

دانشگاه گیلان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

شبکه‌های ترانسفورمر هدایت‌شده با فیزیک
برای تشخیص و پیش‌بینی چندهی
در توربین‌های گازی سنگین و موتورهای هوایی

خلاصه پیشنهاد دکتری

دانشجو: محمدرضا ارقند
مقطع تحصیلی: دکتری مهندسی مکانیک
گرایش: دینامیک، کنترل و ارتعاشات

استاد راهنما: دکتر علی چایب‌آخ
دانشیار، دانشگاه گیلان
استاد راهنمای دوم: دکتر افشین رحیمی
دانشیار، دانشگاه ویندزور، کانادا

اسفند ۱۴۰۴

۱ مقدمه و انگیزه پژوهش

۱.۱ جایگاه توربین گاز در صنایع راهبردی

توربین‌های گازی از جمله حیاتی‌ترین تجهیزات صنعتی عصر حاضر به شمار می‌آیند که در دو قلمرو کاملاً متمایز نقش محوری ایفا می‌کنند: تأمین توان الکتریکی در نیروگاه‌های صنعتی و پیشران‌ش در صنعت هوافضا. هر دو کاربرد، استمرار عملکرد و سطح بالایی از قابلیت اطمینان را به عنوان الزامات بنیادین تحمیل می‌کنند؛ زیرا از کار افتادن ناگهانی این ماشین‌آلات، علاوه بر زیان‌های مالی هنگفت، در مواردی پیامدهای ایمنی جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد.

ماهیت بهره‌برداری از توربین گاز ذاتاً با شرایط سخت همراه است: دمای کارکرد بالا، سرعت‌های چرخشی چشمگیر و تنش‌های مکانیکی قابل توجه، همگی در تعامل با یکدیگر، فرسایش تدریجی اجزا را به امری ناگزیر بدل می‌کنند. در این بستر، توقف‌های ناخواسته موجب افزایش هزینه‌های تعمیراتی، زیان ظرفیت تولید و اختلال در تأمین انرژی می‌شوند. بنابراین، تشخیص به‌هنگام و دقیق خرابی‌ها دیگر یک مزیت رقابتی تلقی نمی‌شود، بلکه پیش‌شرط اجتناب‌ناپذیر بهره‌برداری پایدار و ایمن از این تجهیزات است. برای مطالعه تکمیلی، به فصل اول پیشنهاد اصلی به زبان انگلیسی مراجعه شود.

۲.۱ کاستی‌های رویکردهای سنتی نگهداشت

روش‌های کلاسیک نگهداری و تعمیرات، از جمله بازرسی‌های دوره‌ای و تعمیرات مبتنی بر زمان، برای ماشین‌آلات پیچیده امروزی کافی نیستند. این رویکردها فاقد توانایی شناسایی نشانه‌های اولیه خرابی پیش از بروز آن هستند و در نتیجه یا موجب توقف‌های برنامه‌ریزی‌نشده می‌شوند یا منابع را بی‌رویه مصرف می‌کنند. فناوری‌های نسل چهارم صنعتی، از طریق ایجاد جریان پیوسته‌ای از داده‌های پایش لحظه‌ای، زیرساخت مناسبی برای توسعه سامانه‌های نگهداشت مبتنی بر وضعیت (CBM) و تشخیص و تفکیک عیب (FDD) فراهم آورده‌اند.

با این حال، سیستم‌های هوشمند تشخیص عیب، علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در یادگیری عمیق، با دو چالش اساسی دست‌وپنجه نرم می‌کنند:

- **کمیابی داده‌های خرابی:** رویدادهای عیب در شرایط عملیاتی واقعی به ندرت رخ می‌دهند؛ از این رو، داده‌های برچسب‌گذاری‌شده کافی برای آموزش مدل‌های یادگیری عمیق وجود ندارد.

- **پیچیدگی سناریوهای چندعیبی:** سیستم‌های در حال بهره‌برداری اغلب با چند خرابی همزمان روبه‌رو می‌شوند، نه یک عیب منفرد؛ در حالی که اکثر رویکردهای موجود از پس این پیچیدگی برنمی‌آیند.

