

## مکان‌یابی موقعیت آهنربا با استفاده از شبکه‌های

### عصبی مصنوعی

حامد رفیعی<sup>۱</sup>، امیر صمدی<sup>۱</sup>، امیر محمد نداف شرق<sup>۱</sup>، صدرا نداف شرق<sup>۲</sup>، حامد حفیظ<sup>۳</sup>، محمد سجاد ابویسانی<sup>۱</sup>، سارا ناصری گلستانی<sup>۱</sup>، محمدرضا اکبرزاده توتونچی<sup>۱</sup>، علی مرادی<sup>۴</sup>، مجتبی ایزدی<sup>۳</sup>، علیرضا اکبرزاده توتونچی<sup>۳</sup>  
<sup>۱</sup>گروه مهندسی برق، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران  
<sup>۲</sup>گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران  
<sup>۳</sup>گروه مهندسی مکانیک، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران  
<sup>۴</sup>دانشگاه علوم پزشکی مشهد، ایران

**چکیده:** تشخیص مکان آهنربا به کمک حسگرهای مغناطیسی در دهه‌های اخیر مورد توجه و پژوهش قرار گرفته‌اند. به علت قدرت نفوذ میدان مغناطیسی در بسیاری از مواد و هم‌چنین غیرتهاجمی بودن آهنربا، از آن به عنوان جایابی تجهیزات پزشکی، صنعتی، نظامی،... بهره گرفته می‌شود. لزوم مکان‌یابی دقیق آهنربا در کاربردهای مختلف، سبب به‌کارگیری روش‌های متفاوت از قبیل روش‌های تحلیلی و غیرتحلیلی شده است. در این پژوهش، پس از بررسی کارهای صورت گرفته بر روی روش تحلیلی آهنربای دوقطبی، به علت دقت پایین آن به روش‌های غیرتحلیلی از قبیل شبکه عصبی پیش‌خورده، شبکه عصبی بازگشتی و شبکه تطبیقی بر پایه‌ی استنتاج فازی پرداخته شده است. بعد از طراحی مدل فیزیکی سیستم مکان‌یابی حرکت آهنربا در سه حالت ۵، ۱۰ و ۱۵ حسگر میدان مغناطیسی، نتایج روش تحلیلی و سه روش غیرتحلیلی با هم مقایسه گردیده است و نشان داده شده است که می‌توان به کمک شبکه عصبی بازگشتی با حداکثر خطای ۱ میلی‌متر و روش شبکه تطبیقی بر پایه سیستم استنتاج فازی با میانگین مربعات خطای ۰/۰۱۶ مکان آهنربا را ردیابی کرد.

**واژه‌های کلیدی:** مکان‌یابی آهنربا؛ مدل دوقطبی آهنربا؛ شبکه‌های عصبی؛ شبکه تطبیقی بر پایه سیستم استنتاج فازی

ثانیه تاخیری دارد [۵]. در [۲] علاوه بر این، با خطای اندازه‌گیری جهت آهنربا نیز مواجه بوده‌است.

برای کاهش خطای مکان‌یابی از معیارهای مختلفی استفاده شده‌است، برخی پس از این‌که مطلوب‌ترین تعداد و چینش برای حسگرهای مغناطیسی را بدست آورده‌اند، با استفاده از مدل آهنربای دوقطبی، فاصله‌ی متعلق به کمترین خطا برای مکان‌یابی آهنربا را محاسبه کرده‌اند [۸]، برخی دیگر برای بهبود بخشیدن به سرعت و دقت مدل آهنربای دوقطبی، از یک فرم حلقه بسته برای محاسبه‌ی خطای میانگین استفاده کرده‌اند که خطا به میزان

#### ۱. مقدمه

در مکان‌یابی آهنربای مغناطیسی، معمولاً دو روش بهینه‌سازی معکوس و شبکه‌های مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد، که هر روش مزایا و معایب مختص به خود را دارد [۱۰]. از مدل آهنربای دوقطبی به منظور مکان‌یابی آهنربا توسط حسگرهای مغناطیسی در موارد بسیاری استفاده کرده‌اند [۱-۵]. این مدل ریاضی در مقابل اغتشاشات میدان‌های مغناطیسی اطراف ضعیف است و علاوه بر آن در محاسبه کردن مکان آهنربا، در حدود میلی

