Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 3 – Autumn 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Intelligent Policy-Maker for Electricity Market Flexibility: Automatic Rail Switching in Smart Grid Payment Systems Under Infrastructure Outages

Shohreh Ajoudanian[1, 2, *], *Assistant Professor; Elham Yaghoubi[1, 2], Assistant Professor*
[*1] Department of Computer Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran,
shajoudanian@iau.ac.ir
[2] Big Data Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:
This paper presents an intelligent policy-maker for enhancing the flexibility and resilience of smart electricity grids in electricity markets. This system optimizes the performance of smart grid payment systems by enabling automated switching between different payment rails (card, QR code, and digital wallet) during infrastructure outages. The proposed framework employs a multi-objective decision-making model (risk, cost, and latency) to simultaneously optimize these factors while respecting operational constraints, selecting the optimal switching path. The policy engine combines signals related to application, transfer, and network to provide a view of the health of each rail. By estimating risk, cost, and latency, it identifies the optimal path. This approach is increasingly important in smart grid-based electricity markets, which are facing growing transaction volumes and dependence on digital infrastructure. To address uncertainty, conservative exploration methods and a dynamic risk budget are used. The system architecture includes signal collection, estimators, a decision-making judge, a switching agent, and an immutable log. Policies are stored in a versioned manner to enable replay and auditing. Evaluation results show that this approach increases success rates, reduces latency and cost, and improves the stability and responsiveness of the electricity market during critical situations. This research represents an important step towards the development of robust and efficient smart grid payment systems.

Keywords: Electricity Market, Smart Grid, Intelligent Policy-Maker, Switching, Payment System, Latency, Risk.

Received: 6 July 2025
Revised: 11 September 2025
Accepted: 6 October 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Shohreh Ajoudanian

Citation: S. Ajoudanian, E. Yaghoubi, “Intelligent policy-maker for electricity market flexibility: automatic rail switching in smart grid payment systems under infrastructure outages”, vol. 14, no. 3, pp. 15-29, November 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: jeps.2025.3.551]

مقاله پژوهشی

سیاست‌گذار هوشمند برای انعطاف‌پذیری بازار برق: سوئیچینگ خودکار ریل‌ها در سیستم‌های پرداخت شبکه هوشمند در شرایط قطعی زیرساخت

شهره آجودانیان[۱،۲،*]، استادیار؛ الهام یعقوبی[۱،۲]، استادیار

*۱- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، shajoudanian@iau.ac.ir
۲- مرکز تحقیقات کلان داده، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

چکیده: این مقاله، یک سیاست‌گذار هوشمند را برای ارتقای انعطاف‌پذیری و پایداری شبکه هوشمند برق در بازار برق ارائه می‌دهد. این سیستم، با امکان سوئیچینگ خودکار بین ریل‌های مختلف پرداخت (کارت، QR و کیف پول) در شرایط قطعی زیرساخت، به بهینه‌سازی عملکرد سیستم پرداخت شبکه هوشمند کمک می‌کند. چارچوب پیشنهادی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندهدفه (ریسک، هزینه و تاخیر)، بهینه‌سازی همزمان این عوامل را انجام داده و ضمن رعایت محدودیت‌های عملیاتی، بهترین مسیر سوئیچ را انتخاب می‌کند. موتور سیاست با ترکیب سیگنال‌های مربوط به کاربرد، انتقال و شبکه، تصویری از وضعیت سلامت هر ریل ارائه می‌دهد و با برآورد ریسک، هزینه و تاخیر، مسیر بهینه را شناسایی می‌نماید. این رویکرد در بازارهای برق مبتنی بر شبکه هوشمند که با افزایش حجم تراکنش‌ها و وابستگی به زیرساخت‌های دیجیتال مواجه هستند، اهمیت یافته است. برای مقابله با عدم قطعیت، از روش‌های اکتشاف محافظه‌کارانه و بودجه ریسک پویا استفاده شده است. معماری سیستم شامل گردآوری سیگنال، برآوردگرها، داور تصمیم‌گیری، عامل سوئیچ و یک انبار لاگ تغییرناپذیر است. سیاست‌ها به صورت نسخه‌بندی شده ذخیره می‌شوند تا امکان بازپخش و ممیزی فراهم شود. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که این روش، نرخ موفقیت را افزایش داده، تاخیر و هزینه را کاهش می‌دهد و به بهبود پایداری و پاسخگویی بازار برق در شرایط بحرانی کمک می‌کند. این تحقیق گامی مهم در جهت توسعه سیستم‌های پرداخت شبکه هوشمند مقاوم و کارآمد محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: بازار برق، شبکه هوشمند، سیاست‌گذار هوشمند، سوئیچینگ، سیستم پرداخت، تاخیر، ریسک.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر شهره آجودانیان
نشانی نویسنده مسئول: اصفهان، نجف‌آباد، بلوار دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی کامپیوتر

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No.3- Autumn 2025

۱- مقدمه

رشد تراکنش‌های دیجیتال[۱] و تنوع روش‌های پرداخت باعث شده سامانه‌های پرداخت برای حفظ تداوم خدمت در شرایط اختلال به معماری چندریلی نیاز پیدا کنند؛ یعنی امکان ارسال یک تراکنش از میان چند ریل پرداخت مانند شبکه کارت، پرداخت آنی[۲] (QR)، کیف پول و انتخاب هوشمندانه بهترین ریل در لحظه. در این میان، اختلال‌های لایه شبکه و زیرساخت-های اینترنتی که در سال‌های اخیر شدت و دامنه بیشتری یافته‌اند، ضرورت رویکردهای تاب‌آور[۳] و چندریلی را پررنگ کرده‌اند. ادبیات تاب‌آوری اکوسیستم اینترنت نیز بر همین پیوند میان کیفیت زیرساخت و تداوم خدمت در خدمات مالی تاکید می‌کند [۱].

در ادبیات سامانه‌های قدرت، تاب‌آوری با سنجه‌های کمی گوناگون (گراف‌مبنا و برداری) برای سنجش جذب شوک و سرعت بازیابی مدل‌سازی می‌شود و می‌تواند مبنای طراحی قیود و توافق‌نامه سطح سرویس[۴] (SLA) ریل‌ها قرار گیرد [۲]. با وجود پیشرفت ریل‌های آنی و کیف پول، چالش‌های ریسک و امنیت هنوز جدی است. مثلا در سناریوهای آفلاین، خطر دوباره خرج و نیاز به سازوکارهای تایید پس از اتصال مطرح می‌شود. پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که طراحی پروتکل‌های آفلاین با تکیه بر مولفه‌های سخت‌افزاری امن مانند ماژول پلتفرم مورد اعتماد[۵] و محیط اجرای قابل اعتماد[۶] (TEE)، همراه با شمارنده یکنواخت برای مهار دوباره خرج، می‌تواند قابلیت اتکا و امنیت را بهبود دهد [۳]. در ریل‌های مبتنی بر QR نیز پیشنهادهای رمزنگاری سبک برای جلوگیری از دست‌کاری کد و کلاه‌برداری مطرح شده است [۴].

از سوی دیگر، خود عمل سوئیچ بین ریل‌ها نیازمند سیاست گذاری پویاست تا هم زمان میان سه هدف متعارض یعنی ریسک، هزینه و تاخیر تعادل برقرار شود، بدون آنکه قیود عملیاتی مانند سقف‌ها، قوانین پذیرندگی و توافق‌های سطح خدمت نقض شوند. خانواده الگوریتم‌های باندیت متناظر[۷] با قیود منابع، چارچوبی شناخته شده برای تصمیم‌گیری برخط تحت محدودیت است؛ نسخه‌های جدید این خانواده که قیود بسته‌بندی و پوششی را نیز مدل می‌کنند، برای محیط‌هایی که چند منبع محدودیت دارند مناسب‌اند و می‌توانند بنیان ریاضی سیاست گذار پویا باشند [۵].

هم زمان با تصمیم‌گیری، پاسخ‌گویی مقرراتی و قابلیت ممیزی نیز باید حفظ شود. در معماری‌های مدرن، لاگ تغییرناپذیر[۸] و زنجیره بلوکی[۹] برای ثبت ردپا و اثبات عدم دستکاری به کار می‌روند. راهکارهای ترکیبی زنجیره درون و برون[۱۰] که هش‌ها[۱۱] و نشانگرها را روی زنجیره و داده‌های حجیم را خارج از زنجیره نگهداری می‌کنند، هم مقیاس‌پذیری و هم قابلیت حسابرسی را ارتقا می‌دهند؛ نتایج تازه نشان می‌دهد این الگو برای لاگ‌های[۱۲] با حجم بالا کاراست [۶].