۳.۱ همزاد دیجیتال به مثابه راهکار تأمین داده

فناوری همزاد دیجیتال (Digital Twin) با ساخت بازنمایی مجازی دقیق از سامانه فیزیکی، افق تازه‌ای برای غلبه بر کمبود داده می‌گشاید. مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر فیزیک قادرند رفتار ترمودینامیکی و مکانیکی توربین را با وفاداری بالا بازتولید کنند. مزایای راهبردی بهره‌گیری از همزاد دیجیتال در این پژوهش به شرح زیر است:

۱. خلق سناریوهای جامع خرابی، از جمله رویدادهای فاجعه‌بار که تکرار آزمایشگاهی‌شان ممکن یا اقتصادی نیست.
۲. تولید سیگنال‌های باقیمانده فیزیک‌بنیان که انحراف اندازه‌گیری‌های حسگری از مقادیر نظری را به نمایش می‌گذارند.
۳. بهره‌گیری از دانش فیزیکی در فرایند یادگیری، به جای آنکه داده‌ها صرفاً دنباله‌های عددی تلقی شوند.

۴.۱ معماری ترانسفورمر در تشخیص عیب سری زمانی

معماری ترانسفورمر که نخست برای پردازش زبان طبیعی توسعه یافت، به مدد مکانیزم توجه به خود (Self-Attention)، توانایی برجسته‌ای در کشف وابستگی‌های زمانی دوربرد در داده‌های سری زمانی از خود بروز داده است. این ویژگی برای تشخیص عیب توربین گاز – که در آن وضعیت جاری اغلب تابعی از شرایط گذشته است – اهمیت ویژه‌ای دارد. پژوهش حاضر با تلفیق همزاد دیجیتال و معماری ترانسفورمر، رویکردی نوین را پایه‌ریزی می‌کند که ضعف‌های ذاتی هر دو راهبرد داده‌محور و مدل‌محور را برطرف می‌سازد.

۲ پیشینه پژوهش و شکاف‌های موجود

۱.۲ حوزه‌های دانشی پیوندخورده

ادبیات پژوهشی مرتبط با این رساله را می‌توان در پنج حوزه دانشی دسته‌بندی کرد:

۱.۱.۲ فناوری همزاد دیجیتال در توربین گاز

همزاد دیجیتال از یک نمایش شبیه‌سازی ایستا به یک سامانه تعاملی پویا تکامل یافته که با تغذیه مستمر از داده‌های زمان واقعی، خود را به‌روز نگاه می‌دارد. در حوزه توربین‌های گازی، چارچوب‌های پنج‌بُعدی پیشرفته‌ای مطرح شده‌اند که موجودیت فیزیکی، مدل مجازی، خدمات، داده‌های همزاد و اتصالات را یکپارچه می‌کنند. با این وجود، شکاف آشکاری بین

توانمندی‌های مدل‌های فیزیکی دقیق و بهره‌برداری از آن‌ها در چارچوب‌های یادگیری عمیق به چشم می‌خورد.

۲.۱.۲ روش‌های داده‌محور در تشخیص عیب

شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN)، حافظه کوتاه‌مدت طولانی (LSTM) و واحدهای مکرر دروازه‌دار (GRU) توانایی قابل توجهی در استخراج وابستگی‌های زمانی از داده‌های پایش نشان داده‌اند. اما این روش‌ها به حجم زیادی از داده‌های برچسب‌گذاری شده متکی هستند و برای تصمیم‌گیری‌های ایمنی‌محور، تفسیرپذیری کافی ندارند.

۳.۱.۲ یادگیری ماشین هدایت‌شده با فیزیک

رویکردهای ترکیبی که دانش دامنه‌ای را در فرایند یادگیری وارد می‌کنند، به طور همزمان کارایی داده (Data Efficiency) و تعمیم‌پذیری مدل را ارتقا می‌بخشند. شبکه‌های عصبی مبتنی بر معادلات دیفرانسیل جزئی (PINN) و شبکه‌های عصبی هدایت‌شده با فیزیک (PGNN) گام‌های ابتدایی مهمی در این مسیر بوده‌اند، اما ادغام منسجم دانش فیزیکی در مکانیزم توجه ترانسفورمر هنوز محقق نشده است.

۴.۱.۲ یادگیری انتقالی برای عیوب ندیده

یادگیری انتقالی (Transfer Learning) انتقال دانش از یک دامنه مبدأ به یک دامنه هدف جدید را ممکن می‌سازد. این روش در حوزه ماشین‌آلات چرخنده برای انطباق با شرایط عملیاتی متفاوت کاربرد داشته، اما بهره‌گیری نظام‌مند از آن برای عیوب جدید و ندیده در توربین‌های گازی – با تکیه بر معیارهای شباهت فیزیکی – هنوز دست‌نخورده مانده است.

