

طراحی سیستم کنترل هوشمند در تونل های شهری با رویکرد کاهش مصرف انرژی و افزایش ایمنی

سعید خادمی^۱، هانیه حسن بیگی^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، khademisaecd4@gmail.com

۲- کارشناس مهندسی برق - کنترل، haniebeigi50@gmail.com

چکیده:

افزایش حجم ترافیک و تشدید الزامات ایمنی در تونل ها، بهره گیری از سامانه های حمل و نقل هوشمند (ITS) و زیرساخت های نظارت و کنترل مبتنی بر SCADA و کنترل گرهای منطقی برنامه پذیر (PLC) را ضروری ساخته است. تونل ها به عنوان زیرساخت های حیاتی، همواره با چالش دوگانه «تأمین ایمنی» و «مصرف بهینه انرژی» مواجه هستند. تجهیزات پرمصرفی نظیر روشنایی، تهویه اصلی، تهویه مطبوع پست های برق و سیستم جمع آوری آب های سطحی، به طور سنتی به صورت مستمر یا با الگوهای زمانی ثابت عمل می کنند که نه تنها به اتلاف قابل توجه انرژی می انجامد، بلکه در شرایط بحرانی مانند حریق، فرصت بهینه سازی توزیع انرژی را از دست می دهد. در این مقاله، یک راهکار هوشمند شرطی ارائه می شود که از سیگنال های سیستم اطفای حریق به عنوان محرکی برای بازتعریف سناریوی مصرف انرژی استفاده می کند. در این رویکرد، هنگام وقوع حریق در یک بخش از تونل: (۱) روشنایی نواحی مجاور تا سطح حداقلی قابل قبول برای تخلیه کاهش می یابد، (۲) تهویه مطبوع پست های برق مجاور متناسب با کاهش بار اضطراری تعدیل می شود، (۳) تهویه اصلی تونل های مجاور یا موازی به طور کامل خاموش می گردد تا از گسترش دود جلوگیری شود، و (۴) سیستم پمپاژ آب های سطحی با اولویت بندی بار و مدیریت همزمانی پیک مصرف، به صورت هوشمند کنترل می گردد. این راهکار مبتنی بر PLC و پروتکل های ارتباطی نظیر MODBUS و BACnet، امکان کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصدی مصرف برق در حالت عادی و تا بیش از ۵۰ درصد در شرایط حریق (با حذف بارهای غیرضروری) را فراهم می آورد. در ادامه مقاله، معماری پیشنهادی، سناریوهای شبیه سازی شده برای یک تونل واقعی و تحلیل میزان صرفه جویی انرژی و تأثیر آن بر عملکرد تجهیزات اطفای حریق ارائه می شود.

کلمات کلیدی: تونل، کنترل هوشمند، مصرف بهینه انرژی، PLC، مدیریت بار اضطراری، سنسور

۱. مقدمه

ضرورت بهره‌گیری از سامانه‌های تونلی پیشرفته و نسل‌نوین را ایجاب می‌کند. در تونل‌ها، به دلیل پیامدهای بالقوه وقوع هر حادثه، استفاده از سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) برای مدیریت جریان ترافیک و تجهیزات آن از اهمیت زیادی برخوردار است. تجهیزات تونل از قبیل روشنایی، تهویه، زهکشی و سیستم‌های امنیتی، با تکیه بر قابلیت‌های سامانه‌های نظارت و کنترل جمع‌آوری داده (SCADA) مبتنی بر کنترل‌گرهای منطقی برنامه‌پذیر (PLC) بهینه می‌شوند؛ این سامانه‌ها اطلاعات دریافتی از ابزار دقیق نصب‌شده در داخل یا پیرامون تونل را پردازش کرده و وضعیت بهینه عملکردی را تعیین می‌نمایند. برنامه‌ریزی صحیح این سیستم‌ها تضمین می‌کند که ضمن تأمین الزامات عملکردی و معیارهای ایمنی مشخص‌شده، از به‌کارگیری غیرضروری تجهیزات و اتلاف انرژی جلوگیری به عمل آید.

تونل‌ها به عنوان زیرساخت‌های حیاتی حمل‌ونقل، همواره با چالش دوسویه «تأمین ایمنی» و «مصرف بهینه انرژی» مواجه هستند. سیستم‌های روشنایی، تهویه مطبوع پست‌های برق، تهویه اصلی تونل و سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی از جمله پرمصرف‌ترین تجهیزات در این فضاها محسوب می‌شوند که به طور سنتی به صورت مستمر یا با الگوهای زمانی ثابت عمل می‌کنند. این رویکرد ایستا، نه‌تنها منجر به اتلاف قابل توجه انرژی می‌شود، بلکه در شرایط بحرانی مانند حریق، با حفظ توان مصرفی در بخش‌های غیردرگیر، فرصت بهینه‌سازی توزیع انرژی و افزایش راندمان تجهیزات ایمنی را از دست می‌دهد.

در این مقاله، یک راهکار هوشمندانه و شرطی ارائه می‌شود که از سیگنال‌های سیستم اطفاء، تهویه، زهکشی به عنوان محرکی برای بازتعریف سناریو کاهش و مدیریت مصرف انرژی استفاده می‌گردد. ایده اصلی بر این استوار است که هنگام وقوع هر یک از موارد زیر در بخش‌هایی از تونل رفتار سیستم‌ها بر اساس سناریوهای تعریف شده اجرا می‌گردد.

