

B066A0669F068F06VF066F065F06FF06WF06WF06WF06WF06WF06WF06WF06



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی کامپیوتر

پروژه کارشناسی

پیاده سازی سیستم نگهداری و تعمیرات پیش بینانه  
تجهیزات بر بستر اینترنت اشیاء مبتنی بر تحلیل لرزش

نگارنده

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا زرنندی

تیر ۱۴۰۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه - فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه فرم دفاع یا تأیید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع - موجود در پرونده آموزشی - را قرار دهید.

## نکات مهم:

- نگارش پایان نامه/رساله باید به **زبان فارسی** و بر اساس آخرین نسخه دستورالعمل و راهنمای تدوین پایان نامه های دانشگاه صنعتی امیرکبیر باشد.(دستورالعمل و راهنمای حاضر)
- رنگ جلد پایان نامه/رساله چاپی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا باید به ترتیب مشکی، طوسی و سفید رنگ باشد.
- چاپ و صحافی پایان نامه/رساله بصورت **پشت و رو(دورو)** بلامانع است و انجام آن توصیه می شود.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

به نام خدا

## تعهدنامه اصالت اثر

تاریخ: تیر ۱۴۰۲

اینجانب متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است. در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

امضا

نویسنده پایان نامه، در صورت تمایل میتواند برای پاسخگویی پایان نامه خود را به شخص یا اشخاص و یا ارگان خاصی تقدیم نماید.

نویسنده پایان نامه می تواند مراتب امتنان خود را نسبت به استاد راهنما و استاد مشاور و یا دیگر افرادی که طی انجام پایان نامه به نحوی او را یاری و یا با او همکاری نموده اند ابراز دارد.

## چکیده

در سال‌های اخیر اینترنت اشیاء به یکی از داغ‌ترین موضوعات فناوری تبدیل شده‌است. کاربرد این فناوری در تمامی حوزه‌های زندگی انسان و همچنین پیشرفت‌های اخیر در حوزه‌های جمع‌آوری داده، شبکه و هوش مصنوعی باعث شده‌اند که اینترنت اشیاء مورد توجه محققان قرار گیرد. یکی از چالش‌های موجود در صنایع و کارخانه‌ها تعویض بهینه قطعات است. با توجه به نبود اطلاعات کافی برای تحلیل وضعیت قطعات، راه‌حل مناسب برای اطمینان از کارکرد خط تولید، استفاده از متخصصان جهت بازرسی از وضعیت تجهیزات یا تعویض آنها بدون توجه به وضعیت فعلی و صرفاً طبق زمان‌بندی قبلی است. این راه‌حل‌ها علاوه بر نداشتن دقت لازم، هزینه و زمان زیادی بر صنایع تحمیل می‌کنند. در این پروژه قصد داریم که با استفاده از ترکیب اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی، چارچوبی برای تحلیل داده‌های لرزش تجهیزات ارائه گردد تا با استفاده از آن بتوان عمر مفید باقیمانده قطعات را بخوبی پیش‌بینی کرد. همچنین با استفاده از درگاه مبتنی بر وب، نتایج حاصله به افراد متخصص نشان داده شود تا بتوانند برنامه‌ریزی دقیقی برای نگهداری و تعمیر تجهیزات ارائه کنند. با بکارگیری این رویکرد هزینه و وقت صرف‌شده برای تعویض قطعات به‌شکل چشمگیری کاهش می‌یابد.

## واژه‌های کلیدی:

اینترنت اشیاء، نگهداری پیش‌بینانه، اینترنت اشیاء صنعتی، نگهداری سیستم سایبری-فیزیکی



# فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	مقدمه	۱
۲	۱-۱ تعمیر و نگهداری	۲
۳	۲-۱ راهکار پیشنهادی	۳
۳	۳-۱ کارهای مشابه	۳
۵	۲ مفاهیم پایه و تجهیزات	۵
۶	۱-۲ حسگر	۶
۷	۲-۲ گره انتهایی	۷
۸	منابع و مراجع	۸
۹	پیوست	۹
۱۰	واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی	۱۰
۱۲	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی	۱۲

## فهرست اشکال

شکل	صفحه
۱-۱ سیاست‌های انجام تعمیرات و نگهداری [۱]	۲
۱-۲ حسگر مدل ADXL 345	۷
۲-۲ برد آردوینو نانو	۷