\*نویسنده مسئول،

آدرس پست الکترونیک [akbazar@um.ac.ir](mailto:akbazar@um.ac.ir)

در [۹] تفاوت میان روش تحلیلی دوقطبی و روش بر مبنای شبکه های عصبی به منظور موقعیت یابی آهنربا از منظر دیگری مورد بررسی قرار گرفته است. در [۹] نشان داده شده است که در صورت وجود خطا در حسگرهای مغناطیسی، روش بر مبنای شبکه های عصبی به مراتب از روش های تحلیلی در مقابل خطا تحمل پذیرتر<sup>۶</sup> است. این تحمل پذیری در مقابل خطا، در مواردی مانند جراحی های پزشکی بیش از پیش حائز اهمیت است. در مقاله ذکر شده، از موقعیت یابی آهنربا به منظور کمک به جراح در جراحی لوله گذاری از بینی<sup>۸</sup> استفاده شده است. نشان داده شده است که شبکه های عصبی در مقایسه با روش های تحلیلی تنها در محیطی که آموزش دیده اند دقت خوبی در تقریب موقعیت آهنربا دارند و خارج از این محدوده، خطا زیاد است. این بدان معنی است که برای مکان یابی آهنربا در محیط وسیع نیاز به پیش-رویه<sup>۹</sup> زیادی در مقایسه با روش های تحلیلی هست، اما هنگامی که آموزش کامل شود، این روش می تواند با سرعت بیشتر موقعیت یابی کند. برخلاف روش های تحلیلی، سرعت در روش شبکه عصبی وابسته به داده های ورودی (از حسگرها) نیست و به همین علت، این روش برای کاربردهای عملی مناسب تر است.

## ۲. مدل دوقطبی آهنربا

ابتدا به بیان مدل دو قطبی آهنربا که در روش بهینه سازی استفاده می شود، می پردازیم.

در مدل دو قطبی، چگالی شار مغناطیسی در نقطه  $i$  (حسگر شماره  $i$ )، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$B(P_{si}) = \frac{\mu}{4\pi} \left( \frac{3(H_m \cdot P_i)P_i - R_i^3 \cdot H_m}{|P_i|^5} \right) \quad (1)$$

که  $\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی محیط،  $H_m$  بردار ممان مغناطیسی آهنربا،  $P_m$  بردار مکان آهنربا و همچنین فرض می شود حسگر  $i$  ام در موقعیت  $P_{si}$  نسبت به دستگاه مختصات مرجع قرار گرفته باشد. بردار شار مغناطیسی در محل حسگر  $i$  با جایگزین کردن  $P_i = P_{si} - P_m$  در رابطه (۱) به دست می آید. شکل ۱ نحوه ی مدل کردن آهنربا به عنوان دو قطبی مغناطیسی را نشان می دهد.

مدل دو قطبی به این دلیل که فقط یک پارامتر مجهول ( $H_m$ ) بردار ممان مغناطیسی) دارد، بسیار ساده و صریح می باشد. گشتاور مغناطیسی معمولاً مقداری ثابت و با توجه به شدت میدان مغناطیسی ماده آهنربا و حجم آهنربا در نظر گرفته می شود.

قابل توجهی کاهش یافته است [۴]. در [۱۱] با دو آزمایش مجزا نشان داده است که شبکه های عصبی دارای خطای مکان یابی بسیار کمتری نسبت به مدل آهنربای دوقطبی هستند.