۱. تهویه تونل: تهویه تونل‌ها در زمان‌های اضطراری بدلیل مدیریت دود و امکان ایجاد فضای مناسب برای تخلیه مردم از تونل و ورود افراد آتش‌نشانی جهت اطفای حریق در حالتی قرار می‌گیرد که اکثر جت فن‌های تونل درگیر حریق، فعال می‌گردند در این حالت جهت مدیریت مصرف برق نسبت به کاهش موقتی سیستم تهویه تونل مجاور و سیستم روشنایی تونل‌ها در حالت کم، مناسب و ایمن اقدام می‌گردد.

۲. سیستم اطفاء حریق تونل: سیستم اطفاء حریق در زمان‌های اضطراری فعال می‌گردند که باتوجه به میزان مصرفی که بطور معمول در یک تونل ۱۰۰۰ متری هم در نظر بگیریم حدود ۸۰-۱۰۰ کیلووات می‌باشد فلذا مدیریت مصرف برق در این حالت نیز به کاهش مصرف برق کمک می‌کند در این حالت نیز مانند سناریو تهویه تونل جهت مدیریت مصرف برق نسبت به کاهش موقتی سیستم تهویه تونل مجاور و سیستم روشنایی تونل‌ها در حالت کم، مناسب و ایمن اقدام می‌گردد.

۳. در تونل‌های حمل‌ونقل شهری و بین‌شهری، سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی (شامل کانال‌های جانبی، حوضچه‌های تلمبه و پمپ‌های غوطه‌ور) وظیفه حیاتی جلوگیری از تجمع آب و حفظ ایمنی ترافیک را بر عهده دارد. این پمپ‌ها معمولاً در زمان بارش‌های سنگین به طور ناگهانی راه‌اندازی می‌شوند و به دلیل دبی بالا و هد تلمبه‌زنی (اغلب تا عمق چندین متری)، توان الکتریکی قابل توجهی (چند ده تا چند صد کیلووات) جذب می‌کنند. از سوی دیگر، پیک مصرف شبکه برق منطقه‌ای نیز اغلب همزمان با شرایط جوی رخ می‌دهد. این همزمانی می‌تواند منجر به افت ولتاژ، اضافه‌بار در ترانسفورماتورهای تغذیه‌کننده تونل شود.

۴. تهویه مطبوع پست‌های برق، ساختمان کنترل (که اغلب برای خنک‌کاری ترانسفورماتورها و تابلوهای برق طراحی شده‌اند) در زمان‌های اضطراری قابلیت تعدیل یا کاهش موقت توان را دارند، بدون آنکه دمای تجهیزات حیاتی به آستانه

خطر برسد. با کاهش میزان مصرف در تهویه پست ها و تونل مجاور که دچار حریق نشده می تواند تا سطح حداقلی قابل قبول برای عملیات اطفاء و تخلیه دود کاهش یابد.

۲- سناریوهای کاهش توان مصرفی در تونل ها

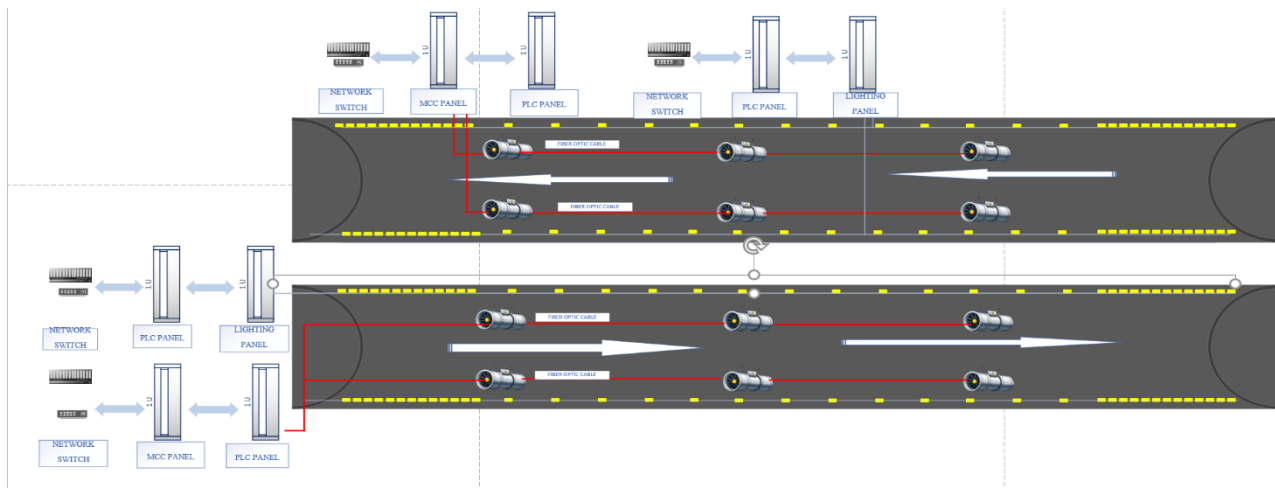
۲-۱ - سیستم تهویه هوشمند تونل:

علت اصلی اینکه تهویه تونل به عنوان یک بخش مهم از مطالعات طراحی و ساخت تونل در نظر گرفته میشود، این است که به مرور زمان و بر اثر حرکت خودروها در داخل تونل، مقدار گازهای آلایندهای مانند دی اکسید کربن، اکسیدهای ازن و نیتروژن، اکسیدهای گوگرد و دوده در تونل که یک محیط سر بسته است بالا میرود. در این شرایط اگر این گازهای سمی را از داخل تونل تخلیه نشوند، مسافران خودروها دچار مسمومیت میشوند و در مواردی هم به علت سرگیجه و بیهوشی راننده، احتمال بروز تصادفات شدید وجود دارد.