## فهرست جداول

صفحه

جدول

۱-۲	مقایسه بین دو نوع حسگر مبتنی بر پیزوالکتریک و MEMS [۵]	۶
-----	--	---

# فهرست نمادها

نماد	مفهوم
$\mathbb{R}^n$	فضای اقلیدسی با بعد $n$
$\mathbb{S}^n$	کره $n$ بعدی
$M^m$	خمینه $m$ -بعدی $M$
$\mathfrak{X}(M)$	جبر میدان‌های برداری هموار روی $M$
$\mathfrak{X}^1(M)$	مجموعه میدان‌های برداری هموار یک‌ه روی $(M, g)$
$\Omega^p(M)$	مجموعه $p$ -فرمی‌های روی خمینه $M$
$Q$	اپراتور ریچی
$\mathcal{R}$	تانسور انحنای ریمان
$ric$	تانسور ریچی
$L$	مشتق لی
$\Phi$	۲-فرم اساسی خمینه تماسی
$\nabla$	التصاق لوی-چویتای
$\Delta$	لاپلاسین ناهموار
$\nabla^*$	عملگر خودالحاق صوری القا شده از التصاق لوی-چویتای
$g_s$	متر ساساکی
$\nabla$	التصاق لوی-چویتای وابسته به متر ساساکی
$\Delta$	عملگر لاپلاس-بلترامی روی $p$ -فرم‌ها

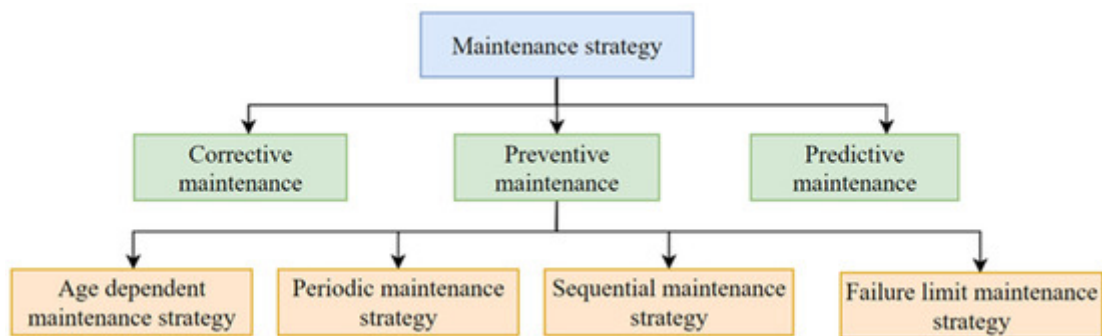
# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ تعمیر و نگهداری

در دنیای نوین امروز، وابستگی به فناوری و صنایع مختلف برای ارائه خدمات و تولید محصولات مورد نیاز شدت افزایش یافته است. در نتیجه این افزایش، تعداد کارخانه‌ها و تجهیزات برای رفع این نیازها نیز افزایش یافته است. همه تجهیزات و وسایل پس از استفاده زیاد دچار نقص و فراوانی می‌شوند. خرابی تجهیزات در کارخانه‌ها و خطوط تولید پدیده‌ای نامطلوب است. خرابی تجهیزات باعث ایست خط تولید و وارد کردن ضرر مالی به صاحبان کارخانه‌ها خواهد شد. به همین دلیل، تعمیر و نگهداری تجهیزات اهمیت بالایی دارد.

سیاست‌های انجام تعمیرات و نگهداری به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند؛ که در شکل ۱-۱ [۱] آورده شده است:



شکل ۱-۱: سیاست‌های انجام تعمیرات و نگهداری [۱]

این سیاست‌ها عبارتند از:

- نگهداری اصلاحی<sup>۱</sup>: این نوع نگهداری با اتفاق افتادن خرابی رخ می‌دهد و تنها در صورت خرابی قطعه تعمیر انجام می‌شود. همانطور که مشخص است در این حالت روند کارکرد عادی متوقف می‌شود؛ به علاوه، در این حالت تعمیر می‌تواند با تاخیر انجام شود زیرا ممکن است در لحظه قطعات مورد نیاز برای تعمیر موجود نباشد. از این سیاست بیشتر به عنوان مکملی برای سیاست‌های بعدی استفاده می‌شود [۱].

