



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)  
دانشکده مهندسی کامپیوتر

گزارش سمینار کارشناسی ارشد  
مهندسی کامپیوتر- معماری سیستم‌های کامپیوتری

# شتابدهی سخت افزاری پیش‌بینی عمر باقی‌مانده مفید دستگاه‌های دوار با استفاده از شبکه عصبی ترنسفرمر بر بستر FPGA

نگارش

رضا آدینه پور

استاد راهنما

جناب آقای دکتر مرتضی صاحب‌الزمانی

مرداد ۱۴۰۳



## سپاس

از استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر مرتضی صاحب‌الزمانی، که به بنده اعتماد کردند و با کمک‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغ‌شان، مرا در به سرانجام رساندن این پایان‌نامه یاری دادند، سپاسگزاری و قدردانی می‌کنم. حمایت‌های مستمر و بی‌وقفه ایشان، نه تنها انگیزه و توان مضاعفی به من بخشید، بلکه مسیر پژوهشی این پایان‌نامه را با روشنایی دانش و تجربه‌شان هموار ساخت. بدون همراهی، مشورت‌ها و تشویق‌های استاد محترم، تحقق این هدف امکان‌پذیر نمی‌بود. از صمیم قلب برای ایشان آرزوی سلامتی، موفقیت و برکت دارم.

چنان مجنون شوم گویی که شهر آشوب دورانم  
نه پندی و نه اندرزی به گوشم پنبه چسباندم  
بماند یادگار این شعر  
که من از دار این دنیا فقط این شعر می‌دانم.

## چکیده

در محیط‌ها و کارخانه‌های صنعتی، همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها، نگهداری و تعمیر ابزارآلات و دستگاه‌های صنعتی است. دستگاه‌هایی که هرکدام وظیفه‌ای مهم را در خط تولید هر شرکتی بر عهده دارند و کوچک‌ترین آسیب و خرابی می‌تواند خط تولید شرکت را مختل کند. بنابراین، نیاز است که همواره بتوانیم وضعیت فعلی سلامت دستگاه‌ها را مورد پایش قرار دهیم و بتوانیم زمان خرابی دستگاه و عمر مفید باقی‌مانده آن را پیش‌بینی نماییم.

پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده مفید (Remaining Useful Life) یا به اختصار RUL وظیفه‌ای بسیار مهم در زمینه پیش‌بینی و مدیریت سلامت (PHM) ابزار و تجهیزات صنعتی است. پیش‌بینی دقیق RUL امری حیاتی و مهم است چرا که امکان تعمیر و نگهداری به‌موقع را فراهم می‌کند، مدت‌زمان خرابی دستگاه را کاهش می‌دهد و می‌توان بر اساس عمر مفید باقی‌مانده دستگاه، آن را تحت بار قرار داده و کارایی عملیاتی را بهبود بخشید.

کلیدواژه‌ها: عمر باقی‌مانده مفید، RUL، ترنسفرمر، FPGA

# فهرست مطالب

۱	مقدمه	۱
۱	۱-۱ تعریف مسئله	۱
۲	۲-۱ اهمیت موضوع	۲
۲	۳-۱ اهداف پژوهش	۲
۲	۴-۱ ساختار پایان نامه	۲
۳	۲ مفاهیم اولیه	۳
۳	۱-۲ نحوه‌ی نگارش	۳
۳	۱-۱-۲ پرونده‌ها	۳
۴	۲-۱-۲ عبارات ریاضی	۴
۴	۳-۱-۲ علائم ریاضی پرکاربرد	۴
۵	۴-۱-۲ لیست‌ها	۵
۵	۵-۱-۲ درج شکل	۵
۶	۶-۱-۲ درج جدول	۶
۶	۷-۱-۲ درج الگوریتم	۶
۶	۸-۱-۲ محیط‌های ویژه	۶
۷	۲-۲ برخی نکات نگارشی	۷
۷	۱-۲-۲ فاصله‌گذاری	۷

۸	..... ۲-۲-۲ شکل حروف
۸	..... ۳-۲-۲ جدانویسی
۱۰	..... ۳ کارهای پیشین
۱۰	..... ۱-۳ مسائل خوشه‌بندی
۱۲	..... ۲-۳ خوشه‌بندی $k$ -مرکز
۱۴	..... ۳-۳ مدل جویبار داده
۱۵	..... ۴-۳ تقریب‌پذیری
۱۶	..... ۴ چالش‌ها و نوآوری‌ها
۱۷	..... ۵ نتیجه‌گیری
۱۸	..... مراجع
۲۰	..... واژه‌نامه
۲۲	..... آ مطالب تکمیلی

## فهرست جداول

۶	..... عملگرهای مقایسه‌ای ۱-۲
۱۵	..... نمونه‌هایی از کران پایین تقریب‌پذیری مسائل خوشه‌بندی ۱-۳

## فهرست تصاویر

۵	۱-۲ یک گراف و پوشش رأسی آن
۶	۲-۲ نمونه شکل ایجادشده توسط نرم افزار Ipe
۱۲	۱-۳ نمونه ای از مسئله ی ۲-مرکز
۱۳	۲-۳ نمونه ای از مسئله ی ۲-مرکز با داده های پرت



# فصل ۱

## مقدمه

پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده<sup>۱</sup> (یا به اختصار RUL) یکی از مباحث کلیدی در حوزه مدیریت سلامت و پیش‌بینی<sup>۲</sup> (PHM) ابزارها و تجهیزات صنعتی است. RUL به مدت زمانی اشاره دارد که یک دستگاه یا ابزار قبل از رسیدن به نقطه خرابی و از کار افتادن نهایی، می‌تواند به طور مؤثر کار کند. این حوزه پژوهشی با استفاده از تکنیک‌های مختلف و پیشرفته در تلاش است تا به صنایع کمک کند تا بهره‌وری و کارایی خود را افزایش دهند و هزینه‌های ناشی از تعمیر و نگهداری غیرضروری را کاهش دهند.