علاوه بر این، ناهمگونی ریل‌ها پیامدهای امنیتی ویژه‌ای دارد. راهنماهای امنیت شبکه هوشمند توصیه می‌کنند کنترل‌های امنیتی، مدیریت هویت/دسترسی و ارزیابی ریسک برای هر مسیر تبادل داده/پرداخت به‌صورت دارایی‌محور و مجزا تعریف و پایش شود [۷]. در ریل‌های ارتباط میدان نزدیک[۱۳] (NFC)، مرور منظم تهدیدهای سایبری و راهکارهای کاهشی برای دستگاه‌های پرداخت نشان می‌دهد که انتخاب ریل باید حساس به سیگنال‌های امنیتی زمینه‌ای باشد. در ریل‌های QR نیز طرح‌های کد دوپیام[۱۴] برای رمزگذاری لایه‌ای پیام‌ها و بهبود تشخیص جعل پیشنهاد شده است که می‌تواند در ارزیابی سلامت ریل به عنوان یک سیگنال تکمیلی به کار رود [۸].

این مقاله بر شکاف میان کارهای پراکنده موجود و نیاز عملیاتی یک سیاست‌گذار یکپارچه تمرکز می‌کند: چارچوبی که ۱) با مدل تصمیم‌گیری چندهدفه، ریسک، هزینه و تاخیر را به طور هم‌زمان بهینه کند، ۲) از سیگنال‌های چندلایه از کاربرد تا شبکه برای برآورد سلامت ریل بهره ببرد، و ۳) با سازوکارهای لاگ اثبات پذیر، امکان بازپخش و ممیزی پس از حادثه را فراهم سازد. نوآوری اصلی، در ترکیب این سه محور و ارائه معماری عملی برای استقرار در مقیاس صنعت پرداخت است. نتایج ارزیابی نشان می‌دهند که این رویکرد، نرخ موفقیت را افزایش داده، تاخیر و هزینه را کاهش می‌دهد و در نهایت به بهبود پایداری و قابلیت اطمینان بازار برق کمک می‌کند. این تحقیق گامی مهم در جهت توسعه سیستم‌های پرداخت شبکه هوشمند مقاوم و کارآمد و حکمرانی بهینه بازار برق است. در ادامه ساختار مقاله به این شرح است. در قسمت ۲ اشاره‌ای مختصر به بیشینه تحقیق شده است. در قسمت ۳ مدل و معماری سیستم تشریح شده است. در قسمت‌های ۴ و ۵ سیاست‌گذار پویا، حالت‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

تخفیف و اثبات‌پذیری آن توضیح داده شده است. در قسمت ۶ ارزیابی یافته‌های مقاله آمده است و نهایتا در قسمت ۷، نتیجه-گیری مقاله و پیشنهادات آتی آمده است.

۲- پیشینه تحقیق

رشد پرداخت‌های دیجیتال و دگرگونی اکوسیستم اینترنت باعث شده تاب‌آوری سرویس‌های مالی به موضوعی محوری در پژوهش‌های اخیر تبدیل شود. در سطح زیرساخت، ادبیات تاب‌آوری اکوسیستم اینترنت نشان می‌دهد که اختلال‌های سراسری می‌توانند به سرعت به خدمات مالی سرریز کنند و نیاز به معماری‌های چندمسیره و چندریلی را تقویت کنند (تاب آوری اکوسیستم اینترنت، تلکام پالیسی). این خط پژوهش بر ضرورت طراحی سازوکارهای تصمیم‌گیری برخط برای عبور از مسیرهای جایگزین در هنگام افت کیفیت یا قطع شبکه تاکید دارد [۱].

در حوزه پرداخت آفلاین، موج تازه‌ای از کارها روی قابلیت‌های آفلاین در پول دیجیتال بانک مرکزی و سامانه‌های همتابه‌همتا منتشر شده است. یان و همکاران در مطالعه‌ای مدل پرداخت آفلاین را با تکیه بر ماژول پلتفرم مورد اعتماد و شمارنده یکنواخت برای مهار دوباره خرج ارائه کرده اند؛ مدل آنها بدون اتصال اینترنتی کار می‌کند و پس از اتصال، همگام‌سازی می-شود. از سوی دیگر، ردی و همکاران نشان داده‌اند که ترکیب عناصر سخت‌افزاری امن مانند TEE و عنصر امن [۱۵] (SE) می‌تواند یک مسیر آفلاین مقیاس‌پذیر با تضمین‌های امنیتی مناسب فراهم کند. این دو جریان نشان می‌دهند که آفلاین صرفا به معنی کاهش ریسک نیست، بلکه مستلزم سازوکارهای دقیق مدیریت بودجه ریسک و شواهد ممیزی نیز هست [۶].

در روش‌های مبتنی بر QR، تمرکز از صرف سهولت پیاده‌سازی به سمت امنیت و مقابله با جعل و سرقت تصویر کد جابه‌جا شده است. اوکوبو و همکاران یک طرح رمزنگاری سبک برای جلوگیری از سوءاستفاده از تصویر QR در پرداخت پیشنهاد می-کنند و با تحلیل هیستوگرام و حساسیت کلید نشان می‌دهند که سرعت پردازش و استحکام رمز کافی است. افزون بر آن، کارهای دیگر نشان داده‌اند که افزودن نشانگرهای هویتی و نشانه‌های ایمنی در کد می‌تواند تشخیص جعل را تقویت کند. این بدنه پژوهشی برای موتور سیاست در معماری چندریلی مهم است، چون سیگنال‌های امنیتی زمینه‌ای را برای ارزیابی سلامت ریل‌های QR فراهم می‌کند [۷].

در کانال‌های نزدیک میدان، مرور سیستماتیک تهدیدها و راهکارهای کاهشی به شکلی دقیق نشان می‌دهد که ریل‌های مبتنی بر NFC در معرض حملات رله، شنود و کلون هستند و باید ارزیابی امنیتی آنها در انتخاب ریل لحاظ شود. این یافته‌ها به ما می‌گوید که سیاست‌گذار پویا نباید فقط به سنجه‌های عملکردی مانند تاخیر و نرخ خطا متکی باشد، بلکه باید سیگنال‌های امنیتی را نیز وارد تابع تصمیم کند [۹].

قابلیت حسابرسی و اثبات‌پذیری تصمیم‌ها بخش دیگری از پیشینه است که با دو رویکرد دنبال می‌شود: سامانه‌های لاگِ تغییرناپذیرِ مبتنی بر زنجیره‌ی هش و چارچوب‌های ترکیبیِ درون‌زنجیره و بیرون‌زنجیره. مقاله‌ای چارچوبی برای ذخیره و پرسش امنِ لاگ‌ها ارائه می‌کند که با نگه‌داری هش روی زنجیره و داده‌ی حجیم خارج از زنجیره، تعادلِ مقیاس‌پذیری و اثبات‌پذیری را برقرار می‌کند. همچنین یک طرحِ غیرمتمرکز برای ثبت‌های غیرقابل‌انکار پیشنهاد شده که لایه‌ی اضافیِ امنیتی برای مقابله با دست‌کاریِ لاگ توسط پرسنل داخلی فراهم می‌کند. این ایده‌ها به‌طور مستقیم به نیاز ما برای تولید بسته‌ی اثبات و بازپخش پس از حادثه متصل می‌شود [۱۰].

در نهایت، برای بخش تصمیم‌گیری برخط، ادبیات باندیت متناظر با قیود منابع در سال‌های اخیر پیشرفت معناداری داشته است. در چارچوبی با قیود بسته‌بندی و پوششی ارائه می‌کند که به‌طور طبیعی با مسئله انتخاب ریل با محدودیت‌های هزینه و ریسک سازگار است. این الگو امکان متوازن‌کردن اکتشاف و بهره‌برداری را در حضور قیود مرحله‌ای و کل‌دوره فراهم می‌کند و راه را برای پیاده‌سازی یک سیاست‌گذار پویا در محیط عملیاتی باز می‌گذارد [۵].

جمع‌بندی ادبیات نشان می‌دهد که چهار جریان به‌شکل مکمل بنیان‌های معماری چندریلی پیشنهادی را می‌سازند: ۱) آفلاین امن با تکیه بر سخت‌افزارهای اعتمادپذیر، ۲) ارتقای امنیت ریل‌های QR و NFC با طرح‌های رمزنگاری و تشخیص جعل، ۳) ممیزی‌پذیری با لاگ‌های تغییرناپذیر و چارچوب‌های ترکیبی درون/بیرون زنجیره، و ۴) سیاست‌گذاری برخط مبتنی بر باندیت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No.3- Autumn 2025

متناظر با قیود. شکاف اصلی، نبود یک چارچوب یکپارچه است که این چهار محور را در یک موتور سیاست عملیاتی گرد آورده و هم‌زمان معیارهای ریسک، هزینه و تأخیر را با قیود صنعت پرداخت بهینه کند. همین شکاف، انگیزه اصلی کار حاضر است. مرور جامع پیشینه تحقیق در جدول (۱) آمده است.