- نگهداری پیش‌گیرانه<sup>۲</sup>: در این حالت، نگهداری و تعمیر بر اساس رابطه بین نرخ خرابی، توزیع زمان خرابی و سایر آستانه‌هایی که از تعداد زیادی از آمارهای خرابی بدست می‌آید زمان‌بندی

<sup>۱</sup>Corrective Maintenance

<sup>۲</sup>Preventive Maintenance

می‌شود. در واقع در این نوع نگهداری هدف کاهش احتمال خرابی قطعات است. این نوع نگهداری با توجه به نوع اطلاعات به سیاست‌های وابسته عمر،<sup>۳</sup> سیاست‌های دوره‌ای<sup>۴</sup>، سیاست‌های ترتیبی<sup>۵</sup> و سیاست‌های محدودکننده خرابی<sup>۶</sup> تقسیم می‌شوند [۱].

• نگهداری پیش‌بینانه<sup>۷</sup>: این نوع نگهداری بر روند کاهش کارایی قطعات با استفاده از وضعیت آنها نظارت کرده، وضعیت آنها را در آینده پیش‌بینی می‌کند و مداوم برنامه تعمیر و نگهداری را بروزرسانی می‌کند، تا اینکه شرایط توقف بروزرسانی برآورده شود. با توجه به این ویژگی، این سیاست فقط برای تجهیزاتی که وضعیت آنها قابل نظارت است می‌تواند استفاده شود [۱].

## ۲-۱ راهکار پیشنهادی

با توجه به اهمیت نگهداری و نقش نگهداری اصولی در کاهش هزینه، در این پروژه به ایجاد چارچوبی مناسب برای ارائه راهکاری بر مبنای سیاست نگهداری پیش‌بینانه می‌پردازیم. یکی از نیازهای این سیاست حجم زیادی از داده جمع‌آوری شده از وضعیت تجهیزات برای پیش‌بینی دقیق است. در این پروژه در بستر اینترنت اشیا<sup>۸</sup> داده‌های لرزش با استفاده از سنسور MEMS<sup>۹</sup> جمع‌آوری شده و در زمان‌های مشخص با استفاده از پروتکل زیگبی<sup>۱۰</sup> برای دروازه<sup>۱۱</sup> فرستاده می‌شود. پس از جمع‌آوری حجم مشخصی از داده‌ها اطلاعات برای پردازش بیشتر به سرور فرستاده می‌شوند. در انتها نیز اطلاعات پردازش شده و تخمین عمر مفید باقیمانده<sup>۱۲</sup> در یک صفحه وب نمایش داده می‌شود.

## ۳-۱ کارهای مشابه

در [۲] مدلی برای خرابی قطعات مبتنی بر میزان استفاده از تجهیزات و بار داخلی آنها ارائه شده است اما مدل ارائه شده محدود به یک مدل تجهیزات است و برای استفاده در سایر مدل‌ها نظارت مجدد لازم

<sup>3</sup> Age Dependent Strategies

<sup>4</sup> Periodic Strategies

<sup>5</sup> Sequential Strategies

<sup>6</sup> Failure Limited Strategies

<sup>7</sup> Predictive Maintenance

<sup>8</sup> Internet of Things

<sup>9</sup> Micro Electric Mechanical Sensor

<sup>10</sup> Zigbee Protocol

<sup>11</sup> Gateway

<sup>12</sup> Remaining Useful Lifetime(RUL)

است. در [۳] رویکردی مبتنی بر شبکه عصبی جهت پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده تجهیزات چرخشی ارائه شده‌است اما تنها مختص به این دسته از تجهیزات است. در [۴] رویکردی مبتنی بر شبکه عصبی جهت پیش‌بینی زمان نگهداری و تعمیرات تجهیزات بر اساس مدل خرابی و کارایی آنها ارائه می‌شود اما در یک محیط شبیه‌سازی شده و کنترل شده آزمایش شده‌است و در هنگام استفاده در محیط واقعی غیرعملی است.

بطور کلی در پژوهش‌های یادشده رویکردهای ارائه‌شده مختص نوع خاصی از تجهیزات است و در یک محیط آزمایشگاهی و کنترل شده ارزیابی شده‌اند. در حالیکه در این پروژه با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از قطعات مختلف سعی کرده‌ایم رویکردی کلی و مناسب محیط واقعی و صنعتی ارائه دهیم.



## فصل دوم

### مفاهیم پایه و تجهیزات

در این فصل به بررسی مفاهیم و تجهیزاتی که در این پروژه استفاده شده است می‌پردازیم. در هر بخش دلیل انتخاب خود را شرح می‌دهیم و آن را با سایر راه‌حل‌ها مقایسه می‌کنیم.