## ۱-۱ تعریف مسئله

در صنایع مختلف، از جمله خودروسازی، هوافضا، نفت و گاز و تولیدات صنعتی، تجهیزات و ماشین‌آلات به طور مداوم تحت شرایط کاری سخت و پیچیده قرار دارند. هرگونه خرابی ناگهانی این تجهیزات می‌تواند به وقفه‌های غیرمنتظره در تولید منجر شود که علاوه بر خسارات مالی، ممکن است اثرات زیان‌باری بر کیفیت محصول نهایی و رضایت مشتریان داشته باشد. بنابراین، نیاز است که وضعیت فعلی سلامت دستگاه‌ها به طور مستمر پایش شود و زمان خرابی دستگاه و عمر مفید باقی‌مانده آن با دقت بالایی پیش‌بینی شود. این پیش‌بینی نیازمند استفاده از تحلیل داده‌های حسگرها، مدل‌سازی ریاضی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین<sup>۳</sup> و عمیق<sup>۴</sup> است.

---

<sup>1</sup>Remaining Useful Life

<sup>2</sup>Prognostics and Health Management

<sup>3</sup>Machine Learning

<sup>4</sup>Deep Learning

## ۲-۱ اهمیت موضوع

اهمیت پیش‌بینی دقیق RUL در صنعت به دلیل تاثیر مستقیم آن بر بهره‌وری، کارایی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری غیرضروری، به‌خوبی شناخته شده است. تکنیک‌های پیشرفته در حوزه هوش مصنوعی<sup>۵</sup> و تحلیل داده‌های بزرگ<sup>۶</sup> این امکان را فراهم کرده‌اند که داده‌های جمع‌آوری شده از تجهیزات به صورت بلادرنگ<sup>۷</sup> تحلیل شوند و مدل‌های پیش‌بینی RUL با دقت بالاتری ارائه شوند. این پیشرفت‌ها، به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد که فرآیندهای نگهداری و تعمیرات خود را بهینه‌سازی کنند و تصمیم‌گیری‌های بهتری در زمینه مدیریت دارایی‌های خود انجام دهند.

## ۳-۱ اهداف پژوهش

این پژوهش بر توسعه یک راه‌حل شتابدهی سخت‌افزاری بر بستر FPGA پیش‌بینی RUL با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی که وظیفه آن آموزش و یادگیری توالی و درنهایت پیش‌بینی آن است تمرکز دارد. با استفاده از قابلیت پردازش موازی FPGA و همچنین توان مصرفی بسیار پایین آن، هدف ما افزایش کارایی و مقیاس‌پذیری سیستم‌های پیش‌بینی RUL به‌ویژه برای دستگاه‌های دوار است.

## ۴-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل به شرح زیر ارائه می‌شود. مفاهیم اولیه‌ی و نحوه‌ی کار شبکه عصبی ترنسفرمر در فصل «۲» اشاره شده است. فصل «۳» به مطالعه و بررسی کارهای پیشین مرتبط با پیش‌بینی عمر باقی‌مانده می‌پردازد. در فصل «۴»، چالش‌های موجود در این پژوهش و راه‌حل‌های ما برای رفع این چالش‌ها ارائه شده است. فصل «۵» به جمع‌بندی کارهای انجام شده در این پژوهش و ارائه‌ی پیشنهادهایی برای انجام کارهای آتی خواهد پرداخت.

---

<sup>۵</sup>Artificial Intelligence

<sup>۶</sup>Big Data Analytics

<sup>۷</sup>Real Time

## فصل ۲

### مفاهیم اولیه

دومین فصل پایان‌نامه به طور معمول به معرفی مفاهیمی می‌پردازد که در پایان‌نامه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این فصل به عنوان یک نمونه، نکات کلی در خصوص نحوه‌ی نگارش پایان‌نامه و نیز برخی نکات نگارشی به اختصار توضیح داده می‌شوند.

#### ۱-۲ نحوه‌ی نگارش

##### ۱-۱-۲ پرونده‌ها

پرونده‌ی اصلی پایان‌نامه در قالب استاندارد<sup>۱</sup> `thesis.tex` نام دارد. به ازای هر فصل از پایان‌نامه، یک پرونده در شاخه‌ی `chapters` ایجاد نموده و نام آن را در `thesis.tex` (در قسمت فصل‌ها) درج نمایید. برای مشاهده‌ی خروجی، پرونده‌ی `thesis.tex` را با زی‌لاتک کامپایل کنید. مشخصات اصلی پایان‌نامه را می‌توانید در پرونده‌ی `front/info.tex` ویرایش کنید.

---

<sup>۱</sup> قالب استاندارد از گیت‌هاب به نشانی [github.com/zarrabi/thesis-template](https://github.com/zarrabi/thesis-template) قابل دریافت است.

## ۲-۱-۲ عبارات ریاضی

برای درج عبارات ریاضی در داخل متن از  $\$ \dots \$$  و برای درج عبارات ریاضی در یک خط مجزا از  $\$\$ \dots \$\$$  یا محیط equation استفاده کنید. برای مثال عبارت  $2x + 3y$  در داخل متن و عبارت زیر

$$\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = 2^n \quad (1-2)$$

در یک خط مجزا درج شده است. دقت کنید که تمامی عبارات ریاضی، از جمله متغیرهای تک حرفی مانند  $x$  و  $y$  باید در محیط ریاضی یعنی محصور بین دو علامت  $\$$  باشند.

## ۳-۱-۲ علائم ریاضی پرکاربرد

برخی علائم ریاضی پرکاربرد در زیر فهرست شده‌اند. برای مشاهده‌ی دستور معادل پرونده‌ی منبع را ببینید.