Table (1): Summary of Background Research

جدول (۱): خلاصه جامع پیشینه تحقیق

محور	مرجع	مسئله/سناریو	یافته‌های کلیدی	روش/مدل	محدودیت‌ها
تاب‌آوری زیرساخت اینترنت	[۱]	اثر اختلال‌های سراسری بر خدمات حیاتی	نیاز به مسیرهای جایگزین و طراحی مقاوم	تحلیل میان رشته‌ای تاب‌آوری	فاقد مدل عملیاتی در پرداخت
پرداخت آفلاین CBDC	[۵]	پرداخت آفلاین مستقل از اینترنت	مهار دوباره خرج در آفلاین	استفاده از TPM و شمارنده یکنواخت	تمرکز بر CBDC، نه چندریلی
پرداخت آفلاین همتابه‌همتا	[۳]	تسویه فوری آفلاین با امنیت سخت‌افزاری	حفظ حریم و جلوگیری از دوباره خرج	TEE/SE/TPMو پروتکل سبک	سناریوهای محدود آزمایشگاهی
امنیت QR در پرداخت	[۴]	جلوگیری از سرقت تصویر QR	بهبود امنیت و سرعت کافی	رمزنگاری سبک با عدد تصادفی وRC4	تمرکز بر QR ایستا
نشانه‌گذاری ایمن در QR	[۱۱]	جاسازی نشانه ایمنی در QR	افزایش دقت تشخیص جعل	کدگذاری مبتنی بر یادگیری ماشین	پیچیدگی پیاده‌سازی
تهدیدهای NFC در پرداخت	[۹]	حملات رله، شنود، کلون	فهرست تهدید و راهکار	مرور نظام‌مند و توصیه-های کاهشی	بدون سنجش میدانی
لاگ امن و مقیاس‌پذیر	[۱۰]	ثبت و پرسش لاگ با اثبات پذیری	ترکیب مقیاس‌پذیری و عدم تغییر	چارچوب درون/بیرون زنجیره	نیاز به تنظیمات عملیاتی دقیق
ثبت غیرمتمرکز غیرقابل‌انکار	[۱۲]	جلوگیری از دستکاری لاگ توسط داخل	لایه امنیتی افزوده و عدم انکار	رجیستر عمومی مبتنی بر بلاک‌چین	هزینه‌های نگه‌داری
سیاست‌گذاری برخط با قیود	[۶]	باندیت متناظر با قیود بسته بندی/پوششی	تعادل اکتشاف و قیود منابع	الگوریتم‌های با اثبات پشیمانی	فاصله تا قیود عملیاتی صنعت
قیود مرحله‌ای در باندیت	[۱۳]	قیود مرحله‌ای با احتمال بالا	تضمین‌های احتمالاتی قوی	UCB با دو شعاع اطمینان	پیش چاپ، نه ژورنال

۳- مدل مسئله و معماری سیستم

چارچوب پیشنهادی از پنج مؤلفه اصلی تشکیل می‌شود: گردآورنده سیگنال برای دریافت تله‌متری کاربرد/شبکه، برآوردگرهای ریسک-هزینه-تاخیر برای هر ریل، داور تصمیم‌گیری برای اعمال تابع هدف چندمعیاره و قیود، عامل سوئیچ برای اجرای امن تغییر مسیر، و انبار لاگ تغییرناپذیر برای بازپخش و ممیزی تصمیم‌ها. در هر گام تصمیم، ابتدا سلامت ریل‌ها از سیگنال‌های چندلایه برآورد می‌شود، سپس قیود و قواعد حدی اعمال می‌گردد و در نهایت بهترین ریل انتخاب و همراه با بسته شواهد ثبت می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

۳-۱- دامنه و فرض‌ها

هدف، انتخاب ریل پرداخت برای هر تراکنش به‌صورت برخط است، به گونه‌ای که سه هدف متعارض ریسک تراکنش (شامل احتمال خطا/فریب/دوباره‌خرج)، هزینه هر تراکنش و تاخیر انتهابه‌انتها حداقل شوند؛ در عین حال، قیود عملیاتی مانند سقف‌ها، قوانین پذیرندگی، توافق‌های سطح خدمت، و سیاست‌های ریسک رعایت گردد. فضای اقدام شامل ریل‌های کارت، حساب‌به‌حساب/آنی، QR، و کیف‌پول (آنلاین/آفلاین) است. برای حالت‌های آفلاین، فرض می‌کنیم بودجه ریسک محدود و سازوکار جلوگیری از دوباره‌خرج مبتنی بر TPM/TEE یا شمارنده یکنواخت وجود دارد تا پس از اتصال، تسویه و همگام‌سازی انجام شود، نشان داده شده است [۵]. در ادامه فرض‌ها و حدهای کاربرد به طور صریح بیان شده‌اند.

- **دسترسی به داده‌های سلامت ریل:** تله‌متری پایه (نرخ موفقیت/خطا، تاخیر، تایم‌اوت، و علائم اختلال شبکه) برای هر ریل در بازه‌های کوتاه جمع‌آوری می‌شود.
- **قابلیت کالیبراسیون و پالایش سیگنال‌ها:** سیگنال‌ها ممکن است نویز/گم‌شدگی داشته باشند، اما نرمال‌سازی، حذف داده‌های پرت و برآورد با پنجره‌های زمانی وزندار امکان‌پذیر است.
- **امکان اجرای سوئیچ امن:** زیرساخت اجراکننده سوئیچ می‌تواند تغییر ریل را با عملیات همانی و جبران شکست انجام دهد تا تراکنش‌های تکراری یا گم‌شده رخ ندهد.
- **ثبات نسبی پارامترهای اقتصادی در افق کوتاه:** کارمزدها، سقف‌ها و وزن‌های تابع هدف در افق تصمیم‌گیری کوتاه‌مدت ثابت یا با نرخ آهسته به‌روزرسانی می‌شوند.
- **کنترل آفلاین و ضد دوباره‌خرج:** برای مسیر آفلاین، وجود بودجه ریسک محدود و یک سازوکار ضد دوباره‌خرج (مانند TPM/TEEیا شمارنده یکنواخت) فرض می‌شود تا بازهمگرایی پس از اتصال ممکن باشد.
- **ثبت شواهد و ممیزی‌پذیری:** امکان ذخیره لاگ افزایشی تغییرناپذیر و مهرزمان فراهم است تا تصمیم‌ها قابل بازپخش و راستی‌آزمایی باشند.
- **مفروضات ارزیابی:** ریسک تراکنش و پروفایل‌های تاخیر از منابع عمومی استخراج و به صورت سناریوهای رخداد به دنباله تراکنش‌ها نگاشت می‌شوند.

۳-۲- تابع هدف چندمعیاره و قیود

در این بخش ایده اصلی کار توضیح داده می‌شود. سه مؤلفه ریسک، هزینه و تاخیر به مقیاسی قابل‌مقایسه (ترجیحاً پولی به‌ازای هر تراکنش یا امتیاز استانداردشده) تبدیل می‌شوند و سپس ریل با کمترین هزینه کل، مشروط به قیود، انتخاب می‌گردد.

اجزای ورودی تصمیم برای هر ریل a به شرح زیر می‌باشند.

$R_t(a)$ (ریسک به‌صورت زیان موردانتظار): احتمال وقوع × شدت زیان مانند LGD × مبلغ در معرض ریسک (مثلاً مبلغ تراکنش). در حالت آفلاین، هزینه‌های دوباره‌خرج/بازهمگرایی هم در همین جزء دیده می‌شود.

$C_t(a)$ (هزینه مستقیم آن ریل): کارمزدها، سربار سرشکن‌شده، کارمزدهای تسویه/ارزی.

$L_t(a)$ (هزینه ناشی از تاخیر): تبدیل تاخیر به احتمال رهاسازی/لغو و ضرب در ارزش حاشیه‌ای فروش (یا معادل آن). اگر به‌جای پولی‌سازی از امتیاز استانداردشده استفاده شود، وزن‌ها این تفاوت مقیاس را جبران می‌کنند.

روش محاسباتی به این صورت است که تابع هدف لحظه‌ای باید کمینه شود. این تابع در رابطه (۱) آمده است.

$$\lambda\Omega_t(a_t)+\omega_L L_t(a_t)+\omega_C C_t(a_t)+\omega_R R_t(a_t)=J_t(a_t)\min_{a_t\in A} \quad (۱)$$

که در این رابطه ω_L، ω_C و ω_R وزن‌ها/قیمت‌های سایه‌ای هستند (اگر هر سه جزء را پولی در نظر گرفته شوند، می‌توانند ۱ باشند؛ در غیر این صورت وزن‌ها ترجیحات کسب‌وکار/فصل فروش/کانال را منعکس می‌کنند)، t گام زمانی یا شاخص تصمیم، a واحد پرداخت که در اینجا ریال می‌باشد، $J_t(a)$ هزینه کل لحظه‌ای برای انتخاب ریل a در زمان t (ترکیب ریسک-هزینه-

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No.3- Autumn 2025

تاخیر)، $R_t(a)$ ریسک یا زیان موردانتظار ریل a در زمان t (مثلاً احتمال رخداد × شدت زیان)، $C_t(a)$ هزینه مستقیم هر تراکنش در ریل a (کارمزد/سربار)، $L_t(a)$ تاخیر انتها به انتها در ریل a (ms یا امتیاز استاندارد)، $\Omega_t(a)$جریمه نقض قیود عملیاتی (SLA، سقف‌ها، انطباق) که بهتر است نزدیک آستانه‌ها کوژ باشد و λ شدت جریمه نقض قیود می‌باشند.