مکان یابی آهنربا بر پایه مدل دوقطبی<sup>۲</sup> که یک حل تقریبی میدان مغناطیسی آهنربا است، اشکالاتی به همراه دارد. از جمله این مشکلات می توان به در نظر نگرفتن ابعاد هندسی آهنربا در بدست آوردن میدان مغناطیسی آن و عدم تطابق مدل با واقعیت در حضور مواد فرومگنتیک اشاره کرد [۷]. اشکال اول منجر به نادقیقی مدل در فاصله های نزدیک می شود. به منظور بهبود این مشکل، تلاش هایی در جهت احتساب ابعاد فیزیکی آهنربا در مدل دوقطبی صورت گرفته است. در [۵] شکل هندسی آهنربا به جای تنها یک دو قطبی مغناطیسی، با آرایه ای از دو قطبی های مغناطیسی تقریب زده شده است. در تلاشی دیگر [۱۲] مدلی تلفیقی ارائه شده است که در فاصله های دور برای مکان یابی آهنربا از مدل دوقطبی، در فاصله های نزدیک از مدل شبکه های عصبی مصنوعی و برای گذار از مدل دوقطبی به مدل شبکه عصبی از تابع سیگموئید استفاده شده است تا این گذار نرم و بدون تغییرات ناگهانی باشد. هر دو روش ارائه شده در حضور ماده فرومگنتیک کارایی خود را از دست می دهند و بهره گیری از این روش ها تنها در محیط ایزوله مغناطیسی امکان پذیر است. از آنجا که این مشکل ناشی از انعطاف ناپذیری روش های تحلیلی نسبت به اغتشاش<sup>۴</sup> و اعوجاج<sup>۵</sup> است، در [۷] روشی کاملاً بر مبنای شبکه های عصبی به منظور مکان یابی آهنربا استفاده کرده اند. پیشتر در [۱، ۲] از شبکه های عصبی برای موقعیت یابی آهنربا استفاده شده بود. این شبکه های عصبی مستقیماً از روی داده های حسگرهای مغناطیسی آموزش داده نمی شدند و تنها برای حل معکوس همان مدل دوقطبی تنظیم شده بودند. در [۷] برای موقعیت یابی آهنربا در یک صفحه دوبعدی، با استفاده از شبکه های عصبی پرسپترون<sup>۶</sup> توانسته اند موقعیت آهنربا را با دقت بهتر و در زمانی کمتر از ۰/۱۵ روش تحلیلی دوقطبی تقریب بزنند؛ علاوه بر این، در [۷] نشان داده شد که شبکه های عصبی در نبود مواد فرومگنتیک و نویز مغناطیسی، قابلیت موقعیت یابی آهنربا را با دقت قابل مقایسه با روش های تحلیلی دارا هستند. نکته مهم این است که شبکه های عصبی این قابلیت را دارند که این دقت را حتی در حضور مواد فرومگنتیک و نویز مغناطیسی حفظ کنند.

<sup>6</sup> Multi-layer Perceptron

<sup>7</sup> Fault-tolerant

<sup>8</sup> Nasogastric Intubation (NG)