• مجموعه‌های اعداد:  $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Z}^+, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$

• مجموعه:  $\{1, 2, 3\}$

• دنباله:  $\langle 1, 2, 3 \rangle$

• سقف و کف:  $\lceil x \rceil, \lfloor x \rfloor$

• اندازه و متمم:  $|A|, \overline{A}$

• همنهشتی:  $a \equiv 1 \pmod{n}$  یا (پیمانه‌ی  $n$ )  $a \equiv 1$

• ضرب و تقسیم:  $\times, \cdot, \div$

• سه نقطه:  $1, 2, \dots, n$

• کسر و ترکیب:  $\frac{n}{k}, \binom{n}{k}$

• اجتماع و اشتراک:  $A \cup (B \cap C)$

• عملگرهای منطقی:  $\neg p \vee (q \wedge r)$

• پیکان‌ها:  $\rightarrow, \Rightarrow, \leftarrow, \Leftarrow, \leftrightarrow, \Leftrightarrow$

• عملگرهای مقایسه‌ای:  $\neq, \leq, \not\leq, \geq, \not\geq$

• عملگرهای مجموعه‌ای:  $\in, \notin, \setminus, \subset, \subseteq, \subsetneq, \supset, \supseteq, \supsetneq$

• جمع و ضرب چندتایی:  $\sum_{i=1}^n a_i, \prod_{i=1}^n a_i$

• اجتماع و اشتراک چندتایی:  $\bigcup_{i=1}^n A_i, \bigcap_{i=1}^n A_i$

• برخی نمادها:  $\infty, \emptyset, \forall, \exists, \Delta, \angle, \ell, \equiv, \therefore$

## ۴-۱-۲ لیست‌ها

برای ایجاد یک لیست می‌توانید از محیط‌های «فقرات» و «شمارش» همانند زیر استفاده کنید.

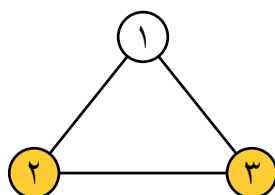
• مورد اول ۱. مورد اول

• مورد دوم ۲. مورد دوم

• مورد سوم ۳. مورد سوم

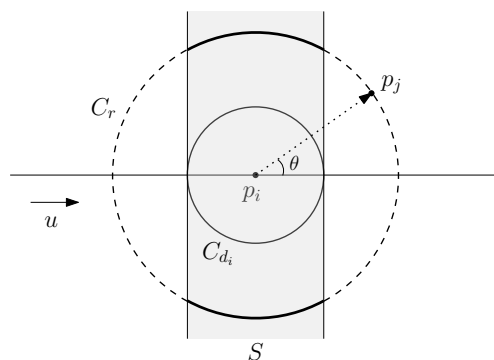
## ۵-۱-۲ درج شکل

یکی از روش‌های مناسب برای ایجاد شکل استفاده از نرم‌افزار LaTeX Draw و سپس درج خروجی آن به صورت یک فایل tex درون متن با استفاده از دستور fig یا centerfig است. شکل ۱-۲ نمونه‌ای از اشکال ایجادشده با این ابزار را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: یک گراف و پوشش رأسی آن

همچنین می‌توانید با استفاده از نرم‌افزار Ipe شکل‌های خود را مستقیماً به صورت pdf ایجاد نموده و آن‌ها را با دستورات img یا centerimg درون متن درج کنید. برای نمونه، شکل ۲-۲ را ببینید.



شکل ۲-۲: نمونه شکل ایجادشده توسط نرم افزار Ipe

## ۶-۱-۲ درج جدول

برای درج جدول می‌توانید با استفاده از دستور «جدول» جدول را ایجاد کرده و سپس با دستور «لوح» آن را درون متن درج کنید. برای نمونه جدول ۱-۲ را ببینید.

جدول ۱-۲: عملگرهای مقایسه‌ای

عنوان	عملگر
کوچک‌تر	<
بزرگ‌تر	>
مساوی	==
نامساوی	<>

## ۷-۱-۲ درج الگوریتم

برای درج الگوریتم می‌توانید از محیط «الگوریتم» استفاده کنید. یک نمونه در الگوریتم ۱ آمده است.

## ۸-۱-۲ محیط‌های ویژه

برای درج مثال‌ها، قضیه‌ها، لم‌ها و نتیجه‌ها به ترتیب از محیط‌های «مثال»، «قضیه»، «لم» و «نتیجه» استفاده کنید. برای درج اثبات قضیه‌ها و لم‌ها از محیط «اثبات» استفاده کنید.

ورودی: گراف  $G = (V, E)$

خروجی: یک پوشش رأسی از  $G$

۱: قرار بده  $C = \emptyset$

۲: تا وقتی  $E$  تهی نیست:

۳: یال دلخواه  $uv \in E$  را انتخاب کن

۴: رأس‌های  $u$  و  $v$  را به  $C$  اضافه کن

۵: تمام یال‌های واقع بر  $u$  یا  $v$  را از  $E$  حذف کن

۶:  $C$  را برگردان

---

تعریف‌های داخل متن را با استفاده از دستور «مهم» به صورت تیره نشان دهید. تعریف‌های پایه‌ای‌تر را درون محیط «تعریف» قرار دهید.

تعریف ۱-۲ (اصل لانه‌کبوتری) اگر  $n + 1$  کبوتر یا بیش‌تر درون  $n$  لانه قرار گیرند، آن‌گاه لانه‌ای وجود دارد که شامل حداقل دو کبوتر است.

## ۲-۲ برخی نکات نگارشی

این فصل حاوی برخی نکات ابتدایی ولی بسیار مهم در نگارش متون فارسی است. نکات گردآوری‌شده در این فصل به هیچ وجه کامل نیست، ولی دربردارنده‌ی حداقل مواردی است که رعایت آن‌ها در نگارش پایان‌نامه ضروری به نظر می‌رسد.

### ۱-۲-۲ فاصله‌گذاری

۱. علائم سجاوندی مانند نقطه، ویرگول، دونقطه، نقطه‌ویرگول، علامت سؤال و علامت تعجب بدون فاصله از کلمه‌ی پیشین خود نوشته می‌شوند، ولی بعد از آن‌ها باید یک فاصله قرار گیرد. مانند: من، تو، او.
۲. علامت‌های پرانتز، آکولاد، کروشه، نقل قول و نظایر آن‌ها بدون فاصله با عبارات داخل خود نوشته می‌شوند، ولی با عبارات اطراف خود یک فاصله دارند. مانند: (این عبارت) یا {آن عبارت}.