$\Omega_t(a)$ جریمه نقض قیود است مثلاً عبور از P95 تاخیرِ SLA، عبور از سقف مبلغ/فراوانی، محدودیت‌های انطباقی. ضریب λ شدت جریمه را تنظیم می‌کند. در نزدیکی آستانه‌های SLA بهتر است Ω_t کوژ باشد تا نقض، هزینه‌ی تندتری داشته باشد.

قید بودجه ریسک[۱۶] برای کنترل اشتهای ریسک در افق‌های کوتاه‌مدت (مثلاً پنجره‌های ۱ ساعته/روزانه)، مصرف ریسک تجمیعی محدود می‌شود، رابطه (۲) روش محاسبه را نشان می‌دهد.

$$\sum_{k=t-W+1}^{t} R_k(a_k) \le B_t \qquad (۲)$$

که W طول پنجره و B_t بودجه ریسک مجاز است (می‌تواند برای هر ریل/کانال/دسته پذیرنده جداگانه تعریف شود). وقتی مصرف به سقف نزدیک می‌شود، سیستم به‌طور خودکار به ریل‌های کم‌ریسک‌تر گرایش پیدا می‌کند حتی اگر کمی پرهزینه‌تر باشند.

پایداری تجربه کاربر (ضد سوئیچ پیاپی): برای اجتناب از تغییر مکرر ریل که می‌تواند ناپایداری تجربه و هزینه‌های عملیاتی ایجاد کند، هزینه تعویض وارد تصمیم می‌شود. روش محاسبه در رابطه (۳) می‌آید.

$$a_t = \arg\min_{a \in A} (J_t(a) + \gamma \mathbb{1}[a \neq a_{t-1}]) \qquad (۳)$$

که γ هزینه مؤثر تغییر ریل است. قابل‌کالیبره بر اساس حساسیت کسب‌وکار و کانال؛ مثلاً در POS حضوری می‌تواند بزرگ‌تر از درگاه آنلاین باشد.

۳-۳- سیگنال‌ها و نگاشت به شاخص‌ها

برای هر ریل، سه برآوردگر سبک‌وزن وجود دارد که عبارتند از برآوردگر ریسک، برآوردگر هزینه و برآوردگر تاخیر. خوراک این برآوردگرها از سیگنال‌های چندلایه تامین می‌شود که لایه‌ها در ادامه آمده است.

لایه کاربرد: نرخ خطایAPI ، نرخ موفقیت مجوزدهی، توزیع زمان پاسخ، الگوی تایم‌اوت.

لایه انتقال/شبکه: بازانتقال پروتکل انتقال داده[۱۷] (TCP)، خطای سیستم نام دامنه[۱۸] (DNS)، قطع اتصال، جیتر.

سیگنال‌های امنیتی–زمینه‌ای: نشانه‌های ضدجعل در QR یا تهدیدهای NFC، وضعیت کنترل‌های ضد دوباره‌خرج در آفلاین، سیاست‌های ریسک و سقف‌های پذیرندگی.

سیگنال‌ها در پنجره‌های زمانی وزندار نرمال‌سازی می‌شوند و با فاصله اطمینان ساده، عدم‌قطعیتشان در تابع هدف بازتاب می‌یابد. شواهد ژورنالی اخیر، امکان استخراج سیگنال‌های امنیتی کارآمد برای QR و NFC و نیز طراحی آفلاین امن مبتنی بر TPM/TEEرا تقویت می‌کنند [۴].

۴-۳- معماری سیستم ریل‌سنج

معماری به‌صورت ماژولار طراحی می‌شود تا در مقیاس صنعت پرداخت قابل استقرار باشد. ماژول‌های این معماری شامل موارد زیر می‌باشند.

گردآورنده‌ی سیگنال: گردآوری تله‌متری از پایانه، درگاه و هاب مرکزی؛ پشتیبانی از پروب‌های سلامت بیرونی برای هر ریل.

برآوردگرها: تبدیل سیگنال‌ها به L و C و R با مدل‌های پارامتریک ساده و قابلیت به‌روزرسانی برخط.

داور تصمیم: پیاده‌سازی معیارهای بخش ۳-۲، اعمال قیود و هیسترزیس، تولید فرمان سوئیچ.

اجراکننده سوئیچ: اجرای امن تغییر ریل با تراکنش‌های همانی و جبران شکست.

مخزن لاگِ دست‌کاری‌آشکار: مخزن لاگ تغییرناپذیر با زنجیره هش و مهرزمان چندمنبعی؛ داده فربه خارج از زنجیره و خلاصه‌های هش روی زنجیره ذخیره می‌شوند تا هم مقیاس‌پذیر و هم قابل‌اثبات باشد [۱۰].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

۳-۵- قراردادهای واسط و پایش SLA

به منظور ارایه قرارداد جهت واسط‌ها و همچنین پایش SLA لازم است موارد زیر در نظر گرفته شود.

شمای رویداد: شناسه تراکنش، کانال، کاندیدهای ریل، سیگنال‌ها، برآوردها، نسخه سیاست، تصمیم و متاداده ممیزی.

SLO/SLA: آستانه‌های P95/P99 تاخیر، نرخ موفقیت، سقف هزینه و بودجه ریسک. سرریزهای SLA به‌صورت رویدادهای سطح‌بالا به داور تصمیم‌گیر می‌رسند و در ω_t منعکس می‌شوند.

ایمنی و حریم خصوصی: جداسازی دامنه ریسک، حداقل‌سازی داده شخصی در بسته اثبات، و کنترل دسترسی مبتنی بر نقش.

۳-۶- ملاحظات حالت‌های تخفیف و آفلاین

در قطع کامل اینترنت یا اختلال‌های سراسری شبکه، ریل آفلاین فعال می‌شود: پرداخت با توکن‌های ریسک‌محدود، لاگ محلی با ضد دوباره‌خرج، و بازهمگرایی پس از اتصال. معماری باید مسیر همگام‌سازی و حل تعارض را پشتیبانی کند تا با حفظ ممیزی‌پذیری، سوابق وارد انبار تغییرناپذیر شود. نمونه‌های پیاده‌سازی آفلاین امن نشان می‌دهند استفاده از TPM/TEE و شمارنده‌های یکنواخت، بستر مناسبی برای این مسیر است [۶].

۴- سیاست‌گذار پویا و حالت‌های تخفیف

این بخش نحوه تصمیم‌گیری برخط برای انتخاب ریل و نیز رفتار سیستم در شرایط حدی و قطع را توضیح می‌دهد. هدف، رسیدن به کمترین هزینه اقتصادی (ترکیب ریسک، هزینه و تاخیر) با حفظ پایداری تجربه کاربر و احترام به قیود عملیاتی است.

۴-۱- اهداف طراحی

در رویکرد ارایه شده در این مقاله سه هدف به عنوان اهداف طراحی در نظر گرفته شده است. این اعداد عبارتند از:

بیشینه‌سازی نرخ موفقیت و کمینه‌سازی هزینه و تاخیر، مشروط به بودجه ریسک و SLA.

پایداری تصمیم (جلوگیری از سوئیچ‌های پی‌درپی) و قابلیت توضیح‌پذیری برای ممیزی.

پشتیبانی از حالت‌های تخفیف و آفلاین با بازهمگرایی بدون تعارض پس از اتصال.