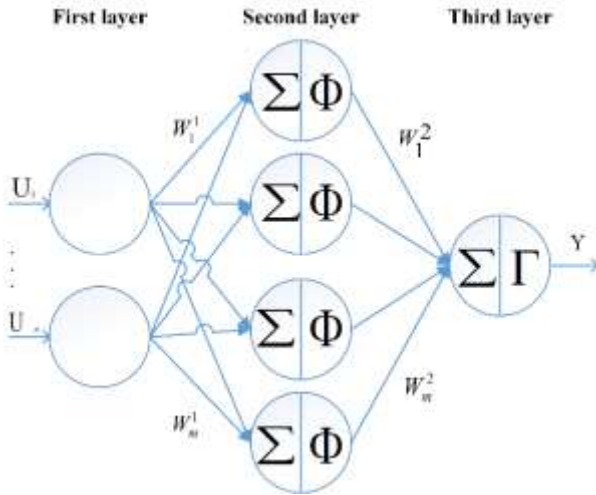
<sup>9</sup> Pre-procedure

<sup>2</sup> Dipole

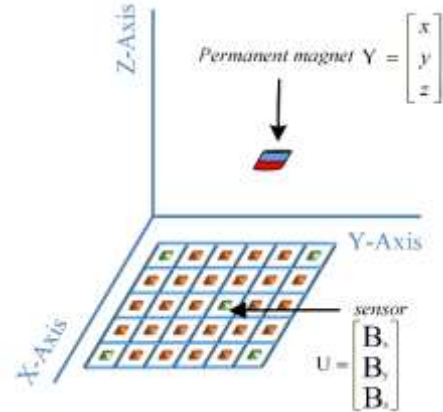
<sup>3</sup> Ferromagnetic

<sup>4</sup> Disturbance

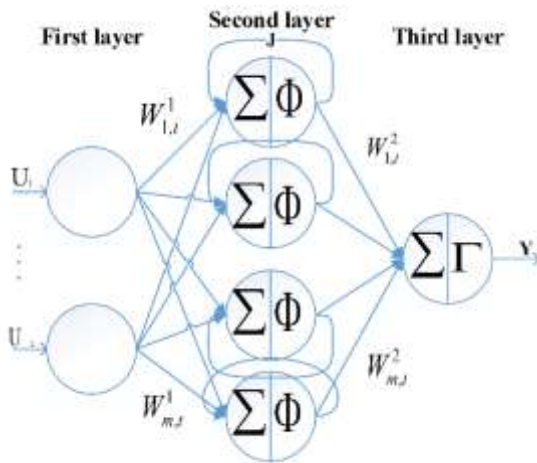
<sup>5</sup> Distortion



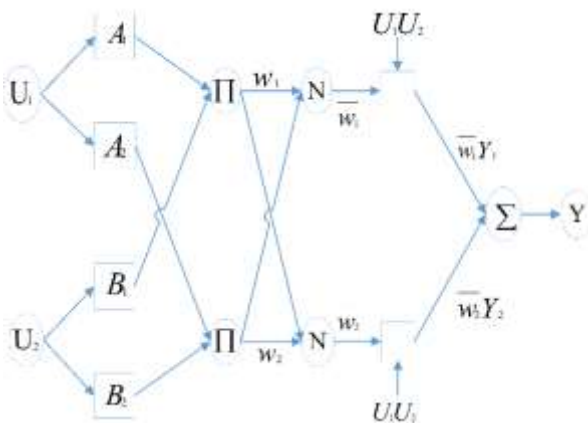
شکل ۲: ساختار شبکه ی عصبی پیشخورد



شکل ۱: مدل کردن آهنربا به عنوان یک دوقطبی مغناطیسی



شکل ۳: ساختار شبکه های عصبی بازگشتی



شکل ۴: ساختار شبکه تطبیقی بر پایه سیستم استنتاج فازی

### ۳. روش پیشنهادی

در این پژوهش، از سه نوع شبکه (شبکه عصبی پیشخورد، شبکه عصبی بازگشتی، و شبکه تطبیقی برپایه سیستم استنتاج فازی) برای یادگیری مکان آهنربا استفاده می شود.

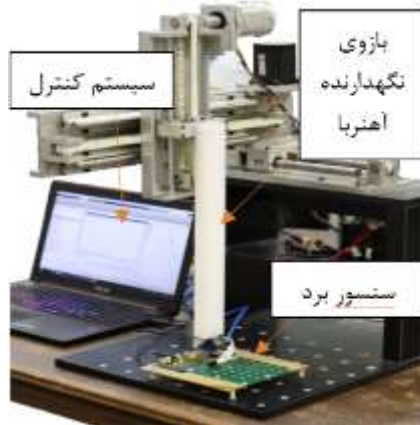
شبکه ی عصبی پیشخورد از سه لایه تشکیل شده است (شکل ۲). لایه اول، لایه ورودی است که ورودی پس از عبور از لایه اول وارد لایه مخفی می شود، این لایه از یک تا چند زیر لایه تشکیل شده است. سپس خروجی لایه مخفی، وارد لایه خروجی می شود و در انتها خروجی ظاهر می شود. این نوع از شبکه ها برای کلاس بندی، رگرسیون و ... استفاده می شوند. روابط این شبکه به صورت زیر می باشد.

$$Y = \Gamma \left( \sum \Phi \left( \sum_n U_i w_i^1 \right) w_i^2 \right) \quad (2)$$

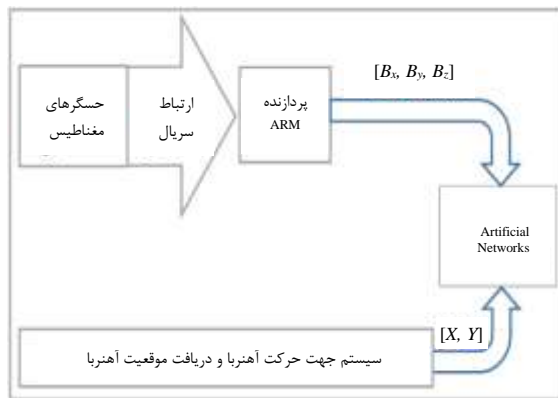
$U, Y, w^1, w^2 \in R$  به ترتیب داده ی ورودی، داده خروجی، وزن بین لایه ورودی و مخفی و وزن بین لایه مخفی و خروجی شبکه هستند.  $\Gamma$  تابع فعال سازی لایه ی خروجی و  $\Phi$  تابع فعال سازی لایه ی مخفی است.