روش های اصلی طراحی و اجرای تهویه تونل را می توان در دو دسته اصلی تهویه طبیعی و مکانیکی (شامل روشهای طولی، عرضی، شبه عرضی، غیره) تقسیم نمود. انتخاب نوع سیستم تهویه یا بررسی نیاز و عدم نیاز به تهویه مکانیکی در تونل ها به فاکتورهایی مانند طول تونل، تعداد تونل (دوقلو یا تکی)، شهری یا بین شهری بودن تونل، حجم هوای تازه مورد نیاز، بار ترافیکی، میزان آلاینده در محیط پیرامون تونل و غیره بستگی دارد. سیستم تهویه تونل در شرایط نرمال و اضطراری دو وظیفه اصلی دارد. وظیفه اول شامل رقیق سازی میزان آلاینده های منتشر شده در تونل به واسطه تردد خودروها در شرایط مختلف ترافیکی (ترافیک عادی و ازدحام) میباشد. وظیفه دوم، خارج کردن آلاینده ها و گازهای سمی ناشی از حریق در تونل و ایجاد میدان دید بالا جهت تخلیه افراد حاضر در تونل و دسترسی آتش نشانان به محلی در نزدیکی حریق در شرایط اضطراری میباشد.

تهویه نرمال: سیستم تهویه نرمال حالتی است که در آن تهویه تونل به صورت عادی، بدون حریق و حادثه، عمل می کند و در آن حالت سیستم کنترل متناسب با مقادیر آلودگی هوا تعدادی جت فن را روشن و یا خاموش نگه می دارد و پارامترهای اصلی کنترل، کیفیت هوا داخلی تونل است (منواکسید کربن و قابلیت دید) و سیستم تهویه باید جریان هوای کافی به منظور نگه داشتن کیفیت هوا در زیر حد آستانه (اعداد هدف تعیین شده) را فراهم نماید. کنترل سیستم تهویه با سیکل کنترل گر

بسته و به صورت اتوماتیک اجرا می‌شود و تعداد جت فن‌های لازم به صورت هوشمند با بهره‌گیری از یک سیستم کنترل مرکزی مبتنی بر PLC محاسبه و فعال می‌شود. (شکل ۱)



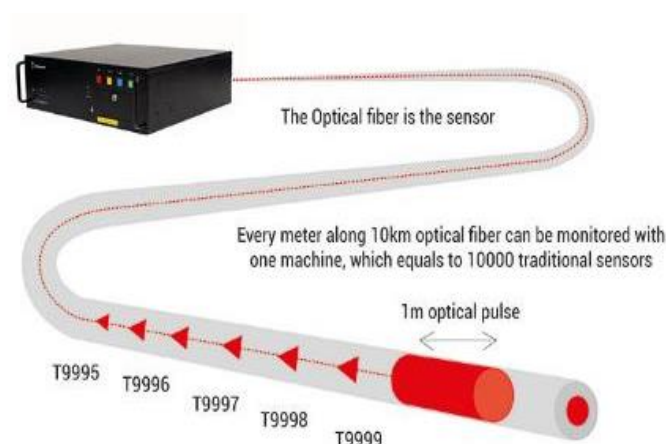
شکل ۱-دیگرام کنترلی سیستم تهویه تونل

تهویه تونل در حالت اضطراری : در حالت حادثه (حریق) سیستم تهویه باید دو هدف را پیگیری کند. هدف نخست نگهداشتن سرعت هوای داخل تونل در محدوده سرعت بحرانی است (حدود ۳ متر بر ثانیه در تهویه تونل بصورت مکانیکی). هدف دوم باید جت فن‌های روشن طوری تنظیم شود که با جابجایی هوا و تزریق هوای تازه به داخل تونل باعث رسیدن اعداد کنترلی کیفیت هوای تونل به مقادیر مجاز تعریف شده باشد.

با بهره‌گیری از یک سیستم کنترل مرکزی مبتنی بر PLC و با در نظر گرفتن مقادیر تعریف شده برای حسگرهای آلاینده سنج و سیستم اعلان حریق خطی ، می‌توان دو سناریوی «کاهش بار غیرحیاتی همزمان با غیرفعال کردن جت فن ها » تعریف کرد.