۳. دو کلمه‌ی متوالی در یک جمله همواره با یک فاصله از هم جدا می‌شوند، ولی اجزای یک کلمه‌ی مرکب باید با نیم‌فاصله<sup>۲</sup> از هم جدا شوند. مانند: کتاب درس، محبت‌آمیز، دوبخشی.

۴. اجزای فعل‌های مرکب با فاصله از یک‌دیگر نوشته می‌شوند، مانند: تحریر کردن، به سر آمدن.

## ۲-۲-۲ شکل حروف

۱. در متون فارسی به جای حروف «ک» و «ی» عربی باید از حروف «ک» و «ی» فارسی استفاده شود. همچنین به جای اعداد عربی مانند ۵ و ۶ باید از اعداد فارسی مانند ۵ و ۶ استفاده نمود. برای این کار، توصیه می‌شود صفحه‌کلید فارسی استاندارد<sup>۳</sup> را بر روی سیستم خود نصب کنید.

۲. عبارات نقل‌قول‌شده یا مؤکد باید درون علامت نقل قول «» قرار گیرند، نه “”. مانند: «کشور ایران».

۳. کسره‌ی اضافه‌ی بعد از «ه» غیرملفوظ به صورت «هی» یا «ه» نوشته می‌شود. مانند: خانه‌ی علی، دنباله‌ی فیوناچی.

تبصره: اگر «ه» ملفوظ باشد، نیاز به «ی» ندارد. مانند: فرمانده دلیر، پادشه خوبان.

۴. پایه‌های همزه در کلمات، همیشه «ئ» است، مانند: مسئله و مسئول، مگر در مواردی که همزه ساکن است که در این صورت باید متناسب با اعراب حرف پیش از خود نوشته شود. مانند: رأس، مؤمن.

## ۳-۲-۲ جدانویسی

۱. علامت استمرار، «می»، توسط نیم‌فاصله از جزء بعدی فعل جدا می‌شود. مانند: می‌رود، می‌توانیم.

۲. شناسه‌های «ام»، «ای»، «ایم»، «اید» و «اند» توسط نیم‌فاصله، و شناسه‌ی «است» توسط فاصله از کلمه‌ی پیش از خود جدا می‌شوند. مانند: گفته‌ام، گفته‌ای، گفته است.

۳. علامت جمع «ها» توسط نیم‌فاصله از کلمه‌ی پیش از خود جدا می‌شود. مانند: این‌ها، کتاب‌ها.

۴. «به» همیشه جدا از کلمه‌ی بعد از خود نوشته می‌شود، مانند: به نام و به آن‌ها، مگر در مواردی که «ب» صفت یا فعل ساخته است. مانند: بسزا، ببینم.

---

<sup>۲</sup> «نیم‌فاصله» فاصله‌ای مجازی است که در عین جدا کردن اجزای یک کلمه‌ی مرکب از یک‌دیگر، آن‌ها را نزدیک به هم نگه می‌دارد. معمولاً برای تولید این نوع فاصله در صفحه‌کلیدهای استاندارد از ترکیب Shift+Space استفاده می‌شود.

<sup>۳</sup> صفحه‌کلید فارسی استاندارد برای ویندوز، تهیه‌شده توسط بهنام اسفهد



۵. «به» همواره با فاصله از کلمه‌ی بعد از خود نوشته می‌شود، مگر در مواردی که «به» جزئی از یک اسم یا صفت مرکب است. مانند: تناظر یک‌به‌یک، سفر به تاریخ.
۶. علامت صفت برتری، «تر»، و علامت صفت برترین، «ترین»، توسط نیم‌فاصله از کلمه‌ی پیش از خود جدا می‌شوند. مانند: سنگین‌تر، مهم‌ترین.
- تبصره: کلمات «بهتر» و «بهترین» را می‌توان از این قاعده مستثنی نمود.
۷. پیشوندها و پسوندهای جامد، چسبیده به کلمه‌ی پیش یا پس از خود نوشته می‌شوند. مانند: همسر، دانشکده، دانشگاه.
- تبصره: در مواردی که خواندن کلمه دچار اشکال می‌شود، می‌توان پسوند یا پیشوند را جدا کرد. مانند: هم‌میهن، هم‌ارزی.
۸. ضمیرهای متصل چسبیده به کلمه‌ی پیش از خود نوشته می‌شوند. مانند: کتابم، نامت، کلامشان.

## فصل ۳

# کارهای پیشین

در فصل سوم پایان نامه، کارهای پیشین انجام شده روی مسئله به تفصیل توضیح داده می شود. نمونه ای از فصل کارهای پیشین در زیر آمده است.<sup>۱</sup>

### ۱-۳ مسائل خوشه بندی

مسئله ی خوشه بندی<sup>۲</sup> یکی از مهم ترین مسائل در زمینه ی داده کاوی به حساب می آید. در این مسئله، هدف دسته بندی تعدادی شیء به گونه ای است که اشیاء درون یک دسته (خوشه)، نسبت به یکدیگر در برابر دسته های دیگر شبیه تر باشند (معیارهای متفاوتی برای تشابه تعریف می گردد). این مسئله در حوزه های مختلفی از علوم کامپیوتر از جمله داده کاوی، جست و جوی الگو<sup>۳</sup>، پردازش تصویر<sup>۴</sup>، بازیابی اطلاعات<sup>۵</sup> و رایانش زیستی<sup>۶</sup> مورد استفاده قرار می گیرد [۳].

تا کنون راه حل های زیادی برای این مسئله ارائه شده است که از لحاظ معیار تشخیص خوشه ها و نحوه انتخاب یک خوشه، با یکدیگر تفاوت بسیاری دارند. به همین خاطر مسئله ی خوشه بندی یک مسئله ی بهینه سازی چندهدفه<sup>۷</sup> محسوب می شود.

همان طور که در مرجع [۴] ذکر شده است، خوشه در خوشه بندی تعریف واحدی ندارد و یکی از دلایل

---

<sup>۱</sup> مطالب این فصل نمونه از پایان نامه ی آقای بهنام حاتمی گرفته شده است.