۵.۱.۲ تشخیص چندعیب همزمان

غالب پژوهش‌های موجود بر تشخیص عیوب منفرد تمرکز دارند. توربین‌های در حال فرسایش اغلب چند سازوکار تخریب را به صورت همزمان تجربه می‌کنند. برخی رویکردها نظیر ردیابی زیرفضای مقاوم توانسته‌اند تفکیک دو عیب همزمان – مثل رسوب‌گرفتگی کمپرسور و سایش توربین – را نشان دهند؛ اما معماری‌های یادگیری عمیق اختصاصی برای این مسئله هنوز در مراحل نخستین توسعه قرار دارند.

۲.۲ برآیند شکاف‌های تحقیقاتی

جدول ۱ شکاف‌های احصاشده در پنج حوزه فوق را به همراه محدودیت‌های کلیدی و راهکارهای پیشنهادی تلخیص می‌کند.

جدول ۱: شکاف‌های تحقیقاتی در پنج حوزه دانشی و حوزه‌های پژوهشی مرتبط

حوزه دانشی	وضعیت موجود	محدودیت اصلی	راهکار پیشنهادی
همزاد دیجیتال	مدل‌سازی ترمودینامیکی پیشرفته	عدم بهره‌برداری از جریان دوگانه داده در یادگیری عمیق	RA1: پیش‌آموزش دوجریانه هدایت‌شده با فیزیک
ترانسفورمر سری زمانی	توجه به خود برای وابستگی‌های دوربرد	کاملاً داده‌محور، بدون یکپارچه‌سازی فیزیک	RA1: مکانیزم توجه هدایت‌شده با فیزیک
یادگیری ماشین هدایت‌شده با فیزیک	PINN با ادغام معادلات دیفرانسیل	ادغام نظام‌مند دانش فیزیکی در توجه ترانسفورمر انجام نشده	RA1+RA2: یادگیری انتقالی مبتنی بر فیزیک
یادگیری انتقالی	انتقال بین ماشین‌های مختلف	فاقد تعمیم Zero-Shot برای عیوب جدید توربین گاز	RA2: چارچوب تعمیم به عیوب ندیده
تشخیص چندعیب	ردیابی زیرفضا برای دو عیب همزمان	فاقد معماری یادگیری عمیق برای تفکیک امضاهای همپوشان	RA4: معماری سلسله‌مراتبی چندعیبی

سنجش کمی با پیشینه موجود بیانگر چهار نارسایی مشخص است: دقت تشخیص دو عیب همزمان با روش‌های جاری از ۷۵٪ فراتر نمی‌رود؛ تشخیص Zero-Shot برای عیوب ندیده توربین هرگز به صورت عملی پیاده‌سازی نشده؛ از دست رفتن تنها دو حسگر در روش‌های رایج، افت دقتی بیش از ۳۰٪ را در پی دارد؛ و مدل‌های یادگیری عمیق به‌طور معمول به بیش از هزار نمونه برچسب‌دار برای هر کلاس خرابی نیاز دارند. پژوهش حاضر این چهار شکاف را از طریق چهار حوزه تحقیقاتی مشخص، به صورت همزمان هدف می‌گیرد.

۳ روش‌شناسی پژوهش

۱.۳ نگرش کلی و نوآوری‌های بنیادین

روش‌شناسی پیشنهادی بر پایه یک خط‌لوله شش‌مرحله‌ای استوار است که از توسعه همزاد دیجیتال آغاز شده و به ارزیابی جامع عملکرد در سناریوهای چندعیبی ختم می‌شود. سه نوآوری کلیدی، این رویکرد را از کارهای پیشین متمایز می‌سازد:

۱. **پردازش دوجریانه:** اندازه‌گیری‌های خام حسگرها و پیش‌بینی‌های همزاد دیجیتال در وضعیت سالم، به صورت موازی پردازش می‌شوند تا شبکه بتواند امضاهای عیب سازگار با فیزیک را بدون محاسبه صریح باقیمانده بیاموزد.

۲. **خط‌لوله سه‌مرحله‌ای یادگیری:** پیش‌آموزش خودنظارتی، آموزش نظارت‌شده عیب و یادگیری انتقالی به صورت توالی‌وار در هم می‌آمیزند تا بیشترین دانش ممکن از

داده‌های محدود استخراج شود.

۳. توجه هدایت‌شده با فیزیک: مکانیزم توجه به جای یادگیری صرف از داده، توسط روابط ترمودینامیکی راهبری می‌شود.