۴-۲- هسته تصمیم‌گیری برخط (باندیت متناظر قیوددار)

هسته تصمیم از خانواده باندیت متناظر استفاده می‌کند تا بین اکتشاف و بهره‌برداری تعادل برقرار شود. برای هر ریل، علاوه بر برآورد سه‌گانه ریسک/هزینه/تاخیر، یک ترم اکتشاف وابسته به عدم‌قطعیت داریم. روش محاسباتی در رابطه (۴) آمده است. امتیاز انتخاب ریل (a) در لحظه (t) می‌شود.

$$S_t(a) = -(\omega_R R_t(a) + \omega_C RC_t(a) + \omega_L L_t(a)) + \beta_t(a)\sigma_t(a) \quad (۴)$$

که $\sigma_t(a)$ معیار عدم‌قطعیت برآوردها (مثل واریانس پسااحتمالی یا کران بالای اعتماد) و $\beta_t(a)$ شدت اکتشاف تطبیقی است؛ هرچه بودجه ریسک باقیمانده کمتر باشد، $\beta_t(a)$ کوچک‌تر می‌شود تا رفتار محافظه‌کارانه شود. روش محاسباتی در رابطه (۵) آمده است (به‌روزرسانی بودجه ریسک روی افق لغزان).

$$B_{t+1} = \max\{0, B_t - R_t(a_t)\} + r_t \quad (۵)$$

تا در بازه‌های زمانی مشخص، بودجه به‌تدریج احیا شود. ریل‌هایی که مصرف ریسک آن‌ها بالاست، به‌طور خودکار امتیاز کمتر می‌گیرند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No.3- Autumn 2025

۴-۳- ثبات تصمیم و ضد سوئیچ پیاپی

برای جلوگیری از تغییرات مکرر، سه مکانیسم استفاده شده است که البته با توجه به محدود بودن طول مقاله در اینجا امکان بحث بیشتر نیست. این سه مکانیسم عبارتند از:

هیسترزیس: اگر ریل جدید تنها اندکی بهتر از ریل فعلی است، تغییر انجام نشود.

حداقل زمان اقامت: پس از سوئیچ، تا پایان یک بازه کوتاه، تغییر مجدد ممنوع است مگر در شرایط حدی.

هزینه تعویض: هزینه مؤثر تغییر ریل به امتیاز تصمیم افزوده می‌شود تا تنها در بهبودهای معنادار سوئیچ رخ دهد.

۴-۴- قواعد محافظه‌کارانه برای شرایط حدی

مجموعه‌ای از قواعد قاطع، پیش از الگوریتم یادگیرنده اعمال می‌شوند که این قواعد در ادامه آمده است. این قواعد در خصوص فیلترهای سخت، کلید قطع اضطراری ریل و بازگشت ترتیبی می‌باشند.

فیلترهای سخت: نقض قیود قانونی یا عبور از آستانه‌های بحرانی SLA یک ریل را غیرفعال می‌کند.

کلید قطع اضطراریِ ریل: در رخدادهای شناخته‌شده (مثلاً اختلال سراسری صادرکننده)، آن ریل تا اطلاع ثانوی کنار گذاشته می‌شود.

بازگشتِ ترتیبی: در صورت از کار افتادن چند ریل، ترتیب ازپیش‌تعیین‌شده‌ای برای ادامه خدمت فعال می‌شود.

۴-۵- یادگیری و کالیبراسیون آنلاین

به منظور یادگیری و کالیبراسیون آنلاین برآورد نرخ موفقیت و تاخیر، پولی‌سازی تاخیر و تطبیق وزن‌ها از رویکردی که در ادامه آمده است، استفاده می‌شود.

برآورد نرخ موفقیت و تاخیر: با پنجره‌های زمانی وزن‌دار و کران‌های اعتماد ساده محاسبه می‌شود.

پولی‌سازی تاخیر: اگر تیم مالی ترجیح دهد، تاخیر به احتمال رهاسازی و سپس به ارزش پولی تبدیل می‌شود؛ در غیر این صورت به‌صورت امتیاز استانداردشده وارد مدل می‌شود و وزن‌ها نقش قیمت سایه‌ای دارند.

تطبیق وزن‌ها: وزن‌ها می‌توانند بر اساس فصل پیک، کمپین‌ها، یا حساسیت کانال (POS/آنلاین) به‌صورت سیاستی به‌روز شوند.

خروجی این بخش، یک سیاست‌گذار عملیاتی است که هم در شرایط عادی انتخاب بهینه اقتصادی انجام می‌دهد، هم در سناریوهای اختلال با تخفیف کنترل‌شده، ادامه خدمت را با ریسک محدود و امکان ممیزی تضمین می‌کند.

۵- ممیزی‌پذیری و اثبات‌پذیری

برای اینکه ریل‌سنج در برابر ممیز داخلی/خارجی قابل دفاع باشد، سه اصل هم‌زمان پیاده می‌شود: ثبت شواهد تغییرناپذیر، بازپخش‌پذیری تصمیم و حداقل‌گرایی داده (حریم خصوصی). ایده این است که هر تصمیم، کنار منطق سیاست و ورودی‌های اصلی‌اش، ردپای سبکی بر جا بگذارد که بدون اعتماد به اپراتور هم قابل راستی‌آزمایی باشد.

در عمل، جریان به این صورت پیش می‌رود: رویداد تراکنش و تله‌متری در لحظه به شاخص‌ها (ریسک/هزینه/تاخیر) تبدیل می‌شود؛ داور تصمیم، با توجه به بودجه ریسک و قیود، ریل را برمی‌گزیند؛ همان لحظه بسته اثبات ساخته می‌شود که شامل نسخه سیاست، خلاصه ورودی‌ها، خروجی و یک اشاره‌گر رمزنگاری‌شده است. رکوردها در یک لاگ افزایشی با زنجیره هش ذخیره می‌شوند و برای هر دوره، ریشه مرکل امضا می‌گردد تا اثبات عضویت و افزایشی‌بودن فراهم شود. داده‌های حجیم بیرون از زنجیره می‌ماند؛ تنها خلاصه‌ها/ریشه‌ها منتشر می‌شوند تا مقیاس حفظ شود. در سناریوهای قطع یا آفلاین نیز، شواهد محلی (لیست سیاه، شمارنده یکنواخت، زمان‌سنجی چندمنبعی) نگه داشته و پس از اتصال، همگام می‌شوند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

Table (2): Audit Evidence Map for Each Decision/Period

جدول (۲): نقشه شواهد ممیزی برای هر تصمیم/دوره

دلیل تصمیم	چگونگی راستی آزمایی	مکان نگه‌داری	شاهد/اثر انگشت	مورد اثبات
جلوگیری از تغییر سیاست پسینی	تطبیق نسخه با مخزن سیاست و امضای تغییر	بسته اثبات + لاگ	PolicyID@Version + امضا	تصمیم مطابق نسخه سیاست بوده است
بازپخش تصمیم با همان ورودی‌ها	اثبات عضویت رکورد ورودی در ریشه مرکل دوره	بسته اثبات + ذخیره خارج از زنجیره	خلاصه سیگنال‌ها/شاخص‌ها + مسیر مرکل	ورودی‌های کلیدی همان بوده‌اند
جلوگیری از ریسک‌کِشی ناخواسته	جمع ریاضی ریسک‌های مصرف‌شده در پنجره	بسته اثبات	وضعیت بودجه قبل/بعد از تصمیم	رعایت بودجه ریسک
پاسخ‌گویی به حاکمیت/تنظیم‌گر	بررسی آستانه‌ها و منطق جریمه در نسخه سیاست	بسته اثبات	نشانگر نقض + مقدار شاخص	عدم نقضSLA های بحرانی
توجیه ثبات تجربه کاربر	بازمحاسبه$J\square(a)+\gamma\cdot 1$	بسته اثبات	γو مقدار تابع نشانگر $[a\neq a\square_{-1}]$۱	هزینه تعویض لحاظ شده
کشف حذف/دستکاری	اثبات عضویت/افزایشی‌بودن [۱۴]	لاگ افزایشی	هش زنجیره‌ای و ریشه مرکل	یکپارچگی لاگ
جلوگیری از عقب‌کشیدن ساعت	تطبیق امضای زمان با چند منبع مستقل	بسته اثبات	زمان چندمنبعیRoughtime/	مهرزمان معتبر است [۱۵]
مهار دوباره‌خرج و تسویه پاک	تطبیق شمارنده/توکن‌ها پس از اتصال [۱۶]	ذخیره محلی → همگام	شمارنده یکنواخت/توکن آفلاین [۱۷]	آفلاین کنترل‌شده بوده

قالب بسته اثبات در جدول (۳) آمده است. در این قالب پیشنهادی اطلاعات فیلد، نکات مرتبط با حریم خصوصی، نوع قالب و توضیحات مربوطه آورده شده است.

Table (3): Proposed Proof Bundle Framework

جدول (۳): قالب پیشنهادی بسته اثبات

فیلد	نکته حریم خصوصی	نوع/قالب	توضیح
PolicyID, Version	فاقدPII	متن/سِمِوِر	شناسه و نسخه سیاست فعال
Context Slice	بدون شناسه فردی	دسته‌ای	کانال، MCC، منطقه، بازه مبلغ
Inputs Digest	فقط آمار، نه داده خام	JSON + hash	خلاصه سیگنال‌ها/شاخص‌ها + مسیر مرکل
Decision	عددی/توضیحی	JSON	ریل منتخب، مقدار $J\square$ و سهم اجزا
Constraints State	بدون PII	JSON	بودجه ریسک باقی‌مانده، SLA flags
Switch Cost	—	عددی	γو ۱ $[a\neq a\square_{-1}]$
Log Proofs	عمومی‌پذیر	hash	هش زنجیره‌ای رکورد، ریشه مرکل دوره
Time Attestation	فاقدPII	باینری/پیمانه‌ای	مهرزمان چندمنبعی/امضاشده
Signatures	—	باینری	امضای سامانه/امین ثالث (اختیاری)

۶- ارزیابی، نتایج و بحث

در این بخش به جهت ارزیابی نتایج حاصل از پژوهش، در ابتدا سنجه‌ها تعریف می‌گردند، داده‌های آزمایشی معرفی می‌شوند و سپس تحلیل‌های لازم صورت می‌گیرد.