<sup>۲</sup> Clustering

<sup>۳</sup> Pattern recognition

<sup>۴</sup> Image analysis

<sup>۵</sup> Information retrieval

<sup>۶</sup> Bioinformatics

<sup>۷</sup> Multi-objective

وجود الگوریتم‌های متفاوت، همین تفاوت تعریف‌ها از خوشه است. بنابراین با توجه به مدلی که برای خوشه‌ها ارائه می‌شود، الگوریتم متفاوتی نیز ارائه می‌گردد. در ادامه به بررسی تعدادی از معروف‌ترین مدل‌های مطرح می‌پردازیم:

- مدل‌های مرکزگرا: در این مدل‌ها، هر دسته با یک مرکز نشان داده می‌شود. از جمله معروف‌ترین روش‌های خوشه‌بندی بر اساس این مدل، خوشه‌بندی  $k$ -مرکز، خوشه‌بندی  $k$ -میانگین<sup>۸</sup> و خوشه‌بندی  $k$ -میان<sup>۹</sup> است.

- مدل‌های مبتنی بر توزیع نقاط: در این مدل، دسته‌ها با فرض پیروی از یک توزیع احتمالی مشخص می‌شوند. از جمله الگوریتم‌های معروف ارائه شده در این مدل، الگوریتم بیشینه‌سازی امید ریاضی<sup>۱۰</sup> است.

- مدل‌های مبتنی بر تراکم نقاط: در این مدل، خوشه‌ها متناسب با ناحیه‌های متراکم نقاط در مجموعه داده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- مدل‌های مبتنی بر گراف: در این مدل، هر خوشه به مجموعه از رئوس گفته می‌شود که تمام رئوس آن با یک‌دیگر همسایه باشند. از جمله الگوریتم‌های معروف این مدل، الگوریتم خوشه‌بندی HCS<sup>۱۱</sup> است.

الگوریتم‌های ارائه شده تنها از نظر نوع مدل با یک‌دیگر متفاوت نیستند. بلکه، می‌توان آن‌ها را از لحاظ نحوه‌ی تخصیص نقاط بین خوشه‌ها نیز تقسیم‌بندی کرد:

- تخصیص قطعی داده‌ها: در این نوع خوشه‌بندی هر داده دقیقاً به یک خوشه اختصاص داده می‌شود.
- تخصیص قطعی داده‌ها با داده‌ی پرت: در این نوع خوشه‌بندی ممکن است بعضی از داده‌ها به هیچ خوشه‌ای اختصاص نیابد، اما بقیه داده‌ها هر کدام دقیقاً به یک خوشه اختصاص می‌یابد.
- تخصیص قطعی داده: در این نوع خوشه‌بندی هر داده دقیقاً به یک خوشه اختصاص داده می‌شود.
- خوشه‌بندی هم‌پوشان: در این نوع خوشه‌بندی هر داده می‌تواند به چند خوشه اختصاص داده شود. در گونه‌ای از این مدل، می‌توان هر نقطه را با احتمالی به هر خوشه اختصاص می‌یابد. به این گونه از خوشه‌بندی، خوشه‌بندی نرم<sup>۱۲</sup> گفته می‌شود.

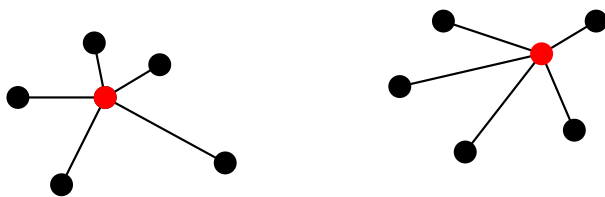
<sup>۸</sup>  $k$ -Means

<sup>۹</sup>  $k$ -Median

<sup>۱۰</sup> Expectation-maximization

<sup>۱۱</sup> Highly Connected Subgraphs

<sup>۱۲</sup> Soft clustering



شکل ۱-۳: نمونه‌ای از مسئله‌ی ۲-مرکز

- خوشه‌بندی سلسه‌مراتبی: در این نوع خوشه‌ها، داده‌ها به گونه‌ای به خوشه‌ها تخصیص داده می‌شود که دو خوشه یا اشتراک ندارند یا یکی به طور کامل دیگری را می‌پوشاند. در واقع در بین خوشه‌ها، رابطه‌ی پدر فرزندی برقرار است.

در بین دسته‌بندی‌های ذکر شده، تمرکز اصلی این پایان‌نامه بر روی مدل مرکزگرا و خوشه‌بندی قطعی با داده‌های پرت با مدل  $k$ -مرکز است. همان‌طور که ذکر شد علاوه بر مسئله‌ی  $k$ -مرکز که به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد،  $k$ -میانه و  $k$ -میانگین از جمله معروف‌ترین خوشه‌بندی‌های مدل مرکزگرا هستند. در خوشه‌بندی  $k$ -میانه، هدف افراز نقاط به  $k$  خوشه است به گونه‌ای که مجموع مربع فاصله‌ی هر نقطه از میانه‌ی نقاط آن خوشه، کمینه گردد. در خوشه‌بندی  $k$ -میانگین، هدف افراز نقاط به  $k$  خوشه است به گونه‌ای که مجموع فاصله‌ی هر نقطه از میانگین نقاط داخل خوشه (یا مرکز آن خوشه) کمینه گردد.