نوع دیگری از شبکه های عصبی، بازگشتی اند و بسیار مناسب برای داده های متوالی می باشند (شکل (۳)). بازگشت از هر لایه به لایه دیگر و به خود لایه امکان پذیر است.

$$Y = \Gamma \left( \sum \Phi \left( \sum_n U_{i,t} w_{i,t}^1 + \sum_n U_{i,t-1} w_{i,t-1}^1 \right) w_{i,t}^2 \right) \quad (3)$$



شکل ۵: ساختار سیستم آزمایشگاهی



شکل ۶: دیاگرام نحوه ارتباطات در سیستم مکان یابی آهنربا

اطلاعات دریافتی از سه محور حسگرهای مغناطیسی توسط ارتباط سریال به پردازنده ARM ارسال می شود، سپس توسط ارتباط شبکه (TCP/IP) این اطلاعات  $([B_x, B_y, B_z])$  جهت پردازش در شبکه عصبی به نرم افزار MATLAB ارسال می شود. برد حسگرها بر روی پایه ربات به صورت افقی ثابت شده است. برای دریافت اطلاعات مربوط به مکان آهنربا از یک ربات سه درجه آزادی کارترین (شکل ۵) با سه استپر موتور مجزا و همچنین برد الکترونیکی ARDUINO برای حرکت آهنربا بر روی حسگرها در فاصله  $(2/2)$  سانتی متر) و سرعت مشخص (۱ میلی متر بر ثانیه) استفاده می شود. آهنربا به پروپ که بر روی یک بازو ثابت شده است به قسمت End effector ربات متصل شده است. موقعیت دریافتی آهنربا  $([B_x, B_y, B_z])$  (با دقت  $0/01$  میلی متر) توسط برد الکترونیکی ARDUINO به وسیله ارتباط سریال برای نرم افزار MATLAB ارسال می شود تا در شبکه های مصنوعی پردازش شود (شکل ۵).

به ترتیب داده ی ورودی، داده خروجی، وزن بین لایه ورودی و مخفی، وزن بازگشتی در لایه مخفی، و وزن بین لایه مخفی و خروجی شبکه هستند. تابع فعال سازی لایه ی خروجی  $\Phi$  و تابع فعال سازی لایه ی مخفی است (توضیحات بیشتر شبکه های عصبی در [۶]).

شبکه تطبیقی بر پایه سیستم استنتاج فازی از مزیت های شبکه عصبی و سیستم فازی به طور همزمان سود می برد. این ویژگی باعث به وجود آمدن هم افزایی شده و خواصی را منتج می شود که در هیچ یک از آن ها به تنهایی وجود ندارد. در این ساختار، قوانین فازی در قالب شبکه عصبی آموزش می یابند. شکل ۴ شبکه تطبیقی بر پایه سیستم استنتاج فازی را نشان می دهد. مقادیر ورودی  $(U)$  با عبور از توابع عضویت  $(A, B)$ ، درجه درستی می گیرند و بعد از محاسبه قدرت آتش  $(II)$ ، نرمال می شوند  $(N)$ . در نهایت مجموع ترکیب های خطی ورودی، خروجی را می سازد (توضیحات بیشتر در [۳]).

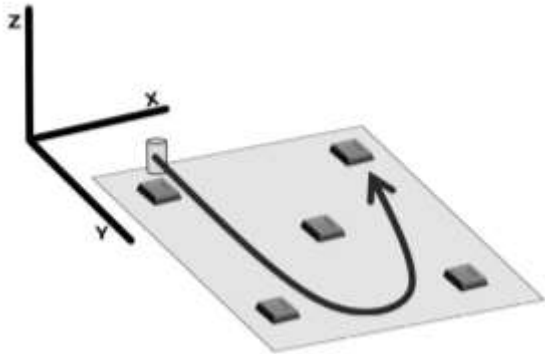
$$Y = \sum_i \bar{w}_i Y_i = \frac{\sum_i w_i Y_i}{\sum_i w_i} \quad (4)$$

که  $Y$  خروجی نهایی،  $w_i$  قدرت قانون،  $Y$  قسمت تالی قانون،  $\bar{w}_i$  قدرت قانون نرمال شده. شبکه های ذکر شده به طور گسترده برای شناسایی و کنترل سیستم های غیر خطی مورد استفاده قرار می گیرند.