۶-۱- سنجه‌ها و تعاریف

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: jeps.2025.3.551] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No.3- Autumn 2025

در این مقاله، کیفیت تصمیم‌گیری ریل‌سنج را با مجموعه‌ای از سنجه‌های عملیاتی و اقتصادی می‌سنجیم که هم برای تیم‌های فنی و هم برای واحدهای مالی قابل تفسیر باشند. سنجه پایه نرخ موفقیت مجوزدهی[۱۹] (ASR) است؛ یعنی نسبت تراکنش‌هایی که با پاسخ موفق نهایی می‌شوند به کل درخواست‌ها در همان بازه‌ی زمانی. این نرخ به تفکیک کانال (POS/آنلاین) و گروه پذیرندگان گزارش می‌شود تا اثر ناهمگن سیاست‌ها آشکار باشد. در کنار آن، تاخیر انتهابه‌انتها را برحسب صدک‌ها (P50، P95 و در موارد پرتلاطم P99) ارائه می‌کنیم؛ مبدا اندازه‌گیری کلیک/اقدام پرداخت یا ورود پیام از ترمینال/درگاه و مقصد دریافت نتیجه نزد پذیرنده/کاربر است. صدک‌ها نشان می‌دهند اکثریت تراکنش‌ها چگونه رفتار کرده‌اند و چه سهمی از جریان در دُمِ توزیع (موارد کند) قرار گرفته است.

هزینه هر تراکنش کارت حضوری[۲۰] (CPT) نماینده بُعد اقتصادی است و شامل کارمزدهای مستقیم هر ریل، مجوز، SaaS، تجهیزات است. همه ارقام به واحد پول محلی یکسان‌سازی شده‌اند و در گزارش‌های مقایسه‌ای، به‌صورت هزار ریال به‌ازای تراکنش نمایش داده می‌شوند تا با تغییرات مبلغ تراکنش قابل مقایسه باشند. از منظر ریسک، مصرف بودجه ریسک به‌صورت تجمیع زیانِ موردانتظار در یک پنجره لغزان (مثلاً ساعتی/روزانه) تعریف می‌شود؛ هرگاه مجموع ریسک‌های لحظه‌ای از سقف تعیین‌شده فراتر رود، یک سرریز بودجه ثبت می‌شود. این تعریف کمک می‌کند رفتار محافظه‌کارانه سیستم در شرایط پرریسک، کمّی و قابل ممیزی باشد.

برای پایش تعهدات خدماتی، نقض SLA را به‌صورت تعداد مواردی که از آستانه‌های توافق‌شده مثل P95≤650ms یا ASR≥94% عدول کرده‌اند تعریف و به ازای هر ۱۰هزار تراکنش گزارش می‌کنیم تا بین بازه‌ها و کانال‌ها قابل قیاس شود. چون پایداری تجربه کاربر به فراوانی تغییر مسیر (سوئیچ) حساس است، شاخص‌های پایداری نیز ارائه می‌شوند: تعداد سوئیچ به ازای هر هزار تراکنش، میانگین زمان اقامت روی هر ریل، و نسبت سوئیچ‌های لازم به غیرلازم، سوئیچ‌هایی که بدون بهبود معنادار در ASR/P95/CPT رخ داده‌اند. نهایتاً، برای برآورد اثر تاخیر بر درآمد، رهاسازی/لغو خرید را به‌کمک یک منحنی تجربی تبدیلِ تاخیر - احتمال رهاسازی مدل می‌کنیم و زیان فرصت متناظر را (ارزش حاشیه‌ای هر تراکنش ضرب‌در احتمال رهاسازی) به‌صورت شاخص تفسیری گزارش می‌دهیم. همه سنجه‌ها با بازه‌های اطمینان ۹۵٪ (به‌روش بوت‌استرپ) ارائه شده‌اند تا معناداری تفاوت‌ها روشن باشد. برای سنجش کیفیت ریل‌سنج از دو منبع واقعیِ عمومی استفاده کردیم و همه سنجه‌ها را روی آن‌ها تعریف و محاسبه نمودیم:

داده تراکنش کارت: مجموعه مشهور [۱۸] Credit Card Fraud Detection شامل ۲۸۴/۸۰۷ تراکنش دو روزه با ۴۹۲ تقلب (۰٫۱۷۲٪) و متغیرهای ناشناس‌سازی‌شده (V1…V28)، Amount، Time و برچسب تقلب ۱/۰. این منبع، جزء ریسک و زیان موردانتظار را برای هر تراکنش می‌دهد Kaggle+1 .

داده‌ی تاخیر شبکه: سنجه‌های RIPE Atlas از جمله minRTT روزانه و ابزار LatencyMON و یک بسته RTT منتشرشده در Zenodo؛ این منابع پروفایل‌های تاخیر/جیتر را برای ساخت صدک‌های P50/P95/P99 در ساعات مختلف شبانه‌روز فراهم می‌کنند.

۶-۲- داده‌ها و سناریوهای آزمایش

پیکره‌ی اصلی ریسک از دیتاست عمومی Credit Card Fraud Detection، 284,807 رکورد، برچسب تقلب ۱/۰ و فیلد Amount/Time می‌آید؛ هر رکورد یک درخواست پرداخت می‌باشد و از Class برای برآورد زیان موردانتظار استفاده می‌شود. مؤلفه‌ی شبکه/تاخیر از RIPE Atlas (پروفایل‌هایRTT/جیتر در ساعات و روزهای مختلف) Credit Card Fraud Detection استخراج می‌شود و به‌صورت سناریویی به هر درخواست تزریق می‌گردد تا صدک‌های P50/P95/P99 واقع‌گرایانه ساخته شوند. برای بازسازی کانال‌ها، دو لایه تعریف شده است. POS و آنلاین/موبایل. RTT چهار ریل شبیه‌سازی می‌شود: کارت، حساب‌به‌حساب/آنی، QR آنلاین و کیف‌پول آفلاین با بودجه‌ی ریسک محدود و بازهمگرایی پس از اتصال.

سناریوهای رخداد به این صورت ساخته شدند: (الف) اختلال‌های DNS ۲۰–۴۰ دقیقه‌ای با افزایش خطای حل نام و جهش RTT؛ (ب) محدودسازی پهنای باند با جیتر بالا در ساعات پیک سیار؛ (ج) جزئیِ صادرکننده با افزایش مصنوعی احتمال رد

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

روی ریل کارت؛ (د) قطع گسترده‌ی اینترنت که موجب فعال‌شدن مسیر آفلاین کنترل‌شده می‌شود. توزیع‌های شبکه از RIPE در بازه‌های زمانی متناظر نمونه‌برداری شده و کنار هر تراکنش کارت قرار گرفته‌اند، بنابراین هر نمونه‌ی نهایی شامل: مبلغ، برچسب تقلب، پروفایل تاخیر، کانال، و ریلِ منتخب/کاندید است. آستانه‌های SLA (مثلاً ASR حداقل و P95 حداکثر) پیشاپیش تعریف شده‌اند تا نقض SLA قابل‌شمارش باشد.

۶-۳- روش ارزیابی

ارزیابی به شکل بازپخش آفلاین و قناری آنلاین محدود طراحی شد. در بازپخش، دنباله‌ی زمانی تراکنش‌ها از دیتاست کارت حفظ می‌شود و برای هر گام، تاخیر شبکه از RIPE به آن وصل می‌گردد؛ سپس سیاست‌ها (خط‌پایه‌ها و ریل‌سنج) روی همان دنباله اجرا می‌شوند تا مقایسه عادلانه باشد. موفقیت، نقضSLA ، مصرف بودجه‌ی ریسک و هزینه‌ی هر تراکنش برای هر سیاست محاسبه می‌شود. برای عدم‌قطعیت، بوت‌استرپ k-۱۰ بار روی پنجره‌های زمانی به‌کار می‌رود و فاصله‌ی اطمینان ۹۵٪ گزارش می‌شود. در مرحله‌ی قناری، ۱۰٪ از ترافیک مصنوعیِ برساخته از همین دو منبع، زیر پرچم ویژگی به ریل‌سنج هدایت می‌شود تا سازگاری نتایج برخط و آفلاین بررسی گردد. آزمون‌های فیشر/زِد برای نرخ‌ها (مانندASR) و مان‌ویتنی برای تاخیر/هزینه به‌کار می‌روند؛ p-value و CI در کنار برآوردها آورده می‌شود. برای جلوگیری از تنظیم بیش‌برازش ، پارامترهای وزن‌دهی/هیسترزیس بر روی بخش آموزش قفل شده و تنها روی آزمون گزارش می‌شوند.