۲.۳ توسعه همزاد دیجیتال

۱.۲.۳ پیکربندی مدل

داده‌سازی برای این پژوهش بر مبنای یک همزاد دیجیتال اعتبارسنجی‌شده از یک توربین گاز سنگین – نماینده کاربردهای تولید توان صنعتی – انجام می‌پذیرد. مدل‌سازی نیمه‌تجربی ترمودینامیکی به‌کار رفته، معادلات بقا از اصول اول ترمودینامیک را با نقشه‌های مشخصه اجزا در هم می‌آمیزد و تعادلی مناسب میان دقت فیزیکی و کارایی محاسباتی برقرار می‌کند. چارچوب مدل‌سازی، مسیر گاز را به حجم‌های کنترلی شامل سامانه ورودی هوا، مراحل کمپرسور، محفظه احتراق، مراحل توربین و سامانه خروجی تقسیم می‌کند. هر حجم کنترلی بقای جرم، تکانه و انرژی را برقرار می‌سازد.

۲.۲.۳ راهبرد انتخاب عیوب

ده عیب برگزیده‌شده، تعادلی راهبردی میان حوزه‌های فیزیکی مختلف، فراوانی عملیاتی و چالش‌های تشخیصی برقرار می‌کنند. جدول ۲ طبقه‌بندی کامل این عیوب را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات عیوب برگزیده و تخصیص آن‌ها به حوزه‌های پژوهشی

شناسه	نام عیب	دسته‌بندی	نوع فیزیکی	کاربرد
F1	رسوب پره کمپرسور	اجزا	آیرودینامیک	پیش‌آموزش
F2	آسیب آستر محفظه احتراق	اجزا	گرمایی	پیش‌آموزش
F3	انحراف حسگر دمای مولد گاز	ابزار دقیق	خطای حسگر	پیش‌آموزش
F4	باز شدن جزئی شیر گاز سوخت	محرک	کنترل	پیش‌آموزش
F5	رسوب توربین قدرت	اجزا	آیرودینامیک	پیش‌آموزش
F6	سرج و استال کمپرسور	اجزا	آیرودینامیک	انتقال
F7	انسداد نازل مولد گاز	اجزا	گرمایی+آیرو	انتقال
F8	ناپایداری حلقه کنترل	سیستم	دینامیکی	انتقال
F9	رسوب فیلتر هوای ورودی	اجزا	آیرودینامیک	اعتبارسنجی
F10	سایش پره توربین	اجزا	مکانیکی	اعتبارسنجی

هر عیب در پنج سطح شدت متمایز از S1 تا S5 مدل‌سازی می‌شود؛ طیفی که از عیب‌های نوظهور با ۵ تا ۱۵ درصد انحراف عملکردی آغاز و به خرابی‌های فاجعه‌بار با بیش از ۷۰ درصد تنزل ختم می‌شود.

۳.۲.۳ مجموعه حسگرها

سامانه پایش از ۲۰ متغیر حسگری سازمان یافته در زیرسامانه های توربین گاز تشکیل شده است: سیستم گاز سوخت (S1-S4)، ورودی هوا (S5-S8)، کمپرسور فشار بالا (S9-S11)، مولد گاز (S12-S13)، توربین قدرت (S14-S19) و راندمان کلی سیستم (S20). این مجموعه، پوشش جامعی از فرایندهای آیرودینامیکی، گرمایی، مکانیکی و کنترلی را فراهم می آورد.

۳.۳ معماری دوجریانه

۱.۳.۳ جریان اول: اندازه گیری های خام حسگرها

جریان اول از اندازه گیری های خام ۲۰ حسگر به صورت داده های سری زمانی تشکیل می شود:

$$\mathbf{X}_{\text{raw}} \in \mathbb{R}^{T \times 20} \quad (1)$$

این جریان، تمامی پدیده های فیزیکی موجود در سیستم را منعکس می کند؛ از جمله نوسانات عملیاتی عادی، اثرات محیطی، نویز اندازه گیری و انحرافات ناشی از عیب.

۲.۳.۳ جریان دوم: پیش بینی های همزاد دیجیتال

جریان دوم، پیش بینی همزاد دیجیتال برای همان ۲۰ متغیر حسگری در شرایط بهره برداری سالم است:

$$\mathbf{x}_{\text{nom},i}(t) = f_{\text{DT},i}(\mathbf{u}(t), \theta_{\text{nominal}}, \mathbf{h}_{\text{env}}(t)), \quad i = 1, 2, \dots, 20 \quad (2)$$

که در آن $\mathbf{u}(t)$ ورودی های کنترلی، θ_{nominal} پارامترهای سلامت اسمی اجزا و $\mathbf{h}_{\text{env}}(t)$ شرایط محیطی است. این جریان، خط مبنایی سازگار با فیزیک فراهم می کند.