## ۴. مدل فیزیکی

سیستم مکان یابی حرکت آهنربا شامل حسگرهای مغناطیس سنج، آهنربای نئودیمیومی نوع N42 (قطر ۳ میلی متر و طول ۱۰ میلی متر) و کامپیوتر شخصی است. حسگرهای استفاده شده، سنسورهای سه-محور از نوع Magnetoresistive (LIS3MDL) توسط شرکت STMicroelectronics می باشند. در این سیستم موقعیت آهنربای مغناطیسی توسط مقادیر اندازه گیری شده سه مولفه ی حسگر مغناطیسی مشخص می شود. از جمله مزایای حسگرهای سه محوره می توان به کاهش تعداد حسگرها، کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت به علت اندازه گیری مولفه های میدان مغناطیسی در یک نقطه، اشاره کرد.

حسگرهای سه محوره می توان به کاهش تعداد حسگرها، کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت به علت اندازه گیری مولفه های میدان مغناطیسی در یک نقطه، اشاره کرد.



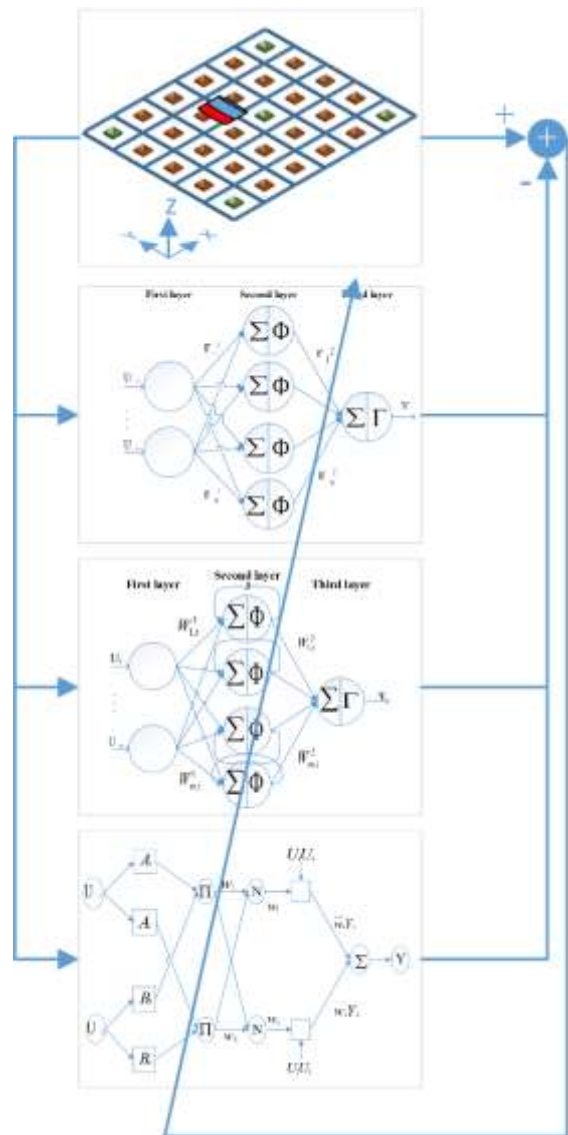
شکل ۸: مسیر حرکت آهنربا

## ۵. نتایج

در این آزمایش آهنربا مسیر مشخص شده را پیمایش کرده و توسط ۳۰ حسگر میدان مغناطیسی به تفکیک ۳ مولفه حس می شود. در اینجا تنها از داده های ۵، ۱۰ و ۱۵ حسگر استفاده می شود. شکل ۸ نحوه ی حرکت آهنربا و محل قرارگیری ۵ حسگر میدان مغناطیسی را نشان می دهد.

میدان مغناطیسی حس شده وارد شبکه عصبی پیشخورد، شبکه عصبی بازگشتی و ANFIS می شود. خروجی شبکه های عصبی و ANFIS با محل آهنربا مقایسه شده و از اختلاف آنها توسط الگوریتم بازگشت خطا آموزش داده می شود (شکل ۷). در شبکه های عصبی مذکور دو لایه مخفی حاوی ۵ نورون و در ANFIS از ۱۰ خوشه استفاده شده است.

جدول ۱ حاصل از گزارش خطا در روش های تحلیلی، FNN، RNN و ANFIS می باشد به طوری که MSE X نشان دهنده ی میانگین مربعات خطا محور X و MSE Y میانگین خطا محور Y و MAX مقدار بیشینه خطای هر دو محور است. چنانچه مشاهده می شود شبکه عصبی بازگشتی عملکرد بهتری نسبت به سایرین دارد.