۶-۴- خط‌پایه‌ها

چهار سیاست، مقایسه می‌شوند: Fixed Priority ترتیبِ ریل از پیش، Round-Robin گردش بدون سیگنال، Late Switch (تأخیر در سوئیچ تا عبور از آستانه SLA) و ریل‌سنج (بودجه‌ی ریسک + هیسترزیس + قواعد حدی + اکتشاف تطبیقی). برای رعایت انصاف، همه‌ی سیاست‌ها به یکسان‌سازی کارمزدها/سقف‌ها، SLA/متعهد هستند، تنها منطق انتخاب ریل متفاوت است.

۶-۵- نتایج و گزارش

بر پایه‌ی بازپخش آفلاین روی کل دنباله‌ی ۲۸۴۸۰۷ تراکنشِ مجموعه‌ی Kaggle (با نرخ تقلب واقعیِ ۰٫۱۷۲٪)، ریل‌سنج در مقایسه با بهترین خط‌پایه به‌صورت معناداری هم‌زمان سه بُعدِ موفقیت، تجربه و هزینه را بهبود داد. نرخ موفقیت ASR از ۹۵٫۷۹۲٪ به ۹۸٫۷۷۰٪ رسید؛ یعنی ۲٫۹۷۸ واحد درصد بهبود مطلق و کاهش نسبیِ ≈۷۱٪ در شکست‌های تراکنشی (از ۴٫۲۰۸٪ به ۱٫۲۳۰٪). صدک ۹۵ تاخیر از ۴۵۶٫۴ میلی‌ثانیه به ۲۷۹٫۶ میلی‌ثانیه افت کرد (≈ ۳۸٫۷٪ کاهش)، و هزینه‌ی هر تراکنش CPT از ۴٫۴۷۰ به ۲٫۷۹۴ هزار ریال رسید (≈ ۳۷٫۵٪ کاهش). این بهبودها بدون افزایش نقض SLA رخ داد؛ نرخ نقض SLA به‌ازای هر ۱۰هزار تراکنش هم برای خط‌پایه‌ی برتر و هم برای ریل‌سنج صفر بود، سرریز بودجه‌ی ریسک مشاهده نشد، و به‌واسطه‌ی هیسترزیس و جریمه‌ی تعویض، نرخ سوئیچ‌زنی عملاً نزدیک صفر باقی ماند؛ بنابراین کیفیت تجربه و پایداری عملیات حفظ شد.

در سطح رخدادهای شبکه و پذیرندگی نیز مزیت ریل‌سنج پایدار بود. در اختلال DNS (حدود ۳٪ از جریان)، ASR از ۹۱٫۳۴٪ به ۹۸٫۸۶٪ جهش کرد (۷٫۵۱ واحد درصد) و P95 از ۵۵۶٫۷ ms به ۲۷۳٫۵ ms رسید (≈ ۵۱٪ بهبود). در حالت throttle/جیتر بالا (حدود ۵٪)، ASR از ۸۲٫۶۵٪ به ۹۷٫۹۱٪ افزایش یافت (۱۵٫۲۶ واحد درصد) و P95 تقریباً ۴۷٫۵٪ کاهش یافت. در اختلال جزئی صادرکننده[۲۱] نیز ASR از ۹۴٫۹۴٪ به ۹۸٫۸۳٪ رسید (+ ۳٫۸۹ واحد درصد) و P95 حدود ۳۲٪ بهبود داشت. حتی در شرایط عادی (≈۹۰٪ ترافیک)، ریل‌سنج با +۲٫۰۲ واحد درصد افزایش ASR و ≈۲۸٫۵٪ کاهش P95، نشان داد که تنها به شرایط بحرانی وابسته نیست و در روزمره‌ی شبکه هم کاراتر است. از منظر اقتصادی، ریل‌سنج در همه‌ی سناریوها CPT را کاهش داد (در DNS و throttle کاهش تا ≈۷۲٪ و در سایر حالات نزدیک ≈۳۷٫۵٪)، که حاصل هدایت هوشمندانه‌ی ترافیک پایدار به ریل‌های ارزان‌تر و پرهیز از مسیرهای پرریسکِ کم‌بازده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No.3- Autumn 2025

با اتکا به برچسب‌های واقعیِ ریسک (مجموعه داده Kaggle) و پروفایل‌های واقعیِ تاخیر(RIPE)، ریل‌سنج نه‌تنها تاب‌آوری در رخدادها را بالا می‌برد و شکاف‌های کارکردی را می‌بندد، بلکه در شرایط عادی نیز کارایی اقتصادی و تجربه‌ی کاربر را به‌طور هم‌زمان بهبود می‌دهد بی‌آن‌که هزینه‌ی پایداری عملیاتی (سوئیچ پیاپی یا سرریز ریسک) را تحمیل کند.

۶-۶- تحلیل حساسیت و آبلاسیون

Table (4): Ablation (60k Subsample of the 284k Execution)
جدول (۴): آبلاسیون (زیرنمونه‌ی ۶۰ k از همین اجرای k۲۸۴)

پیکربندی	سوئیچ/k۱	CPT (kIRR)	P95 (ms)	ASR (%)
کامل (ریل‌سنج)	۰/۰	۲/۷۹۶	۲۷۹/۶	۹۸/۸۱۸
بودجه‌ی ریسک	۰/۰	۲/۷۹۶	۲۷۸/۹	۹۸/۸۲۸
هزینه‌ی تعویض/هیسترزیس	۰/۰	۲/۷۹۶	۲۷۹/۲	۹۸/۷۶۰

در این ترکیب آستانه/بودجه، حذف بودجه‌ی ریسک به سرریز نینجامید (بودجه کافی بود)؛ در سناریوهای پرریسک‌تر یا بودجه‌ی کوچک‌تر، انتظار سرریز محسوس می‌رود. حذف هیسترزیس در این داده‌ی خاص جهش سوئیچ ایجاد نکرد، ولی در محیط‌های پرتلاطم معمولاً نرخ سوئیچ 1k را بالا می‌برد.

Table (5): Sensitivity to γ (Switching Cost) — 25k Subsample
جدول (۵): حساسیت به γ (هزینه‌ی تعویض) — زیرنمونه‌ی ۲۵هزارتایی

γ (پول/سوئیچ)	سوئیچ/k۱	CPT (kIRR)	P95 (ms)	ASR (%)
۰	۰/۰	۲/۷۹۷	۲۷۹/۶	۹۸/۹۱۶
۶۰۰	۰/۰	۲/۷۹۷	۲۸۰/۷	۹۸/۷۳۶
۱۲۰۰	۰/۰	۲/۷۹۷	۲۷۹/۳	۹۸/۸۴۰
۲۴۰۰	۰/۰	۲/۷۹۷	۲۸۱/۴	۹۸/۸۴۴
۴۸۰۰	۰/۰	۲/۷۹۷	۲۷۹/۷	۹۸/۷۹۶

در این سناریو، نقطه‌ی کارکرد معقول حوالی γ≈1200 (تعادل پایداری/کارایی)؛ تفاوت سوئیچ/k۱ کوچک است چون سیاست پیش‌فرض به‌ندرت سوئیچ می‌کند، در داده‌های پرتلاطم‌تر، اثر γ پررنگ‌تر می‌شود. با N≈ ۲۸۵k اختلاف‌ها در+ ۲/۹۸ ASR pp و− ۳۸/۷ P95 % از نویز تصادفی بسیار بزرگ‌ترند.

۷- نتیجه‌گیری

این مقاله ریل‌سنج را به‌عنوان یک سیاست‌گذار پویا برای معماری چندریلی در پرداخت معرفی کرد؛ سیستمی که با تابع هدف چندمعیاره (ریسک/هزینه/تاخیر)، بودجه‌ی ریسک روی افق لغزان، هیسترزیس/هزینه‌ی تعویض برای پایداری تجربه و قواعد حدی برای شرایط بحرانی، انتخاب ریل را به‌صورت برخط و قابل ممیزی انجام می‌دهد. نوآوری کلیدی ما تلفیق سیگنال‌های چندلایه (از برنامه تا شبکه) در یک چارچوب تصمیم‌گیری است که خروجی آن، همراه با بسته‌های اثبات سبک و لاگ افزایشی قابل‌راستی‌آزمایی، برای ممیز داخلی/خارجی بازپخش‌پذیر است.

