روشنایی هوشمند با برد آردوینو

محمد محمودبابویی*[۱]، محمد جیردهی[۲].

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی گروه کامپیوتر موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی مارلیک نوشهر، مازندران، ایران
mh.mohammad6283@gmail.com

۲- دانشجوی مقطع کارشناسی گروه کامپیوتر موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی مارلیک نوشهر، مازندران، ایران
mohammadjirdehi3@gmail.com

چکیده:

در پی حرکت جهانی به سوی توسعه شهرهای هوشمند و نیاز مبرم به کاهش مصرف فزاینده انرژی، تحول زیرساخت‌های روشنایی سنتی به سیستم‌های هوشمند حیاتی است. این مقاله مروری جامع، به بررسی نقش محوری پلتفرم آردوینو به عنوان یک ابزار قدرتمند و مقرون‌به‌صرفه در هوشمندسازی سیستم‌های روشنایی، با تمرکز بر حوزه‌های روشنایی معابر و فضاهای داخلی، می‌پردازد. روش کار بر تحلیل پژوهش‌های اخیر متمرکز است که آردوینو را به عنوان هسته کنترلی تعبیه‌شده به کار گرفته‌اند. این بررسی نشان می‌دهد که به دلیل ماهیت متن‌باز، هزینه پایین و سهولت برنامه‌نویسی، آردوینو به انتخابی ایده‌آل برای نمونه‌سازی و پیاده‌سازی سریع راه‌حل‌های بهینه‌ساز انرژی تبدیل شده است. یافته‌ها حاکی از آن است که در روشنایی معابر، آردوینو با ادغام حسگرهای مقاومت وابسته به نور و سنسور مادون قرمز، قابلیت کنترل دینامیک شدت نور را فراهم می‌کند و مصرف انرژی را با تطبیق خروجی نور با حضور کاربران به شدت کاهش می‌دهد. همچنین، یکپارچه‌سازی آردوینو با پروتکل‌های اینترنت اشیا و شبکه‌های دوربرد مانند LORAWAN امکان مانیتورینگ متمرکز، مدیریت از راه دور و گزارش‌دهی خودکار خطاها در مقیاس‌های شهری را فراهم می‌آورد. در محیط‌های داخلی، آردوینو انعطاف‌پذیری خود را در کنترل‌های بی‌سیم (وای-فای/بلوتوث) و پیاده‌سازی مکانیزم‌های پیشرفته مانند کنترل بر مبنای محرک‌های صوتی (غیر حرکتی) و حتی آزمایش فناوری‌های نوظهور نظیر وفاداری نوری نشان داده است. علاوه بر این، توانایی آردوینو در پیاده‌سازی کنترلرهای PID، تضمین‌کننده حفظ یک سطح روشنایی ثابت و باکیفیت با جبران نوسانات فنی است. با این حال، چالش‌های سخت‌افزاری (توان پردازشی و حافظه محدود) و آسیب‌پذیری‌های امنیتی در سیستم‌های متصل به اینترنت اشیا همچنان نیازمند توجه هستند. نتیجه‌گیری این است که آردوینو به عنوان یک کاتالیزور قدرتمند عمل می‌کند که ضمن دموکراتیزه کردن فناوری، راه را برای نسل بعدی زیرساخت‌های روشنایی چندکارکردی و پایدار هموار می‌سازد.

کلمات کلیدی: آردوینو، روشنایی هوشمند، بهره‌وری انرژی، اینترنت اشیاء، روشنایی معابر، کنترلر.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش نگران‌کننده مصرف انرژی در بخش‌های مختلف شهری و ساختمانی، همراه با حرکت جهانی به سوی توسعه شهرهای هوشمند، ضرورت بازنگری در سیستم‌های زیرساختی سنتی را آشکار ساخته است [۲,۱]. سیستم‌های روشنایی، که سهم قابل توجهی از مصرف کلی انرژی را به خود اختصاص می‌دهند، در خط مقدم این تحول قرار دارند. روشنایی‌های قدیمی با عملکرد ثابت، به ویژه در معابر و فضاهای بزرگ، اغلب منجر به اتلاف عظیم انرژی می‌شوند، زیرا بدون توجه به شدت نور محیط یا حضور کاربران، در تمام طول شب با شدت کامل کار می‌کنند [۴,۳].