## ۱-۲ حسگر

همانطور که گفته شد برای پیش‌بینی نگهداری و عمر مفید تجهیزات نیاز به نظارت و جمع‌آوری اطلاعاتی راجع به این تجهیزات داریم. در این پروژه، اطلاعات جمع‌آوری شده مربوط به وضعیت لرزش تجهیزات است که با استفاده از حسگرهای لرزش MEMS اندازه‌گیری می‌شوند.

در این پروژه تصمیم گرفتیم که بجای دما یا رطوبت از لرزش تجهیزات برای پیش‌بینی استفاده کنیم؛ زیرا لرزش برخلاف دو معیار دیگر بطور مستقیم شرایط عملیاتی تجهیزات را منعکس می‌کند که بیشتر بر اساس رفتارهای مکانیکی مانند چرخش موتور یا حرکت جریان در لوله ایجاد می‌شوند. هم‌چنین دو معیار دیگر وابستگی زیادی به محیط دارند اما لرزش تقریباً مستقل از عوامل خارجی است [۵].

برای اندازه‌گیری لرزش دو نوع حسگر لرزش وجود دارد. حسگرهای مبتنی بر شتاب‌سنج MEMS بر اکثر محدودیت‌های حسگرهای قدیمی مبتنی بر شتاب‌سنج پیزوالکتریک<sup>۱</sup> غلبه می‌کنند. تفاوت این دو حسگر را می‌توان در جدول ۱-۲ [۵] دید.

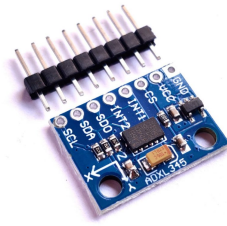
جدول ۱-۲: مقایسه بین دو نوع حسگر مبتنی بر پیزوالکتریک و MEMS [۵]

MEMS	پیزوالکتریک	
۱۰+	۳۰۰+	قیمت (دلار)
۳	۲۷	توان مصرفی (mW)
$۰.۵/۰ \times ۲/۰ \times ۲/۰$	$۱ \times ۹۸/۰ \times ۹۷/۱$	اندازه (اینچ)
۴۰۰۰	۷۰۰	تراکم نویز ( $\mu g$ )
۱۰۰	۱۰	بازه شتاب (g)

بطور کلی حسگرهای نوع MEMS ارزان‌تر، کم‌مصرف‌تر و کوچک‌تر هستند. در این پروژه حسگرها با باتری کار خواهند کرد و برای اندازه‌گیری به قطعات مورد نظر متصل می‌شوند. بنابراین کم‌مصرف بودن، ارزانی و کوچک بودن برای اتصال به بدنه ویژگی‌های مطلوبی است که در حسگرهای نوع MEMS یافت می‌شود. شکل ۱-۲ حسگر مدل ADXL 345 که در این پروژه استفاده کرده‌ایم.

این حسگر می‌تواند شتاب را در سه جهت، در چهار بازه قابل تنظیم ۲، ۴، ۸ و ۱۶ برابر گرانش با

<sup>1</sup>Piezoelectric

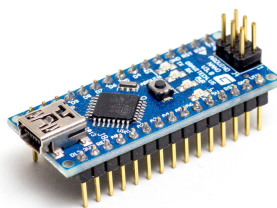


شکل ۲-۱: حسگر مدل ADXL 345

دقت‌های متفاوت اندازه‌گیری کند. خروجی این حسگر نیز با دو پروتکل SPI<sup>۲</sup> و I2C قابل انتقال است.

## ۲-۲ گره انتهایی

برای کاهش بیشتر مصرف انرژی، دریافت اطلاعات حسگر و فرستادن آن برای دروازه به یک برد<sup>۳</sup> نیاز داریم. بوردهای آردوینو<sup>۴</sup> اگرچه محدودیت‌هایی دارند، اما با توجه به ارزان بودن و برآورده کردن نیاز ما انتخاب مناسبی هستند. برد استفاده شده در این پروژه آردوینو نانو است که در شکل ۲-۲ قابل مشاهده است. در این برد از پورت سریال<sup>۵</sup> برای ارتباط با ماژول زیگبی<sup>۶</sup> و از پروتکل I2C برای ارتباط با حسگر استفاده می‌کنیم. یکی از محدودیت‌های این برد حافظه کم است که در نرخ‌های بالای نمونه‌برداری حسگر کار ما را سخت می‌کند که در فصل بعد بیشتر به آن می‌پردازیم.