۱-۲ در سناریو اول زمانی که سطح آلاینده در تونل در حالت نرمال و استاندارد قرار دارد ، سیستم به

طور خودکار اقدامات زیر را انجام می‌دهد.(شکل ۲)



شکل ۲- سیستم اطفای حریق خطی

کاهش توان تهویه تونل: در پروسه کنترل سیستم تهویه، پارامترهای سرعت هوا و کیفیت هوای داخل تونل باید کنترل شوند. در صورتی که مقادیر هدف در تونل از اهداف مجاز پایین تر است فن های کمتری لازم است و برای جت فن هایی که در حال کار هستند باید دستورالعمل درست و مناسب توسط سیستم کنترل ارائه شود که اگر لازم باشد که جت فن هایی خاموش شوند باید جت فن هایی با ساعات بیشتر عملکرد و با وضعیت "خاموش شدن ممکن است" انتخاب شوند. اگر کاهش سرعت جریان هوای تونل مورد نیاز باشد، باید جت فن های تونل مطابق اولویت ها خاموش شوند

۲-۱-۲ در سناریو دوم زمانی که تونل دچار حریق شود با استفاده از کابل های حسگر حرارتی خطی نصب شده در تونل به طور مداوم دما را در تمام طول آن پایش می کند این کابل قادر است افزایش دما را در هر نقطه ای شناسایی کرده و آن را به صورت لحظه ای به واحد کنترل اعلام کند. پس از تشخیص و تأیید حادثه، واحد کنترل مرکزی هوشمند بر اساس سناریوهای از پیش تعریف شده میلی ثانیه ای فرایند را در دست می گیرد و اقدام به اجرای یک سری فرامین هماهنگ می کند و کنترل هوشمند، به طور خودکار اقدامات زیر را انجام می دهد:

۱. کاهش توان تهویه تونل: لازم است جت فن های بالادست آتش که برای جلوگیری از حرکت دود به سمت مسیرهای امن خاموش می شوند. همچنین در صورتی که تونل دو مسیر باشد تمامی جت فن های مسیر مقابل غیر فعال می شود.

۲. قطع بارهای غیرضروری: طبق یک سناریوی اولویت بندی شده، بلافاصله برق تمام بارهای غیرضروری و حیاتی را قطع می کند. این موارد شامل تهویه مطبوع عادی (HVAC)، سیستم های روشنایی غیر اضطراری (روشنایی تزئینی و معماری) بخش هایی از سیستم ارتباطی مانند تلفن های عمومی و رادیوهای تفریحی که برای هماهنگی عملیات نجات ضروری نیستند.

۳. تنظیم دور تجهیزات حیاتی: برای تجهیزاتی که نمی توان آن ها را قطع کرد، PLC از اینورتر (VFD) استفاده می کند.

۴. کاهش سطح روشنایی تونل: با دستور به سیستم روشنایی، شدت نور چراغ های مسیر عادی را به حداقل استاندارد مجاز کاهش می دهد و تنها مسیرهای خروج اضطراری را پر نور نگه می دارد تا مصرف برق روشنایی تا ۸۰ درصد کاهش پیدا کند.

۵. غیرفعال کردن پمپ ها و فن های پشتیبان: فن هایی که برای خنک کاری اتاق برق و UPS استفاده می شدند، در دور بسیار پایین تری کار می کنند تا انرژی ذخیره شده در مولدهای اضطراری (ژنراتور) صرفاً در اختیار فن های تخلیه دود قرار گیرد.

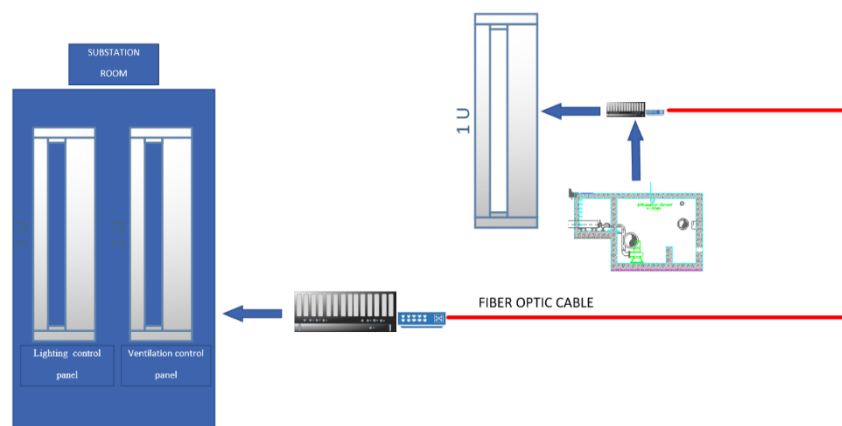
۶. مدیریت منابع تغذیه اضطراری و توزیع بهینه: در لحظه اعلام حریق، کنترلر مرکزی وضعیت سیستم برق اضطراری (UPS و ژنراتور) را بررسی کرده و با تغییر وضعیت خودکار کلیدهای انتقال خودکار (ATS)، اولویت توزیع برق را به صورت

پویا مدیریت می‌کند. این فرآیند تضمین می‌کند که در صورت قطع برق اصلی، تجهیزات تهویه دود و روشنایی اضطراری با حداکثر قابلیت اطمینان ممکن تغذیه شوند. چنین مدل‌های کنترلی در استانداردهای بین‌المللی مانند NFPA 502 که سازوکارهای مدیریت یکپارچه انرژی را برای بخشهای مختلف تونل از جمله سیستم‌های تأمین برق و روشنایی تعریف می‌کند، به عنوان یک الزام کلیدی در طراحی سیستم‌های ایمنی تونل‌ها قلمداد می‌شود.

با اجرای همزمان اقدامات فوق در حین فعالیت، مجموع توان آزادشده از بارهای روشنایی و... می‌تواند بین ۳۰ تا ۵۰ درصد از توان مصرفی سیستم تهویه در زمان حریق را پوشش دهد.