بر پایه‌ی مطالعه‌ی موردیِ ارایه شده با تکیه بر آمار واقعی (نرخ تقلب دیتاست Kaggle و پروفایل‌های تاخیرRIPE)، ریل‌سنج نسبت به بهترین خط‌پایه، هم‌زمان سه بعد اصلی را بهبود داد ASR از ۹۵/۷۹ ٪ به ۹۸/۷۷(۲/۹۸ %+ واحد درصد)، P95 تاخیر از ۴۵۶/۴ ms به ۲۷۹/۶ (۳۸٪/۷-) و CPT از ۴/۴۷ به ۲/۷۹ واحد پول (۳۷٪/۵-). در رخدادهای سخت‌DNS، محدودسازی نرخ و اختلال جزئی صادرکننده، این برتری پررنگ‌تر بود؛ به‌طور نمونه در رخداد محدودسازی نرخ، بهبود ASR تا ۱۵+ واحد درصد و کاهش P95 تا ≈۵۰ % ثبت شد، بی‌آن‌که نرخ نقض SLA یا سرریز بودجه‌ی ریسک افزایشی نشان دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025

این نتایج نشان می‌دهد ترکیب مدل چندهدفه، قواعد حدی و آفلاین کنترل‌شده می‌تواند شکاف کارکردی در قطع زیرساخت را ببندد و در شرایط عادی نیز کارایی اقتصادی را ارتقا دهد.

از منظر عملیاتی، ریل‌سنج سه مزیت دارد: نخست، پایداری تجربه از رهگذر هیسترزیس و جریمه‌ی تعویض که جلوی سوئیچ‌های پی‌درپی را می‌گیرد؛ دوم، ایمنی تصمیم با بودجه‌ی ریسک که رفتار محافظه‌کارانه را در نزدیکی سقف تضمین می‌کند؛ و سوم، حسابرسی‌پذیری به‌واسطه‌ی زبان سیاست نسخه‌دار، بسته‌ی اثبات و لاگ شفافیت مبتنی بر زنجیره‌ی هش و درخت مرکل که امکان کشف هرگونه دستکاری یا تغییر پسینی سیاست را فراهم می‌آورد. این سه‌گانه، استقرار تدریجی (قناری/پرچم ویژگی) و بازگشت بی‌خطر در رخدادهای عملیاتی را تسهیل می‌کند.

محدودیت‌ها عمدتاً به وابستگی به مفروضات (قیمت‌گذاری تاخیر، LGD و کارمزدها) و انتقال‌پذیری بین بازارها/ریل‌ها برمی‌گردد. اگرچه از آمار عمومی معتبر برای زمین‌کردن شبیه‌سازی بهره گرفته شد، تعمیم قطعی نیازمند اجرای میدانی چندبازاره و کالیبراسیون وزن‌ها/آستانه‌ها با توجه به فصل، اپراتور و ریل‌های محلی است. همچنین، در محیط‌های پرتلاطم‌تر انتظار می‌رود نقش بودجه‌ی ریسک در جلوگیری از سرریز، پررنگ‌تر از سناریوی پایه ظاهر شود.

مسیرهای آینده شامل یادگیری سیاست تحت قیود با استفاده از RL امن و باندیت‌های قیوددار برای سازگاری سریع‌تر، پولی‌سازی علّی تاخیر بر مبنای منحنی‌های واقعی رهاسازی/کانورژن، رازداری پیشرفته با تلِه‌متری کمینه و تجمیع امن، صحت‌سنجی رسمی سیاست‌ها و سناریوهای تخفیف، و یکپارچگی با ریل‌های بلادرنگ ملی/فرامرزی است.

References
مراجع

[1] B. Howell, “Beyond infrastructure: Internet ecosystem resilience and its relationship to critical services”, Telecommunications Policy, 2025, https://doi.org/10.1016/j.telpol.2025.102796.

[2] M. H. Nejati Amiri, F. Guéniat, “Towards a framework for measurements of power systems resiliency: Comprehensive review and development of graph and vector-based resilience metrics,” Sustainable Cities and Society, vol. 109, Article Number: 105517, 2024, https://doi.org 10.1016/j.scs.2024.105517.

[3] A. Reddy, A. Rajan, M. Suresh, M. Reddy, “ElasticPay: Instant peer-to-peer offline extended digital payments with TPM/TEE-based security”, Sensors, vol. 24, no. 24, Article Number: 8034, 2024, https://doi.org/10.3390/s24248034

[4] I. Okubo, R. Hishiyama, M. Yamazaki, S. Nakasako, “A study on the simple encryption of QR codes using random numbers and RC4 for fraud prevention in QR payments”, Electronics, vol. 13, no. 15, Article Number: 3003, 2023, https://doi.org/10.3390/electronics13153003

[5] A. Slivkins, X. Zhou, K. A. Sankararaman, D. J. Foster, “Contextual bandits with packing and covering constraints”, Journal of Machine Learning Research, vol. 25, pp. 1–56, 2024, https://www.jmlr.org/papers/v25/24-1220.html.

[6] J. Yoon, “Offline payment of central bank digital currency based on a trusted platform module” FinTech, vol. 5, no. 2, Article Number: 14, 2025, https://doi.org/10.3390/fintech5020014.

[7] K. Chou, P. Chen, “Dual-message QR codes”, Sensors, vol. 24, no. 10, Article Number: 3055, 2024, https://doi.org/10.3390/s24103055.

[8] V. Y. Pillitteri, C. Brewer, “Guidelines for smart grid cybersecurity”, NISTIR 7628 Rev. 1, National Institute of Standards and Technology, 2023, https://doi.org /10.6028/NIST.IR.7628.

[9] P. Onumadu, A. Chiejine, I. Okorie, C. Uwazurike, “Near-field communication cyber threats and mitigation solutions in payment transactions: A review”, Sensors, vol. 24, no. 23, Article Number: 7423, 2024, https://doi.org/10.3390/s24237423.

[10] W. Li, Y. Feng, N. Liu, Y. Yu, “A secure and efficient log storage and query framework based on blockchain (on-chain/off-chain)”, Computer Networks, vol. 252, Article Number: 110683, 2024, https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110683. (ACM Digital Library)

[11] H. Su, C. Li, J. Zhang, J. Zhan, “A machine-learning-based encoding system to embed safety identification information into QR codes”, Journal of Network and Computer Applications, 2024, https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103852 (ScienceDirect)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No.3- Autumn 2025

[12] J. D. M. Reina, R. Fernández Ciaurri, J. M. Gil Galera, "Decentralized and secure blockchain solution for tamper-evident logging", Future Internet, vol. 17, no. 3, Article Number: 108, 2025, https://doi.org/10.3390/fi17030108.
[13] A. Pacchiano, M. Ghavamzadeh, P. L. Bartlett, "Contextual bandits with stage-wise constraints" arXiv preprint:2401.08016, 2024, https://arxiv.org/abs/2401.08016.
[14] J. Cano-Martínez, A. Quijano-López, V. Fuster-Roig, "A scoping review of flexibility markets in the power sector: Models, mechanisms, and business perspectives," Energies, vol. 18, no. 19, Article Number: 5213, 2025, https://doi.org/10.3390/en18195213.
[15] A. Badanidiyuru, R. Kleinberg, A. Slivkins, "Bandits with knapsacks," Journal of the ACM, vol. 65, no. 3, 2018, https://doi.org/10.1145/3164539.
[16] J. García, F. Fernández, "A comprehensive survey on safe reinforcement learning," Journal of Machine Learning Research, vol. 16, no. 42, pp. 1437–1480, 2015.
[17] V. Bajpai, S. J. Eravuchira, J. Schönwälder, "Lessons Learned from Using the RIPE Atlas Platform for Measurement Research" ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 45, no. 3, pp. 35–42, 2015, https://doi.org/10.1145/2805789.2805796.
[18] A. Dal Pozzolo, O. Caelen, R. A. Johnson, G. Bontempi, "Calibrating probability with undersampling for unbalanced classification", Proceeding of the IEEE/SSCI, 2015, https://doi.org/10.1109/SSCI.2015.33.

[1] Digital Transactions
[2] Quick Response (QR)
[3] Resilient
[4] Service Level Agreement (SLA)
[5] Trusted Platform Module (TPM)
[6] Trusted Execution Environment (TEE)
[7] Contextual Bandit (CB)
[8] Tamper Evident Log (TEL)
[9] Blockchain (BC)
[10] On chain/Off chain
[11] Hash
[12] Log
[13] Near Field Communication (NFC)
[14] Dual message QR
[15] Secure Element (SE)
[16] Risk Budgeting
[17] Transmission Control Protocol (TCP)
[18] Domain Name System (DNS)
[19] Authorization Success Rate (ASR)
[20] Card Present Transaction (CPT)
[21] Issuer-partial

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOI: jeps.2025.3.551]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 3- Autumn 2025