شکل ۲-۲: برد آردوینو نانو

<sup>۲</sup>Serial Peripheral Interface

<sup>۳</sup>Board

<sup>۴</sup>Arduino

<sup>۵</sup>Serial Port

<sup>۶</sup>Zigbee Module

## ۳-۲ پروتکل ارتباطی

## منابع و مراجع

- [1] Zhao, Jingyi, Gao, Chunhai, and Tang, Tao. A review of sustainable maintenance strategies for single component and multicomponent equipment. *Sustainability*, 14(5):2992, 2022.
- [2] Tinga, Tiedo. Application of physical failure models to enable usage and load based maintenance. *Reliability engineering & system safety*, 95(10):1061–1075, 2010.
- [3] Wu, Sze-jung, Gebraeel, Nagi, Lawley, Mark A, and Yih, Yuehwern. A neural network integrated decision support system for condition-based optimal predictive maintenance policy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 37(2):226–236, 2007.
- [4] Kaiser, Kevin A and Gebraeel, Nagi Z. Predictive maintenance management using sensor-based degradation models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 39(4):840–849, 2009.
- [5] Jung, Deokwoo, Zhang, Zhenjie, and Winslett, Marianne. Vibration analysis for iot enabled predictive maintenance. in *2017 IEEE 33rd international conference on data engineering (ICDE)*, pp. 1271–1282. IEEE, 2017.

## پیوست

موضوعات مرتبط با متن گزارش پایان نامه که در یکی از گروه‌های زیر قرار می‌گیرد، در بخش پیوست‌ها آورده شوند:

۱. اثبات‌های ریاضی یا عملیات ریاضی طولانی.

۲. داده و اطلاعات نمونه (های) مورد مطالعه (Case Study) چنانچه طولانی باشد.

۳. نتایج کارهای دیگران چنانچه نیاز به تفصیل باشد.

۴. مجموعه تعاریف متغیرها و پارامترها، چنانچه طولانی بوده و در متن به انجام نرسیده باشد.

## کد میپل

```
with(DifferentialGeometry):  
with(Tensor):  
DGsetup([x, y, z], M)  
frame name: M  
a := evalDG(D_x)  
D_x  
b := evalDG(-2 y z D_x+2 x D_y/z^3-D_z/z^2)
```

# واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی

آ	Cartesian product . . . . حاصل ضرب دکارتی
اسکالر . . . . . Scalar	خ
ب	Automorphism . . . . . خودریختی
بالابر . . . . . Lift	د
پ	Degree . . . . . درجه
پایا . . . . . Invariant	ر
ت	microprocessor . . . . . ریزپردازنده
تناظر . . . . . Correspondence	ز
ث	Submodule . . . . . زیرمدول
ثابت‌ساز . . . . . Stabilizer	س
ج	Character . . . . . سرشت
جایگشت . . . . . Permutation	ص
چ	Faithful . . . . . صادقانه
چند جمله‌ای . . . . . Polynomial	ض
ح	

Connected . . . . . همبند	Inner product . . . . . ضرب داخلی
ی	ط
Edge . . . . . یال	Loop . . . . . طوقه
	ظ
	Valency . . . . . ظرفیت
	ع
	Nonadjacency . . . . . عدم مجاورت
	ف
	Vector space . . . . . فضای برداری
	ک
	Complete reducibility . . . . . کاملاً تحویل پذیر
	گی
	Graph . . . . . گراف
	م
	Permutation matrix . . . . . ماتریس جایگشتی
	ن
	Disconnected . . . . . ناهمبند
	و
	Invertible . . . . . وارون پذیر
	ه



# واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی

A	Homomorphism . . . . . همریختی
Automorphism . . . . . خودریختی	I
B	Invariant . . . . . پایا
Bijection . . . . . دوسویی	L
C	Lift . . . . . بالابر
Cycle group . . . . . گروه دوری	M
D	Module . . . . . مدول
Degree . . . . . درجه	N
E	Natural map . . . . . نگاشت طبیعی
Edge . . . . . یال	O
F	One to One . . . . . یک به یک
Function . . . . . تابع	P
G	Permutation group . . . . . گروه جایگشتی
Group . . . . . گروه	Q
H	

Quotient graph . . . . .	گراف خارج‌قسمتی	Trivial character . . . . .	سرشت بدیهی
R		U	
Reducible . . . . .	تحویل پذیر	Unique . . . . .	منحصربفرد
S		V	
Sequence . . . . .	دنباله	Vector space . . . . .	فضای برداری
T			

# Abstract

This page is accurate translation from Persian abstract into English.

Key Words:

Write a 3 to 5 KeyWords is essential. Example: AUT, M.Sc., Ph. D, ..