن وجود دارد. مقایسه این پروفیل با شکل ۲-ب نیز بیانگر افزایش چشمگیر عیار مس در همین محل می باشد. همچنین درست زیر این توده و عمق ۲۰ تا ۳۰ متری از سطح زمین (ارتفاع ۱۵۵۵ تا ۱۵۴۵ متر از سطح دریا)، کاهش مقاومت ویژه چشمگیر به کمتر از ۱۸ اهم متر رخ داده است. این کاهش مقاومت ویژه خود را به صورت توده ای عدسی شکل نشان داده است. اما در سمت چپ این توده، مجددا مقاومت ویژه تا بیش از ۲۳۳ اهم متر افزایش یافته است. در شکل ۵-ب، در مرکز پروفیل و سطح زمین و همچنین در محل توده عدسی وار یاد شده، شارژپذیری الکتریکی ناچیز است اما در سمت چپ آن با افزایش شارژپذیری الکتریکی مواجه هستیم. در شکل ۵-پ، در سطح زمین و محل توده عدسی وار یاد شده، خودپذیری مغناطیسی در کمترین مقدار خود است اما با حرکت به سمت عمق در همان محل، افزایش قابل توجه خودپذیری مغناطیسی رخ داده است. همچنین در محدوده بین ابتدای پروفیل تا فاصله ۸۵ متری و رسیدن به گسل سمت چپ، به طور کلی با افزایش مقاومت ویژه، افزایش شارژپذیری و افزایش خودپذیری مغناطیسی در اعماق بیش از ۴۰ متر (ارتفاع کمتر از ۱۵۴۰ متر از سطح دریا) مواجه هستیم. محل این محدوده بر یک توده پریدوتیتی پوشیده از لایه ای سنگ ریزه در نقشه ۲-الف انطباق دارد.

## ۷- نتیجه گیری و پیشنهادات

مقایسه شکل های ۵-الف و ۵-ب گویای وجود یک تنه کانی سازی فلزی عدسی شکل در فاصله ۱۴۰ تا ۱۶۰ متری از ابتدای پروفیل IP/Res و در عمق ۲۰ تا ۳۰ متری سطح زمین است. در حاشیه جنوبی این توده و سمت چپ آن در شکل های ۵-الف و ۵-ب، افزایش مقاومت ویژه و افزایش شارژپذیری الکتریکی احتمالا نشانه کانی سازی افشان و پراکنده در ادامه همان توده فلزی است. در محلی که در سطح زمین تالک دیده شده در همان محل بی هنجاری بالای مغناطیسی نیز مشاهده می شود. بنابراین می توان احتمال داد که تشکیل تالک به دلیل تشدید دگرسانی پریدوتیت ها بوده است. می دانیم که در مرحله اول دگرسانی پریدوتیت ها با تشکیل سرپانتین، مگنتیت تشکیل می شود و سپس با افزایش دگرسانی، مگنتیت یاد شده مصرف شده و آمفیبولیت و تالک ایجاد می شوند. بنابراین توده عدسی وار که خود را با کاهش مقاومت ویژه و افزایش خودپذیری مغناطیسی نشان داده است، می تواند نشانه وجود یک تنه مگنتیتی باشد. نکته قابل توجه، قرار گیری این توده زیر توده پریدوتیت با

predictive scheme for PID tuning. Applied Sciences. 2021 Nov 5;11(21):10392.

[6] 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.

[7] Ghazali MF, Wikantika K, Harto AB, Kondoh A. Generating soil salinity, soil moisture, soil pH from satellite imagery and its analysis. Information Processing in Agriculture. 2020 Jun 1;7(2):294-306.

[۸] راوک، میکائیل. روش جدید برای شیرین سازی گاز طبیعی با ادغام روش بیولوژیکی و فرآیند Seaboard و تحلیل آن با استفاده از الگوریتم تکاملی. روش های محاسباتی در علوم مهندسی، ۱۴۰۲؛ (۱۱): ۱۱-۱۵. doi: 10.22034/cmcs.2023.705577

[۹] ابدالی، علی. بررسی عددی افزایش انتقال حرارت در جریان نانوسیال داخل لوله های سینوسی. روش های محاسباتی در علوم مهندسی، ۱۴۰۲؛ (۱۱): ۱۶-۲۰. doi: 10.22034/cmcs.2023.705578

[10] Feyzi MR, Niapour SK, Danyali S, Shafiei M. Supplying a Brushless DC Motor by z-source PV power inverter with FLC-IC MPPT by DTC drive. In 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems 2010 Oct 10 (pp. 694-699). IEEE.

[11] Cao Y, Mohammadzadeh A, Tavooosi J, Mobayen S, Safdar R, Fekih A. A new predictive energy management system: Deep learned type-2 fuzzy system based on singular value decomposition. Energy Reports. 2022 Nov 1;8:722-34.

[12] Fabre C. Advances in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis for geology: A critical review. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2020 Apr 1;166:105799.

[۱۳] کریم پور محمدحسن، ملک زاده شفاوردی آزاده، اسمعیلی سویری عباس، شعبانی سعید. کانی شناسی و تغییرات زمین شیمیایی سنگ میزبان آلتزه شده در ناحیه معدنی سرب و روی ایرانکوه، جنوب غرب اصفهان. زمین شناسی کاربردی پیشرفته ۱۳۹۷؛ ۸(۴) (پیاپی ۳۰): ۱-۱۶. Available from: <https://sid.ir/paper/394515/fa>

[14] Ma Z, Mei G. Deep learning for geological hazards analysis: Data, models, applications, and opportunities. Earth-Science Reviews. 2021 Dec 1;223:103858.

[۱۵] رسولی بیرامی میثم، شفیع بافتی بهنام، عمرانی جعفر، حیدریان فرانک. رفتار ماگمایی و گرمایی عناصر کمیاب در توده سینیتی رزگاه (سراب، آذربایجان خاوری): کاربرد برای ارزیابی توان کانه زایی اورانیم توده. علوم زمین ۱۳۹۳؛ ۲۴(۹۴) (سنگ و کانی): ۱۱۳-۱۲۸. Available from: <https://sid.ir/paper/31349/fa>

[16] Adler A, Araya-Polo M, Poggio T. Deep learning for seismic inverse problems: Toward the acceleration of geophysical analysis workflows. IEEE Signal Processing Magazine. 2021 Feb 25;38(2):89-119.

[17] Ren Z, Kalscheuer T. Uncertainty and resolution analysis of 2D and 3D inversion models computed from geophysical electromagnetic data. Surveys in Geophysics. 2020 Jan;41(1):47-112.

[18] 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.

[19] 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.

[20] Manea EF, Cioflan CO, Coman A, Michel C, Poggi V, Fäh D. Estimating geophysical bedrock depth using single station analysis and geophysical data in the extra-Carpathian area of Romania. Pure and Applied Geophysics. 2020 Oct;177:4829-44.

[21] Aazami R, Heydari O, Tavooosi J, Shirkhani M, Mohammadzadeh A, Mosavi A. Optimal Control of an Energy-Storage System in a Microgrid for Reducing Wind-Power Fluctuations. Sustainability. 2022 May 19;14(10):6183.

[22] Tavooosi J, Shirkhani M, Abdali A, Mohammadzadeh A, Nazari M, Mobayen S, Asad JH, Bartoszewicz A. A new general type-2 fuzzy