۲-۲- سیستم زهکشی و جمع آوری آب های سطحی :

با بهره‌گیری از یک سیستم کنترل مرکزی مبتنی بر PLC و حسگرهای سطح سنج (اولتراسونیک) و پیش‌بینی میزان بارش (اتصال به سامانه هواشناسی)، می‌توان یک سناریوی «کاهش بار غیرحیاتی همزمان با راه‌اندازی پمپ‌ها» تعریف کرد. در این سناریو، به محض تشخیص سطح آب در حوضچه بالاتر از آستانه راه‌اندازی پمپ اول (یا پمپ دوم)، سیستم به طور خودکار اقدامات زیر را انجام می‌دهد. (شکل ۳)



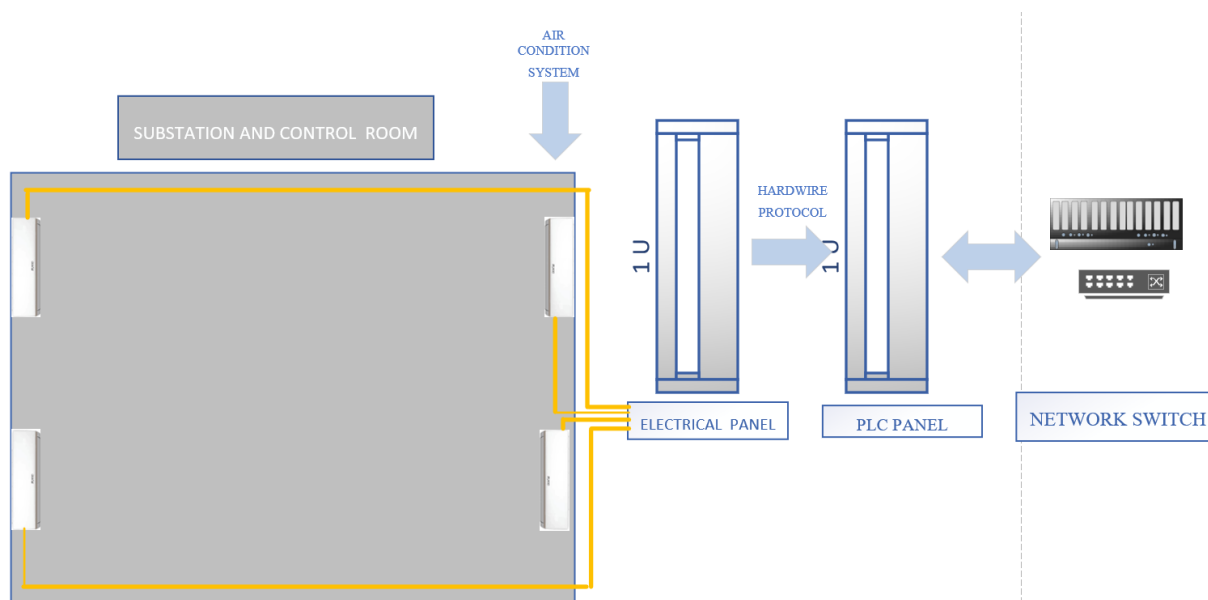
شکل ۳- دیاگرام کنترلی سیستم زهکشی و جمع آوری آب های سطحی

۱. **کاهش سطح روشنایی تونل:** روشنایی معابر (نه روشنایی اضطراری) در کل تونل یا در بخش‌های غیرخروجی به حداقل سطح مجاز استاندارد (مثلاً ۲۰-۳۰٪ نور نامی) کاهش می‌یابد.

توجیه مهندسی: در زمان بارندگی شدید، ترافیک معمولاً با سرعت کمتر و فاصله بیشتر حرکت می‌کند و رانندگان به طور ذاتی محتاط‌ترند؛ لذا کاهش موقت روشنایی تا زیر ۵۰٪ مقدار نامی، با رعایت یکنواختی نور، خطرات محسوسی ایجاد نمی‌کند، در حالی که توان قابل توجهی (معادل ۳۰-۴۰٪ کل روشنایی) آزاد می‌سازد.

۲. **کاهش توان تهویه تونل:** فن‌های جت یا محوری اصلی تونل (در بخش‌هایی که حریق وجود ندارد) به جای قطع کامل، با دور کاهش‌یافته (مثلاً ۵۰٪ دور نامی) به کار خود ادامه می‌دهند، زیرا در شرایط بارندگی، کیفیت هوای داخل تونل به دلیل رطوبت بالا و شستشوی طبیعی ذرات توسط آب تا حدی بهبود می‌یابد. این کاهش دور باعث صرفه‌جویی حدود ۷۵٪ در توان فن‌ها (قانون وابستگی توان به مکعب دور) می‌شود.