شکل ۷: ساختار آموزش ردیابی آهنربا

جدول ۱: مقایسه گزارش خطا در روش های مختلف

	RNN			FNN			ANFIS			Dipole		
	MSE X	MSE Y	MAX	MSE X	MSE Y	MAX	MSE X	MSE Y	MAX	MSE X	MSE Y	MAX
5 sensors	1.47	0.015	3.41	0.0114	0.053	3.54	0.968	2.27	8.49	1.02	0.59	2.82
10 sensors	0.035	0.0164	1.62	0.026	0.042	1.73	0.061	0.0183	5.39	0.585	1.5	3.45
15 sensors	0.001	0.091	0.99	0.006	0.015	1.06	0.016	0.014	1.14	0.862	1.07	2.25

- University of Calgary, 2017.
- [8] S. Su *et al.*, "Investigation of the relationship between tracking accuracy and tracking distance of a novel magnetic tracking system," vol. 17, no. 15, pp. 4928-4937, 2017.
- [9] Z. Sun, S. Foong, L. Maréchal, T. H. Teo, U.-X. Tan, and A. Shabbir, "Real-time sensor fault detection and compensation in a passive magnetic field-based localization system," in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2016 IEEE International Conference on*, 2016, pp. 1040-1046: IEEE.
- [10] Z. Sun, L. Maréchal, and S. Foong, "Passive Magnetic Localization in Medical Intervention," in *Electromagnetic Actuation and Sensing in Medical Robotics*: Springer, 2018, pp. 163-187.
- [11] Z. Sun, L. Maréchal, S. J. C. m. Foong, and p. i. biomedicine, "Passive magnetic-based localization for precise untethered medical instrument tracking," vol. 156, pp. 151-161, 2018.
- [12] F. Y. Wu, S. Foong, and Z. J. I. A. T. o. M. Sun, "A hybrid field model for enhanced magnetic localization and position control," vol. 20, no. 3, pp. 1278-1287, 2015.

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش به ارائه مدل دقیق تر از مکان یابی آهنربا توسط میدان مغناطیسی حس شده پرداخته شد. با استفاده از داده های حاصل از مدل فیزیکی سیستم مکان یابی حرکت آهنربا، مدل آهنربا دوقطبی، شبکه های عصبی پیشخورد، بازگشتی و شبکه تطبیقی بر پایه سیستم استنتاج فازی با یکدیگر مقایسه شدند. چنانچه مشاهده شد، روش های شبکه عصبی بازگشتی و شبکه تطبیقی بر پایه سیستم استنتاج فازی می توانند تخمین دقیق تری از مکان آهنربا به دست آورند. به نظر می رسد با بهبود دقت و تحمل پذیری مکان یابی در حضور نویز، می توان از آن در بسیاری از کاربردهای پزشکی و صنعتی بهره برد؛ لذا مطالعه بیشتر بر روی تحمل پذیری و هم چنین نحوه ی چینش حسگرها توصیه می شود.

## ۵. مراجع

- [1] M. Akutagawa, Y. Kinouchi, and H. Nagashino, "A neural measurement system for a moving object using magnetic sensors," in *Fuzzy Systems, 1995. International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium., Proceedings of 1995 IEEE Int*, 1995, vol. 1, pp. 409-414: IEEE.
- [2] X. Guo, G. Yan, W. J. J. o. m. e. He, and technology, "A novel method of three-dimensional localization based on a neural network algorithm," vol. 33, no. 3, pp. 192-198, 2009.
- [3] J.-S. J. I. t. o. s. Jang, man, and cybernetics, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system," vol. 23, no. 3, pp. 665-685, 1993.
- [4] W. Kim, J. Song, and F. C. J. I. T. o. I. E. Park, "Closed-form position and orientation estimation for a three-axis electromagnetic tracking system," vol. 65, no. 5, pp. 4331-4337, 2018.
- [5] K.-M. Lee and H. J. I. T. o. M. Son, "Distributed multipole model for design of permanent-magnet-based actuators," vol. 43, no. 10, pp. 3904-3913, 2007.
- [6] O. Nelles, *Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] M. Russel, "A Neural Network Driven Sensor Array for Locating a Permanent Magnet,"