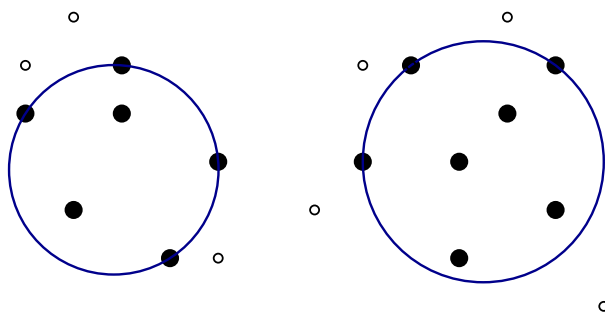
### ۲-۳ خوشه‌بندی $k$ -مرکز

یکی از رویکردهای شناخته‌شده برای مسئله‌ی خوشه‌بندی، مسئله‌ی  $k$ -مرکز است. در این مسئله هدف، پیدا کردن  $k$  نقطه به عنوان مرکز دسته‌ها است به‌طوری‌که شعاع دسته‌ها تا حد ممکن کمینه شود. مثالی از مسئله‌ی ۲-مرکز در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در این پژوهش، مسئله‌ی  $k$ -مرکز با متریک‌های خاص و برای  $k$ های کوچک مورد بررسی قرار گرفته است و هر کدام از تعریف رسمی مسئله‌ی  $k$ -مرکز در زیر آمده است:

مسئله‌ی ۱-۳ ( $k$ -مرکز) گراف کامل بدون جهت  $G = (V, E)$  با تابع فاصله‌ی  $d$ ، که از نامساوی مثلثی پیروی می‌کند داده شده است. زیرمجموعه‌ی  $S \subseteq V$  با اندازه‌ی  $k$  را به‌گونه‌ای انتخاب کنید که عبارت زیر را کمینه کند:

$$\max_{v \in V} \{ \min_{s \in S} d(v, s) \} \quad (۱-۳)$$

گونه‌های مختلفی از مسئله‌ی  $k$ -مرکز با محدودیت‌های متفاوت توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است. از جمله‌ی این گونه‌ها، می‌توان به حالتی که در بین داده‌های ورودی، داده‌های پرت وجود دارد، اشاره کرد.



شکل ۲-۳: نمونه‌ای از مسئله‌ی ۲-مرکز با داده‌های پرت

در واقع در این مسئله، قبل از خوشه‌بندی می‌توانیم تعدادی از نقاط ورودی را حذف نموده و سپس به خوشه‌بندی نقاط بپردازیم. سختی این مسئله از آنجاست که نه تنها باید مسئله‌ی خوشه‌بندی را حل نمود، بلکه در ابتدا باید تصمیم گرفت که کدام یک از داده‌ها را به‌عنوان داده‌ی پرت در نظر گرفت که بهترین جواب در زمان خوشه‌بندی به دست آید. در واقع اگر تعداد نقاط پرتی که مجاز به حذف است، برابر صفر باشد، مسئله به مسئله‌ی  $k$ -مرکز تبدیل می‌شود. نمونه‌ای از مسئله‌ی ۲-مرکز با ۷ داده‌ی پرت را در شکل ۲-۳ می‌توانید ببینید. تعریف دقیق‌تر این مسئله در زیر آمده است:

مسئله‌ی ۲-۳ ( $k$ -مرکز با داده‌های پرت) یک گراف کامل بدون جهت  $G = (V, E)$  با تابع فاصله‌ی  $d$ ، که از نامساوی مثلثی پیروی می‌کند داده‌شده است. زیرمجموعه‌ی  $Z \subseteq V$  با اندازه‌ی  $z$  و مجموعه‌ی  $S \subseteq V - Z$  با اندازه‌ی  $k$  را انتخاب کنید به طوری که عبارت زیر را کمینه کند:

$$\max_{v \in V-Z} \{ \min_{s \in S} d(v, s) \} \quad (2-3)$$

گونه‌ی دیگری از مسئله‌ی  $k$ -مرکز که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، حالت جویبار داده‌ی آن است. در این گونه از مسئله‌ی  $k$ -مرکز، در ابتدا تمام نقاط در دسترس نیستند، بلکه به‌مرور زمان نقاط در دسترس قرار می‌گیرند. محدودیت دومی که وجود دارد، محدودیت حافظه است، به‌طوری‌که نمی‌توان تمام نقاط را در حافظه نگه داشت و بعضاً حتی امکان نگهداری در حافظه‌ی جانبی نیز وجود ندارد و به‌طور معمول باید مرتبه‌ی حافظه‌ای کمتر از مرتبه حافظه‌ی خطی<sup>۱۳</sup> متناسب با تعداد نقاط استفاده نمود. از این به بعد به چنین مرتبه‌ای، مرتبه‌ی زیرخطی<sup>۱۴</sup> می‌گوییم. مدلی که ما در این پژوهش بر روی آن تمرکز داریم مدل جویبار داده تک‌گذره<sup>۱۵</sup> [۵] است. یعنی تنها یک بار می‌توان از ابتدا تا انتهای داده‌ها را بررسی کرد و پس از عبور از یک داده، اگر آن داده در حافظه ذخیره نشده باشد، دیگر به آن دسترسی وجود ندارد. علاوه بر این، در هر لحظه باید بتوان به پرسمان (برای تمام نقاطی از جویبار داده که تاکنون به آن دسترسی داشته‌ایم) پاسخ داد.

Linear<sup>۱۳</sup>  
sublinear<sup>۱۴</sup>  
Single pass<sup>۱۵</sup>

مسئله ۳-۳ ( $k$ -مرکز در حالت جویبار داده) مجموعه‌ای از نقاط در فضای  $d$ -بعدی به مرور زمان داده می‌شود. در هر لحظه از زمان، به ازای مجموعه‌ی  $U$  از نقاطی که تا کنون وارد شده‌اند، زیرمجموعه‌ی  $S \subseteq U$  با اندازه‌ی  $k$  را انتخاب کنید به طوری که عبارت زیر کمینه شود:

$$\max_{u \in U} \{ \min_{s \in S} d(u, s) \} \quad (3-3)$$

از آنجایی که گونه‌ی جویبار داده و داده پرت مسئله‌ی  $k$ -مرکز به علت به‌روز بودن مبحث داده‌های حجیم<sup>۱۶</sup>، به تازگی مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق سعی شده است که تمرکز بر روی این گونه‌ی خاص از مسئله باشد. همچنین در این پژوهش سعی می‌شود گونه‌های مسئله را برای انواع متریک‌ها و برای  $k$ های کوچک نیز مورد بررسی قرار داد.