۳. **تعدیل تهویه مطبوع پست‌های برق:** در پست‌های تغذیه‌کننده پمپ‌ها، بار اصلی روی ترانسفورماتورها و تابلوهای برق با راه‌اندازی پمپ‌ها به شدت افزایش می‌یابد. در این حالت، سیستم هوشمند می‌تواند با تحلیل دمای واقعی تجهیزات، با استفاده از سنسورهای (RTD)، کمپرسورهای چیلر یا فن‌های اواپراتوری را به صورت دور متغیر (VFD) تعدیل کند. به عنوان مثال، اگر دمای سیم‌پیچی ترانسفورماتور کمتر از حد استاندارد می‌باشد، توان



سرمایش را می‌توان تا ۴۰٪ کاهش داد، بدون آنکه تجهیزات در معرض خطر حرارتی قرار گیرند. (شکل ۴)

شکل ۴ - دیاگرام کنترلی سیستم تهویه مطبوع

۳-۲- در خصوص سیستم آتش نشانی و پمپ خانه:

پمپ خانه آتش نشانی به عنوان یکی از زیرسیستم های حیاتی تونل با استفاده از سیستم کنترل هوشمند طراحی می شود تا ضمن تأمین فشار پایدار شبکه آتش نشانی، مصرف انرژی در شرایط متغیر مختلف (عادی، بحران و تعمیر و نگهداری) به طور خودکار بهینه گردد. در شرایط عادی، سیستم کنترل با هدف حفظ فشار مورد نیاز شبکه آتش نشانی با کمترین مصرف انرژی عمل می کند ولی در زمان حریق پس از تشخیص قطعی حریق و دریافت فرمان از سیستم اعلان حریق کلیه تصمیم گیری ها با هدف تأمین حداکثر توان برای اطفاء حریق و همزمان بهینه سازی مصرف انرژی سایر زیرسیستم ها انجام می گیرد.

می توان سناریوی «کاهش بار غیرحیاتی در شرایط نرمال» را تعریف کرد. در این سناریو، سیستم به طور خودکار اقدامات زیر را انجام می دهد:

۱. مدیریت خودکار حذف بار (Load Shedding) بر اساس اولویت
به منظور جلوگیری از اضافه بار شبکه برق و افت ولتاژ هنگام راه اندازی پمپ های پرمصرف، PLC به صورت خودکار بارهای غیر حیاتی را در سراسر تونل حذف یا کاهش می دهد. دسته بندی اولویت ها به شرح زیر است:

 - اولویت ۱: سیستم های کم اهمیت مانند تهویه مطبوع معمولی اتاق های کنترل (HVAC)، روشنایی تزئینی و تابلوهای غیرمرتبط به طور کامل قطع شود.
 - اولویت ۲: سیستم هایی که می توان توان مصرفی را کاهش داد مانند روشنایی معابر اصلی تونل به سطح (۳۰-۴۰ درصد) و با رعایت ایمنی مناسب
 - اولویت ۳: سیستم تهویه نرمال تونلی که در آن حریق وجود ندارد به طور کامل بصورت موقت با حفظ حداقل شرایط ایمن قطع شود.
 - اولویت ۴: سیستم های حیاتی که هرگز قطع نمی شود مانند پمپ های آتش نشانی، فن های اگزاست دود، روشنایی اضطراری، سیستم اعلان حریق، تجهیزات ارتباطات اضطراری و PLC های مرکزی

۲. هماهنگی با پمپ دیزل پشتیبان

در صورت قطع کامل برق شهری یا افت فشار شدید شبکه، PLC به طور خودکار پمپ آتش نشانی دیزلی را استارت کرده و با سوییچ هوشمند شیرهای یک طرفه، منبع تغذیه را از پمپ الکتریکی به دیزلی منتقل می کند.

با اجرای همزمان سه اقدام فوق در حین فعالیت پمپ های زهکشی، مجموع توان آزاد شده از بارهای روشنایی و تهویه می تواند بین ۴۰ تا ۶۰ درصد از توان مصرفی پمپ ها را پوشش دهد. به عبارت دیگر، افزایش خالص توان مصرفی تونل از شبکه سراسری به جای ۱۰۰ کیلووات (در صورت بدون هوشمندی) به حدود ۴۰ تا ۵۰ کیلووات کاهش می یابد. این امر مزایای زیر را به همراه دارد:

- جلوگیری از افت ولتاژ ناگهانی در شبکه داخلی تونل
- کاهش جریان هجومی همزمان پمپ ها و سایر بارها

- کاهش قبوض برق به دلیل عدم عبور از توان قراردادی در پیک‌های لحظه‌ای
- افزایش طول عمر تجهیزات روشنایی و فن‌ها به دلیل کار در دور کمتر

اگر (سطح آب حوضچه < آستانه راه‌اندازی پمپ شماره ۱) آنگاه:

- کاهش روشنایی تونل به ۳۰٪ مقدار نامی (با نرخ تغییر ۱۰٪ بر ثانیه برای جلوگیری از شوک نوری)
- کاهش دور فن‌های تهویه تونل به ۵۰٪ (با نرخ ۵٪ بر ثانیه)
- ارسال فرمان به کنترلر HVAC پست‌ها: محدودیت توان سرمایش به ۶۰٪ نامی
- راه‌اندازی پمپ(ها) با اینترلاک زمانی ۲ ثانیه پس از اعمال کاهش بار

در غیر این صورت (سطح آب پایین‌تر از آستانه توقف):

بازیابی تدریجی روشنایی و تهویه به حالت عادی (با نرخ ۵٪ بر ثانیه)

۳- سیگنال راه‌اندازی پمپ زهکشی (برای کاهش روشنایی و تهویه):

هاردوایر (سخت‌افزاری / سیمی): هر سیگنال از طریق یک زوج سیم اختصاصی از سنسور یا عملگر به ماژول ورودی/خروجی PLC متصل می‌شود. مزیت: تأخیر بسیار کم (زیر میلی ثانیه)، عدم وابستگی به پیکربندی شبکه، امنیت بالا در برابر هک یا قطعی پروتکل که معایب آن می‌تواند هزینه کابل‌کشی بیشتر در فواصل طولانی باشد

در پروژه هوشمند تونل، برای سیگنال‌های حیاتی و سریع (مانند تشخیص راه‌اندازی پمپ زهکشی یا هشدار حریق) از هاردوایر استفاده می‌شود و برای داده‌های پایشی (مانند میزان روشنایی فعلی یا دمای پست) می‌توان از پروتکل‌های دیگر استفاده کرد.