۳.۳.۳ مزیت های معماری دوجریانه نسبت به رویکرد باقیمانده

معماری دوجریانه در قیاس با رویکردهای باقیمانده که اختلاف دو جریان را از پیش محاسبه می کنند، از سه مزیت ساختاری برخوردار است: مکانیزم توجه، نحوه مقایسه جریان ها را از داده می آموزد به جای پیروی از یک استراتژی ثابت؛ اطلاعات مقدار مطلق حسگرها که در رویکرد باقیمانده محو می شوند، حفظ می گردند؛ و شبکه می تواند وزن اعتماد ویژه هر حسگر را در شرایط مختلف عملیاتی فرا بگیرد.

۴ معماری شبکه ترانسفورمر هدایت‌شده با فیزیک (PGTN)

۱.۴ ساختار کدگذار

شبکه PGTN یک معماری کدگذار دوجریان پیاده‌سازی می‌کند که برای پردازش همزمان اندازه‌گیری‌های خام حسگرها و پیش‌بینی‌های اسمی همزاد دیجیتال طراحی شده است. هر جریان نخست توسط یک ترانسفورمر مستقل با توجه چندسر (Multi-Head Attention) کدگذاری می‌شود و سپس از طریق یک مکانیزم ادغام تطبیقی در هم می‌آمیزند.

۲.۴ مکانیزم اعتماد تطبیقی به فیزیک

بنیادی‌ترین نوآوری معماری PGTN، مکانیزم اعتماد تطبیقی (Adaptive Physics Trust) است. این مکانیزم به شبکه امکان می‌دهد که متناسب با شرایط عملیاتی و دقت مدل همزاد دیجیتال، وزن دهی پویا به هر جریان را فرا بگیرد:

$$\alpha(t) = \sigma(\mathbf{W}_\alpha [\mathbf{A}_{\text{raw}}(t) \parallel \mathbf{A}_{\text{nom}}(t) \parallel \mathbf{e}(t)]) \quad (۳)$$

$$\mathbf{Z}(t) = \alpha(t) \cdot \mathbf{A}_{\text{nom}}(t) + (1 - \alpha(t)) \cdot \mathbf{A}_{\text{raw}}(t) \quad (۴)$$

که در آن $\mathbf{A}_{\text{raw}}$ و $\mathbf{A}_{\text{nom}}$ بازنمایی‌های کدگذاری‌شده دو جریان، $\mathbf{e}(t) = |\mathbf{A}_{\text{raw}} - \mathbf{A}_{\text{nom}}|$ بردار خطا، و $\mathbf{W}_\alpha$ پارامترهای قابل‌آموزش شبکه دروازه هستند.

۳.۴ سرهای خروجی چندوظیفه‌ای

PGTN دارای سه سر خروجی مستقل است:

- **سر طبقه‌بندی:** تشخیص حضور هر یک از ۱۰ نوع عیب با آنتروپی متقاطع دودویی.
- **سر برآورد شدت:** تخمین سطح شدت هر عیب حاضر از طریق رگرسیون.
- **سر بازسازی:** پیش‌آموزش خودنظارتی با هدف بازآفرینی داده‌های پوشانده‌شده.

۴.۴ مقاومت در برابر فقدان حسگر

برای سناریوهای از کار افتادن حسگر، از ماسک‌گذاری افزودنی در محاسبه توجه بهره گرفته می‌شود:

$$\text{Attention}(Q, K, V, m) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} + M\right) V \quad (5)$$

که M ماتریس ماسک افزودنی است؛ برای حسگرهای فعال مقدار ۰ و برای حسگرهای از کار افتاده مقدار $-\infty$ می‌گیرد. این طراحی تضمین می‌کند که حسگرهای غایب سهمی در محاسبه وزن‌های توجه نداشته باشند.

۵ حوزه‌های پژوهشی

این پژوهش در چهار حوزه مشخص سازمان‌دهی شده که مجموعاً چالش‌های اصلی تشخیص هوشمند عیب در توربین‌های گازی را پوشش می‌دهند.

۱.۵ حوزه پژوهشی اول (RA1): یادگیری هدایت‌شده با فیزیک

این حوزه معماری PGTN دوجریان را با یک خطلوله پیش‌آموزش خودنظارتی توسعه می‌دهد. هدف اصلی، دستیابی به دقت قابل رقابت با استفاده از کمتر از ۵۰٪ داده آموزشی در مقایسه با روش‌های پایه است. عیوب F1 تا F5 برای پیش‌آموزش و آموزش نظارت‌شده به کار می‌روند. نوآوری محوری در این حوزه، مکانیزم اعتماد تطبیقی است که به شبکه امکان می‌دهد وزن‌دهی پویا میان ورودی فیزیک و داده‌های خام حسگر را بسته به کیفیت پیش‌بینی همزاد دیجیتال یاد بگیرد.