### ۳-۳ مدل جویبار داده

همان‌طور که ذکر شد مسئله‌ی  $k$ -مرکز در حالت داده‌های پرت و جویبار داده، گونه‌های تعمیم‌یافته از مسئله‌ی  $k$ -مرکز هستند و در حالت‌های خاص به مسئله‌ی  $k$ -مرکز کاهش پیدا می‌کنند. مسئله‌ی  $k$ -مرکز در حوزه‌ی مسائل ان‌پی-سخت<sup>۱۷</sup> قرار می‌گیرد و با فرض  $P \neq NP$  الگوریتم دقیق با زمان چندجمله‌ای برای آن وجود ندارد [۶]. بنابراین برای حل کارای<sup>۱۸</sup> این مسائل از الگوریتم‌های تقریبی<sup>۱۹</sup> استفاده می‌شود.

برای مسئله‌ی  $k$ -مرکز، دو الگوریتم تقریبی معروف وجود دارد. در الگوریتم اول، که به روش حریصانه<sup>۲۰</sup> عمل می‌کند، در هر مرحله بهترین مرکز ممکن را انتخاب می‌کند به طوری تا حد ممکن از مراکز قبلی دور باشد [۷]. این الگوریتم، الگوریتم تقریبی با ضریب تقریب ۲ ارائه می‌دهد. در الگوریتم دوم، با استفاده از مسئله‌ی مجموعه‌ی غالب کمینه<sup>۲۱</sup>، الگوریتمی با ضریب تقریب ۲ ارائه می‌گردد [۸]. همچنین ثابت شده است، که بهتر از این ضریب تقریب، الگوریتمی نمی‌توان ارائه داد مگر آن‌که  $P = NP$  باشد.

برای مسئله‌ی  $k$ -مرکز در حالت جویبار داده برای ابعاد بالا، بهترین الگوریتم موجود ضریب تقریب  $2 + \epsilon$  دارد [۹، ۱۰، ۱۱] و ثابت می‌شود الگوریتمی با ضریب تقریب بهتر از ۲ نمی‌توان ارائه داد. برای مسئله‌ی  $k$ -مرکز با داده‌ی پرت در حالت جویبار داده نیز، بهترین الگوریتم ارائه شده، الگوریتمی با ضریب تقریب  $4 + \epsilon$  است که با کران پایین ۳ هنوز اختلاف قابل توجهی دارد [۱۲].

<sup>۱۶</sup>Big data

<sup>۱۷</sup>NP-hard

<sup>۱۸</sup>Efficient

<sup>۱۹</sup>Approximation algorithm

<sup>۲۰</sup>Greedy

<sup>۲۱</sup>Dominating set

جدول ۳-۱: نمونه‌هایی از کران پایین تقریب‌پذیری مسائل خوشه‌بندی

مسئله	کران پایین تقریب‌پذیری
$k$ -مرکز	$2^{\lfloor \frac{1}{k} \rfloor}$
$k$ -مرکز در فضای اقلیدسی	$2^{\lfloor \frac{1}{k} \rfloor}$
۱-مرکز در حالت جویبار داده	$\frac{1+\sqrt{2}}{2}$
$k$ -مرکز با نقاط پرت و نقاط اجباری	$3^{\lfloor \frac{1}{k} \rfloor}$

برای  $k$  های کوچک به خصوص،  $k = 1, 2$ ، الگوریتم‌های بهتری ارائه شده است. بهترین الگوریتم ارائه شده برای مسئله‌ی ۱-مرکز در حالت جویبار داده برای ابعاد بالا، دارای ضریب تقریب  $1/22$  است و کران پایین  $\frac{1+\sqrt{2}}{2}$  نیز برای این مسئله اثبات شده است [۱۳، ۱۴]. برای مسئله ۲-مرکز در حالت جویبار داده برای ابعاد بالا، اخیراً راه‌حلی با ضریب تقریب  $\epsilon + 1/8$  ارائه شده است [۱۵]. برای مسئله‌ی ۱-مرکز با داده‌ی پرت، تنها الگوریتم موجود، الگوریتمی با ضریب تقریب  $1/3$  است [۱۶].

### ۳-۴ تقریب‌پذیری

یکی از راهکارهایی که برای کارآمد کردن راه‌حل ارائه شده برای یک مسئله وجود دارد، استفاده از الگوریتم‌های تقریبی برای حل آن مسئله است. یکی از عمده‌ترین دغدغه‌های مطرح در الگوریتم‌های تقریبی کاهش ضریب تقریب است. در بعضی از موارد حتی امکان ارائه‌ی الگوریتم تقریبی با ضریبی ثابت نیز وجود ندارد. به طور مثال، الگوریتم تقریبی با ضریب کمتر از ۲، برای مسئله‌ی  $k$ -مرکز وجود ندارد مگر این که  $P = NP$  باشد. برای مسائل مختلف، معمولاً می‌توان کران پایینی برای میزان تقریب‌پذیری آن‌ها ارائه داد. در واقع برای برخی مسائل ان‌پی-سخت، علاوه بر این که الگوریتم کارآمدی وجود ندارد، بعضاً الگوریتم تقریبی با ضریبی تقریب کم و نزدیک به یک نیز وجود ندارد. در جدول ۳-۱ میزان تقریب‌پذیری مسائل مختلفی که در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار می‌گیرد را می‌بینید.

## فصل ۴

### چالش‌ها و نوآوری‌ها

در این فصل نتایج جدید به دست آمده در پایان نامه توضیح داده می‌شود. در صورت نیاز می‌توان نتایج جدید را در قالب چند فصل ارائه نمود. همچنین در صورت وجود پیاده‌سازی، بهتر است نتایج پیاده‌سازی را در فصل مستقلی پس از این فصل قرار داد.



## فصل ۵

### نتیجه‌گیری

در این فصل، ضمن جمع‌بندی نتایج جدید ارائه‌شده در پایان‌نامه یا رساله، مسائل باز باقی‌مانده و همچنین پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار ارائه می‌شوند.