جدول ۱- سیگنال‌های دریافتی زیر سیستم

نوع سیگنال	مخفف	محدوده استاندارد	کاربرد آن
ورودی دیجیتال (Digital Input)	DI	24 VDC (صفر یا ۲۴ ولت) یا کنتاکت خشک (Dry contact)	اعلام راه‌اندازی پمپ زهکشی (NO/NC) سوئیچ دستی override
ورودی آنالوگ (Analog Input)	AI	4-20 MA OR 0-10 V (متناسب با کمیت فیزیکی)	سنسور اولتراسونیک ترانسسمیتر جریان برای پایش توان پمپ

توجه: خروجی‌های PLC برای کنترل تجهیزات نیز به صورت هاردوایر هستند.

- ۱- خروجی دیجیتال (DO): فرمان قطع/وصل کنتاکتور روشنایی اضافی یا فن تهویه (با رله 24VDC)
- ۲- منبع سیگنال: یک رله کمکی (auxiliary relay) در تابلو برق پمپ زهکشی. این رله با بسته شدن کنتاکتور پمپ، کنتاکت خشک خود را تغییر می‌دهد و همچنین سیگنال AI از سنسور اولتراسونیک که جهت پایش سطح آب می باشد
- ۳- نوع کنتاکت رله (Normally Open (NO): در حالت عادی باز است، هنگام کار پمپ بسته می‌شود.
- ۴- نحوه اتصال رله و سنور به PLC:
- کابل: زوج به هم تابیده (Twisted pair) با سطح مقطع ۱.۵ میلی‌متر مربع
۴. عملکرد در PLC:

هنگامی که سیگنال جریان سنسور سطح سنج به PLC می رسد بلافاصله فرمان کاهش روشنایی به ۵۰-۳۰٪ و خاموش کردن جت فن‌های تهویه را صادر می‌کند.

- خروجی آنالوگ (DO) به کلید و یا رله تابلو برق روشنایی جهت کاهش بار روشنایی
- خروجی آنالوگ (DO) به Soft Starter جت فن های تهویه
- خروجی دیجیتال (DO) برای قطع بخشی از تهویه مطبوع پست برق و یا سیگنال پروتکلی بر پروتکل های MODBUS و BACnet برای خاموش کردن تهویه های مرکزی اعم از چیلرها .

نتیجه گیری:

مدیریت بهینه مصرف انرژی در تونل‌ها با رویکرد کنترل هوشمند و استفاده از تجهیزات قابل برنامه‌ریزی نظیر PLC و درایوهای فرکانس متغیر، موضوعی کلیدی و میان‌رشته‌ای در مرز بین مهندسی کنترل، بهره‌وری انرژی و ایمنی سازه‌های زیرزمینی است. با عنایت به مطالعات انجام‌شده و بررسی استانداردهای بین‌المللی و پژوهش‌های داخلی و خارجی، می‌توان موارد زیر را به عنوان نتایج اصلی این طرح مسئله و پایه‌های یک سیستم کارآمد معرفی نمود.

الف) معماری یکپارچه مبتنی بر PLC و SCADA: پیاده‌سازی یک سیستم مدیریت جامع تونل مبتنی بر PLC های افزونه و شبکه SCADA، امکان یکپارچه‌سازی اطلاعات زیرساخت‌های پراکنده (تهویه، روشنایی، پمپ‌خانه، تهویه مطبوع و سیستم اعلان حریق) را فراهم کرده و قابلیت واکنش خودکار در شرایط عادی و بحرانی را ایجاد می‌کند. این ساختار، امنیت عملیاتی سیستم را تضمین می‌کند.

ب) بهینه‌سازی مصرف انرژی در زیرسیستم‌ها: مطالعات متعدد نشان می‌دهد که استفاده از درایوهای فرکانس متغیر (VFD) و کنترل PID در سیستم‌های تهویه و سیستم‌های کنترلی در پمپ‌خانه، با سناریوهای باز تعریف شده در زمان اضطراری صرفه‌جویی قابل توجهی در پی خواهد داشت.

جدول ۲- مقایسه سیستم های کنترلی

سیستم کنترل هوشمند	سیستم کنترل سنتی	معیار مقایسه
عالی • مصرف انرژی را دقیقاً متناسب با نیاز لحظه ای تنظیم می کند. • با پیش بینی تغییرات (مثل آب و هوا یا بار) ، توان را بهینه می کند. • در سیستم های تهویه و روشنایی، تا ۳۰ تا ۵۰ درصد صرفه جویی گزارش شده	• متوسط تا ضعیف • معمولاً بر اساس بدترین شرایط طراحی می شود (Over-design). • در بارهای جزئی، راندمان افت می کند (مثلاً موتورهای همیشه با حداکثر توان کار نمی کنند). • نوسانات مکرر (Hunting) در سیستم های On-Off باعث هدررفت انرژی می شود.	مصرف بهینه انرژی
دقت بالا و پایدار را در کل محدوده کاری حفظ می کند، زیرا به صورت خودکار خود تنظیم می کند	در نقطه کار طراحی شده، دقت بالایی دارد، اما با تغییر شرایط، ناپایدار یا کم دقت می شود	دقت و پایداری
واکنش پیش بینانه و نرم می تواند اختلال را پیش بینی کرده و قبل از اثرگذاری، واکنش نشان دهد	واکنش تاخیری و خشک	واکنش به تغییرات محیطی