۲.۵ حوزه پژوهشی دوم (RA2): یادگیری انتقالی برای عیوب ندیده

این حوزه یک چارچوب نظام‌مند Zero-Shot و Few-Shot برای تعمیم به عیوب ندیده در ماشین‌آلات توربو توسعه می‌دهد. عیوب F6، F7 و F8 به‌عنوان هدف‌های انتقال برگزیده شده‌اند. جفت‌بندی‌های فیزیکی، مبنای این انتقال را فراهم می‌کنند: F1 به F6، F2 به F7، و F4 به F8 منتقل می‌شوند؛ چرا که هر جفت مکانیزم‌های فیزیکی مشترکی دارند. این آرایش آزمون می‌کند که آیا یادگیری هدایت‌شده با فیزیک انتقال دانش معنادار را در تمام سطوح شدت و ویژگی‌های زمانی مختلف عیب میسر می‌سازد.

۳.۵ حوزه پژوهشی سوم (RA3): مقاومت در برابر فقدان حسگر

در محیط‌های صنعتی واقعی، حسگرها در معرض خرابی، رانش یا آلودگی نويز قرار دارند. این حوزه عملکرد PGTN را در سناریوهای فقدان تدریجی حسگر، از یک حسگر تا پنج حسگر، ارزیابی می‌کند. هدف، حفظ عملکرد مقبول با از دست رفتن یک تا دو حسگر و افت تدریجی به جای شکست ناگهانی است. رتبه‌بندی حسگرها از طریق مطالعات فرسایش منظم انجام می‌پذیرد و نتایج آن مستقیماً طراحی افزونگی سخت‌افزاری و استقرار صنعتی سیستم را راهنمایی می‌کند.

۴.۵ حوزه پژوهشی چهارم (RA4): تشخیص چندعیب همزمان

این حوزه یک چارچوب تشخیص سلسله‌مراتبی با سرهای توجه تخصص‌یافته در اجزا برای شناسایی دو تا سه عیب همزمان – همراه با برآورد شدت فردی هر عیب – توسعه می‌دهد. سناریوهای چندعیبی در برگیرنده عیوب آشکاری، عیوب مستقل همزمان و تداخل چند تنزل خفیف هستند که با هم منجر به افت شدید عملکرد می‌شوند.

جدول ۳ معیارهای موفقیت کمی و کیفی برای هر چهار حوزه پژوهشی را خلاصه می‌کند.

جدول ۳: معیارهای موفقیت برای هر حوزه پژوهشی

حوزه	معیارهای کمی	معیارهای کیفی
RA1	دقت قابل رقابت با کمتر از ۵۰٪ داده آموزشی؛ همگرایی سریع‌تر نسبت به روش‌های پایه	اثبات روش‌شناسی ادغام فیزیک؛ مطالعات فرسایش کمی
RA2	تشخیص حداقل ۲ از ۳ عیب ندیده در حالت Zero-Shot؛ بهبود دقت با کمتر از ۳۰٪ داده تنظیم دقیق	شناسایی ویژگی‌های فیزیکی که انتقال موفق را ممکن می‌سازند
RA3	حفظ عملکرد قابل قبول با ۱ تا ۲ حسگر از کار افتاده؛ افت تدریجی به جای شکست ناگهانی	شناسایی حسگرهای بحرانی؛ تعریف حالت‌های عملیاتی تنزل‌یافته
RA4	تشخیص و جداسازی دقیق ۲ تا ۳ عیب همزمان؛ برآورد درست شدت فردی هر عیب	مستندسازی قابلیت‌های تمییز امضا؛ تحلیل تخصص سرهای توجه

۶ برنامه کاری و زمان‌بندی

۱.۶ دستاوردهای علمی اصلی

پژوهش حاضر سه دسته دستاورد علمی اصلی را پیش‌بینی می‌کند.

۱. **معماری PGTN**: پیاده‌سازی کامل در چارچوب PyTorch شامل پردازش دوجریان، توجه هدایت‌شده با فیزیک با مکانیزم اعتماد تطبیقی، خط‌لوله سه‌مرحله‌ای پیش‌آموزش

و یادگیری انتقالی، و معماری سلسله‌مراتبی چندعویی. این معماری از طریق یک مخزن متن‌باز در دسترس عموم قرار خواهد گرفت.

۲. **چارچوب همزاد دیجیتال اعتبارسنجی‌شده:** یک همزاد دیجیتال ترمودینامیکی اعتبارسنجی‌شده از یک توربین گاز سنگین، شامل مدل‌های نیمه‌تجربی اجزا، قابلیت تزریق نظام‌مند عیب برای ۱۰ نوع عیب در پنج سطح شدت، و تولید سناریوهای چندعویی با ترکیب‌های فیزیکی محتمل.