# Bibliography

- [1] D. E. Knuth. *The T<sub>E</sub>Xbook*. Addison-Wesley, 1984.
- [2] L. Lamport. *L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X—A Document Preparation System*. Addison-Wesley, 1985.
- [3] J. Han and M. Kamber. *Data Mining, Southeast Asia Edition: Concepts and Techniques*. Morgan kaufmann, 2006.
- [4] V. Estivill-Castro. Why so many clustering algorithms: a position paper. *ACM SIGKDD explorations newsletter*, 4(1):65–75, 2002.
- [5] C. C. Aggarwal. *Data streams: models and algorithms*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [6] M. R. Garey and D. S. Johnson. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness. *Freeman & Co.*, 1979.
- [7] N. Megiddo and K. J. Supowit. On the complexity of some common geometric location problems. *SIAM Journal on Computing*, 13(1):182–196, 1984.
- [8] V. V. Vazirani. *Approximation Algorithms*. Springer-Verlag New York, Inc., 2001.
- [9] R. M. McCutchen and S. Khuller. Streaming algorithms for k-center clustering with outliers and with anonymity. In *Proceedings of the 11th International Workshop on Approximation Algorithms*, pages 165–178, 2008.
- [10] S. Guha. Tight results for clustering and summarizing data streams. In *Proceedings of the 12th International Conference on Database Theory*, pages 268–275, 2009.
- [11] H.-K. Ahn, H.-S. Kim, S.-S. Kim, and W. Son. Computing k centers over streaming data for small k. *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 24(02):107–123, 2014.

- [12] M. Charikar, S. Khuller, D. M. Mount, and G. Narasimhan. Algorithms for facility location problems with outliers. In *Proceedings of the 12th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pages 642–651, 2001.
- [13] P. K. Agarwal and R. Sharathkumar. Streaming algorithms for extent problems in high dimensions. In *Proceedings of the 21st ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pages 1481–1489, 2010.
- [14] T. M. Chan and V. Pathak. Streaming and dynamic algorithms for minimum enclosing balls in high dimensions. *Computational Geometry: Theory and Applications*, 47(2):240–247, 2014.
- [15] S.-S. Kim and H.-K. Ahn. An improved data stream algorithm for clustering. In *Proceedings of the 11th Latin American Symposium on Theoretical Informatics*, pages 273–284. 2014.
- [16] H. Zarrabi-Zadeh and A. Mukhopadhyay. Streaming 1-center with outliers in high dimensions. In *Proceedings of the 21st Canadian Conference on Computational Geometry*, pages 83–86, 2009.
- [17] M. Bern and D. Eppstein. Approximation algorithms for NP-hard problems. chapter Approximation Algorithms for Geometric Problems, pages 296–345. PWS Publishing Co., 1997.

## واژه‌نامه

ت	الف
experimental..... تجربی	heuristic..... ابتکاری
density..... تراکم	high dimensions..... ابعاد بالا
approximation..... تقریب	bias..... اریب
partition..... تقسیم‌بندی	threshold..... آستانه
mesh..... توری	pigeonhole principle..... اصل لانه‌ی کبوتری
distributed..... توزیع‌شده	NP-Hard..... ان‌پی-سخت
	transition..... انتقال
ج	ب
separable..... جداپذیر	online..... برخط
black box..... جعبه سیاه	linear programming..... برنامه‌ریزی خطی
data stream..... جویبار داده	optimum..... بهینه
	maximum..... بیشینه
ح	پ
extreme..... حدی	outlier..... پرت
greedy..... حریصانه	query..... پرس‌مان
	cover..... پوشش
خ	complexity..... پیچیدگی
cluster..... خوشه	
linear..... خطی	

## د

داده ..... data  
 داده‌کاوی ..... data mining  
 داده‌ی پرت ..... outlier data  
 دو برابر سازی ..... doubling  
 دودویی ..... binary

## ف

فاصله ..... distance  
 فضا ..... space

## ق

قطعی ..... deterministic

## ر

رأس ..... vertex  
 رسمی ..... formal

## ک

کارا ..... efficient  
 کاندیدا ..... candidate  
 کمینه ..... minimum

## ز

زیرخطی ..... sublinear

## م

مجموعه ..... set  
 مجموعه هسته ..... coreset  
 مسطح ..... planar  
 موازی سازی ..... parallelization  
 میان گیر ..... buffer

## س

سرشکن ..... amortized  
 سلسه مراتبی ..... hierarchichal

## ش

شبه کد ..... pseudocode  
 شیء ..... object

## ن

نابه جایی ..... inversion  
 ناوردا ..... invariant  
 نقطه‌ی مرکزی ..... center point  
 نیم فضا ..... half space

## ص

صدق پذیری ..... satisfiability

## ه

هزینه‌ی آشوب ..... price of anarchy (POA)

## غ

غلبه ..... dominate

## ی

یال ..... edge

پیوست آ

مطالب تکمیلی

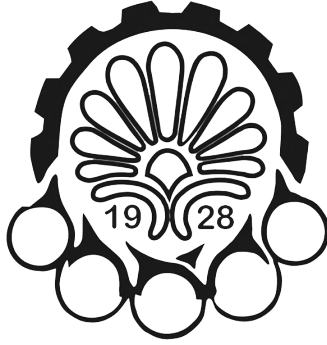
پیوست‌های خود را در صورت وجود می‌توانید در این قسمت قرار دهید.

## **Abstract**

In industrial environments and factories, one of the most important concerns is the maintenance and repair of tools and industrial equipment. Each piece of equipment plays a crucial role in the production line of any company, and the smallest damage or malfunction can disrupt the entire production process. Therefore, it is essential to continuously monitor the current health status of the equipment and predict the time of potential failures and the remaining useful life.

The prediction of Remaining Useful Life (RUL) is a critical task in the field of Prognostics and Health Management (PHM) for industrial tools and equipment. Accurate RUL prediction is vital because it enables timely maintenance and repair, reduces downtime, and allows for the optimization of operational efficiency by loading the equipment according to its remaining useful life.

**Keywords:** Remaining Useful Life, RUL, Transformer, FPGA



Amirkabir University of Technology  
(Tehran Polytechnic)  
Department of Computer Engineering

M.Sc. Seminar Report

# **FPGA-Based Hardware Acceleration of Remaining Useful Life Prediction of Rotating Machinery Using Transformer Neural Network**

By:

**Reza Adinepour**

Supervisor:

**Prof. Morteza Saheb Zamani**

August 2024