	بعد از رخ دادن اختلال، واکنش نشان می دهد .	
پیچیدگی طراحی و تنظیمات	سبباً ساده و مبتنی بر فرمول. تنظیم ضرایب (مثل PID) با روش های تجربی امکان پذیر است	بسیار پیچیده. نیازمند دانش تخصصی
هزینه پیاده سازی اولیه	پایین قطعات ارزان (رله، تایمر، کنترلرهای ساده)، نصب آسان	بالا نیاز به سنسورهای هوشمند، PLC پیشرفته، نرم افزارهای خاص و زیرساخت شبکه. (IoT)

سیستم کنترل سنتی به دلیل ماهیت ایستا و عدم تطبیق با شرایط لحظه ای، نه تنها مصرف انرژی را تا ۵۰ درصد بیشتر از نیاز واقعی افزایش می دهد، بلکه در لحظات بحرانی حریق، با حفظ بارهای غیرضروری، توان الکتریکی مورد نیاز تجهیزات ایمنی (پمپ ها، فن های اگزست دود) را به مخاطره می اندازد. در مقابل، سیستم کنترل هوشمند مبتنی بر PLC با بهره گیری از سیگنال های حسگرها و سیستم اطفای حریق به عنوان محرک، ضمن کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصدی مصرف در حالت عادی، در هنگام آتش سوزی با حذف خودکار بارهای غیرحیاتی، بیش از ۵۰ درصد صرفه جویی انرژی را محقق ساخته و همزمان منابع توان را برای پمپخانه آتش نشانی و تهویه اضطراری آزاد می کند. بنابراین، طراحی و پیاده سازی سیستم کنترل هوشمند مبتنی بر PLC و SCADA با منطق شرطی مبتنی بر حریق، یک ضرورت فنی و اقتصادی برای تونل های مدرن محسوب می شود که همزمان «تأمین ایمنی»، «بهره وری انرژی» و «پایداری اقتصادی» را تأمین می کند.

منابع :

۱. دومین کنفرانس ملی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، تهران، ایران، بررسی سیستم کنترل هوشمند مبتنی بر PLC در مدیریت انرژی تونل های شهری
۲. فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی تونل، بهینه سازی مصرف انرژی در سیستم های روشنایی و تهویه تونل با رویکرد کنترل فازی
۳. بیست و هشتمین کنفرانس سراسری مهندسی برق ایران، تهران سیستم کنترل و کاهش مصرف انرژی جهت تهویه تونل ها .
۴. اصول طراحی سیستم های کنترل و SCADA در تونل ها (سازمان مدیریت تونل های شهری تهران)

۵. سازمان ملی استاندارد ایران. (1399). استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۸۸۲ - الزامات سیستم‌های اعلام و اطفاء حریق در تونل‌های راه (ویرایش دوم).
۶. طراحی و شبیه‌سازی سیستم کنترل هوشمند تهویه تونل مبتنی بر PLC با قابلیت کاهش مصرف انرژی. مجله علمی «مهندسی و مدیریت انرژی»
۷. کاربرد کنترل‌گرهای منطقی برنامه‌پذیر در سیستم‌های روشنایی هوشمند تونل. دومین همایش ملی سیستم‌های هوشمند در مهندسی برق،

1. Optimization Model for Ventilation Control in Tunnel Construction Based on CO-Air Demand Theory. *Tunnel Construction* Zhang, J., & Guo, C. (2023).
2. Application of Real-Time Regulation Energy-Efficient System for Highway Tunnel Lighting. *Tunnel Construction*, Zhang, K., et al. (2025).
3. Power Consumption Control of Multi-Pump Systems of the Main Water Drainage in Underground Mines Based on the Mamdani Fuzzy Inference System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Mykhailenko, O., Baranowski (2023).
4. Research on Energy-Saving Effects of Highway Tunnel Shading Canopies Based on a Multi-Factor Control Model. *Energy and Buildings*, Liu, F., et al. (2025).
5. Adaptive Critic Design Based Control of Tunnel Ventilation System with Variable Jet Speed. In *Proceedings of the 2015 IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC)* Zhao, L., et al. (2015).
6. Tunnel Intelligent Lighting Control Solution. *Industrial Automation Technology Report*. Phoenix Contact. (2023).
7. Energy Saving Tunnel Lighting System Based on PLC. IET Digital Library, 2006.
8. An Intelligent Energy Management System for Underground Stations. ScienceDirect, 2016.
9. Intelligent Technologies for Tunnel Construction and Maintenance: A State-of-the-Art Review of Methods and Supporting Platforms. ScienceDirect, 2025.
10. Mykhailenko, O., Baranowski, V., et al. (2023). Power Consumption Control of Multi-Pump Systems of the Main Water Drainage in Underground Mines Based on the Mamdani Fuzzy Inference System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254, 012046.
11. NFPA. (2022). *NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways* (2022 ed.). Quincy, MA: National Fire Protection Association.
12. Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses. CIE 88:2004