۳. **مجموعه داده جامع:** یک مجموعه داده در دسترس عموم شامل ۱۰ نوع عیب با پنج سطح شدت، سناریوهای چندعویی با ۲ تا ۳ عیب همزمان، سناریوهای از کار افتادن حسگر برای تمام ۲۰ حسگر در ترکیب‌های مختلف، و برچسب‌های واقعیت زمینه برای حضور و شدت عیب.

۲.۶ برنامه انتشار

پژوهش سه مقاله در مجلات با ضریب تأثیر حداقل ۵ را هدف قرار می‌دهد:

- **مقاله اول، سال ۱۴۰۵: RA1** – شبکه‌های ترانسفورمر هدایت‌شده با فیزیک برای تشخیص کارآمد عیب توربین گاز.
- **مقاله دوم، سال ۱۴۰۶: RA1+RA2** – یادگیری انتقالی برای تشخیص عیوب ندیده در توربین‌های گازی: رویکردی هدایت‌شده با فیزیک.
- **مقاله سوم، سال ۱۴۰۷: RA3+RA4** – تشخیص چندعیب مقاوم در شرایط تنزل حسگر: رویکردی مبتنی بر ترانسفورمر.

۳.۶ زمان‌بندی پژوهش

برنامه پژوهشی از ابتدای سال ۱۴۰۴ تا پایان سال ۱۴۰۷ به مدت چهار سال ادامه خواهد داشت. سال اول، ۱۴۰۴، به دروس دکتری و توسعه پیشنهاد اختصاص داشت. سال‌های دوم تا چهارم، فاز اجرایی پژوهش را تشکیل می‌دهند.

سال دوم، ۱۴۰۵: توسعه و اعتبارسنجی همزاد دیجیتال؛ پیاده‌سازی اولیه معماری PGTN؛ مطالعات فرسایش برای RA1؛ ارسال مقاله اول.

سال سوم، ۱۴۰۶: توسعه و ارزیابی چارچوب یادگیری انتقالی برای RA2؛ ارزیابی سناریوهای فقدان حسگر برای RA3؛ ارسال مقاله دوم؛ و دوره محقق مهمان یک‌ساله در دانشگاه ویندزور، کانادا.

سال چهارم، ۱۴۰۷: پیاده‌سازی و ارزیابی چارچوب چندعویی برای RA4؛ ارسال مقاله سوم؛ نگارش رساله دکتری؛ و دفاع نهایی.

۴.۶ مدیریت ریسک

جدول ۴ مهم‌ترین ریسک‌های فنی و راهبردهای کاهش آن‌ها را فهرست می‌کند.

جدول ۴: ریسک‌های فنی اصلی و راهبردهای مقابله‌ای

شناسه	توصیف ریسک	راهبرد مقابله
R1	هدایت فیزیکی بهبود محسوسی نسبت به ترانسفورمر استاندارد حاصل نکند	مطالعات فرسایش جامع؛ بررسی روش‌های جایگزین ادغام فیزیک؛ ارزش پژوهشی در اثبات روش‌شناسی ادغام
R2	یادگیری انتقالی برای عیوب ناهمسان F6-F8 ناکام بماند	جفت‌بندی مبتنی بر شباهت فیزیکی؛ بررسی یادگیری متا و انطباق دامنه
R3	افت شدید دقت در سناریوهای چندحسگر از کار افتاده	تعریف حالت‌های عملیاتی تنزل‌یافته؛ حسگریابی مجازی هدایت‌شده با فیزیک
R4	همپوشانی امضاها، عیب، تفکیک را دشوار کند	سرهای توجه تخصص‌یافته در اجزا؛ مستندسازی ترکیب‌های ذاتاً مبهم

۷ پیامدهای مورد انتظار و اثرگذاری پژوهش

۱.۷ کمک‌های علمی

این پژوهش چهار کمک علمی اصیل ارائه می‌دهد که هر یک پاسخی به یک شکاف تحقیقاتی شناسایی‌شده است.

معماری PGTN دوجریان: نخستین یکپارچه‌سازی نظام‌مند دانش فیزیکی همزاد دیجیتال در مکانیزم توجه ترانسفورمر برای تشخیص عیب توربین گاز. مکانیزم اعتماد تطبیقی، وزن‌دهی پویا به ورودی فیزیک و داده‌های حسگر را بر پایه کیفیت مدل میسر می‌سازد.

چارچوب یادگیری انتقالی: بررسی نظام‌مند Zero-Shot و Few-Shot برای عیوب ندیده در ماشین‌آلات توربو. معیارهای شباهت فیزیکی برپایه سازوکارهای فیزیکی، اثربخشی انتقال دانش را قابل پیش‌بینی می‌کنند.

چارچوب چندعیبی: روش‌شناسی جداسازی مبتنی بر توجه برای تشخیص همزمان عیوب با برآورد شدت فردی. معماری تشخیص سلسله‌مراتبی با سرهای توجه تخصص‌یافته در اجزا، شرایط صنعتی واقعی را که در آن دو تا سه سازوکار تخریب به‌صورت موازی پیش می‌روند، مدیریت می‌کند.

تحلیل مقاومت: ارزیابی جامع عملکرد تشخیصی در سناریوهای تنزل حسگر. تحلیل حسگر بحرانی، کمینه مجموعه‌های حسگری لازم برای سطوح مختلف اطمینان تشخیصی را شناسایی می‌کند.

۲.۷ کمک‌های عملی و صنعتی

از منظر صنعتی، این پژوهش مزایای ملموسی در پنج حوزه عرضه می‌کند:

- **کارایی داده:** کاهش نیاز به داده‌های برچسب‌دار عیب از طریق هدایت فیزیکی.
- **سازگاری پذیری:** پذیرش سریع عیوب جدید با حداقل بازآموزی.
- **مقاومت عملیاتی:** حفظ قابلیت تشخیصی در شرایط واقعی خرابی حسگر.
- **مدیریت چندعیب:** پرداختن به سناریوهای عملی با دو تا سه عیب همزمان.
- **راهنمای استقرار:** چارچوب اجرایی صنعتی شامل توصیه‌های افزودنی حسگر و تعریف حالت‌های ایمن خرابی.

۳.۷ تأثیرات فراتر از توربین گاز

دستاوردهای روش‌شناختی این پژوهش به سایر ماشین‌آلات چرخشی و سیستم‌های پیچیده صنعتی نیز تعمیم‌پذیر است: توربین‌های بخار و تجهیزات تولید توان؛ کمپرسورها و پمپ‌های صنعتی؛ موتورهای هوایی و سامانه‌های پیش‌رانش؛ و تجهیزات انرژی تجدیدپذیر از جمله توربین‌های بادی. اصول معماری – توجه هدایت‌شده با فیزیک، یادگیری انتقالی برای عیوب نادر، و پایداری در برابر فقدان حسگر – الگوهایی راهگشا برای یادگیری عمیق هدایت‌شده با فیزیک در طیف گسترده‌ای از حوزه‌های صنعتی ارائه می‌دهند.

۸ جمع‌بندی

این پیشنهاد پژوهشی چارچوبی جامع برای تشخیص هوشمند عیب در توربین‌های گازی سنگین و موتورهای هوایی ارائه می‌دهد که بر پایه ادغام نوآورانه همزاد دیجیتال و معماری ترانسفورمر استوار است. پژوهش حاضر چهار شکاف بنیادین را که در ادبیات موجود بی‌پاسخ مانده‌اند، به صورت همزمان و در قالبی یکپارچه هدف قرار می‌دهد.

غیاب یکپارچه‌سازی نظام‌مند دانش فیزیکی در مکانیزم‌های توجه ترانسفورمر، با معماری PGTN دوجریان و مکانیزم اعتماد تطبیقی مرتفع می‌شود. ناتوانی در تعمیم به عیوب ندیده، با چارچوب یادگیری انتقالی مبتنی بر شباهت فیزیکی حل می‌گردد. شکنندگی در برابر از کار افتادن حسگر، با ماسک‌گذاری توجه مبتنی بر قابلیت اطمینان برطرف می‌شود. و محدودیت تشخیص تک‌عیبی، با معماری سلسله‌مراتبی چندعیبی و سرهای توجه تخصص‌یافته در اجزا از میان برداشته می‌شود.

این چارچوب پژوهشی از طریق سه مقاله علمی در مجلات Q1 و یک رساله دکتری جامع، دانش بنیادینی را در حوزه تشخیص هوشمند عیب هدایت‌شده با فیزیک به جامعه علمی

عرضه خواهد کرد. همچنین، انتشار عمومی مجموعه داده و پیاده‌سازی متن‌باز معماری، بستری مناسب برای پژوهش‌های آتی و مقایسه‌های تکرارپذیر فراهم خواهد آورد.

توجه: برای جزئیات فنی کامل – از جمله اشتقاق معادلات، مرور ادبیات تفصیلی، پروتکل‌های ارزیابی و نتایج کمی – به پیشنهاد کامل به زبان انگلیسی که بلافاصله پس از این بخش ارائه شده است، مراجعه شود.