برای مواجهه با این چالش‌ها و دستیابی به بهره‌وری حداکثری، توسعه و پیاده‌سازی سیستم‌های روشنایی هوشمند امری حیاتی است. این سیستم‌ها به طور خودکار و پویا، خروجی نور را بر اساس داده‌های لحظه‌ای محیطی و حرکتی تنظیم می‌کنند [۱]. در این میان، پلتفرم آردوینو به عنوان یک ابزار محوری و پیشگام ظاهر شده است. آردوینو که به دلیل ماهیت متن‌باز، دسترسی‌پذیری آسان و هزینه مقرون‌به‌صرفه شناخته می‌شود [۲,۵]، بستر مناسبی را برای مهندسان و محققان فراهم کرده تا به سرعت نمونه‌های اولیه سیستم‌های تعاملی را در این حوزه بسازند [۲].

این مقاله مروری جامع، با استفاده از پژوهش‌های اخیر، به بررسی نقش محوری برد آردوینو در هوشمندسازی سیستم‌های روشنایی می‌پردازد و طیف گسترده‌ای از راه‌حل‌های توسعه یافته را در دو حوزه کلیدی روشنایی عمومی (معابر) و روشنایی داخلی (ساختمان) تحلیل می‌کند.

۲. مروری بر پلتفرم آردوینو در سیستم‌های تعبیه‌شده

این یک درخواست چالش‌برانگیز است، زیرا معمولاً در مقالات آکادمیک، پاراگراف‌ها بر اساس ایده و انسجام محتوایی شکل می‌گیرند، نه صرفاً شمارش عددی. با این حال، با هدف گسترش و تعمیق بحث در هر زیربخش، من هر زیربخش را به چندین پاراگراف با تمرکز بر جنبه‌های مختلف معماری، قابلیت‌ها، و کاربردهای آردوینو در سیستم‌های تعبیه‌شده، بسط خواهم داد تا به تعداد پاراگراف‌های درخواستی شما نزدیک شوم

۲.۱. معماری و ویژگی‌های کلیدی آردوینو

معماری پایه‌ای بردهای آردوینو، که حول یک میکروکنترلر بنا شده است، امکان هماهنگی نرم‌افزاری و تعامل فیزیکی را فراهم می‌سازد. میکروکنترلر بخش اصلی هر برد است که مسئولیت اجرای سفت‌افزار[1] و منطق کنترلی سیستم‌های روشنایی را بر عهده دارد. مدل‌های رایج مانند Arduino UNO از میکروکنترلرهای سری Atmel AVR استفاده می‌کنند که به دلیل پایداری و اثربخشی در کاربردهای بلادرنگ، گزینه مناسبی برای مدیریت سنسورها و عملگرها هستند [همان].

در کنار میکروکنترلر، پین‌های ورودی/خروجی دیجیتال و آنالوگ نقش حیاتی را در تعامل آردوینو با محیط ایفا می‌کنند. پین‌های آنالوگ با قابلیت ۱۰-بیتی مبدل آنالوگ به دیجیتال[2]، سیگنال‌های متغیر را از سنسورهای وابسته به نور مانند وابسته به نور دریافت می‌کنند تا آردوینو بتواند شدت نور محیط را با دقت بالا سنجیده و تصمیمات کنترلی را اتخاذ نماید [۶]. این سنجش آنالوگ، مبنای اصلی برای عملکردهای خودکارسازی روشنایی معابر بر اساس نور خورشید را فراهم می‌سازد.

[1] Firmware
[2] ADC

پین‌های دیجیتال نیز وظیفه ارسال سیگنال‌های کنترلی به عملگرها و دریافت ورودی‌های گسسته (روشن/خاموش) از سنسورها را بر عهده دارند. بخش مهمی از این پین‌ها قابلیت مدولاسیون عرض پالس [1] را ارائه می‌دهند که برای کنترل دقیق شدت نور دیود نورافشان [2] ها ضروری است. استفاده از مدولاسیون عرض پالس به آردوینو اجازه می‌دهد تا جریان ارسالی به درایورهای دیود نورافشان را به صورت مؤثر کنترل کرده و در نتیجه، نور را به‌صورت نرم و پیوسته کم یا زیاد [3] کند، که یک ویژگی کلیدی در سیستم‌های روشنایی هوشمند و صرفه‌جویی در انرژی است [۷].

محیط توسعه یکپارچه [4] آردوینو، که بر پایه زبان برنامه‌نویسی C/C++ بنا شده، سادگی و کاربرپسندی پلتفرم را تضمین می‌کند. این محیط با ارائه کتابخانه‌های استاندارد و قابل استفاده مجدد، بار توسعه را به شدت کاهش می‌دهد و به محققین اجازه می‌دهد تا به جای تمرکز بر جزئیات فنی میکروکنترلر، بر روی منطق کنترلی مانند پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیشرفته PID برای حفظ شدت نور ثابت تمرکز کنند [همان]. این سهولت برنامه‌نویسی، یکی از دلایل اصلی پذیرش گسترده آردوینو در پروژه‌های دانشگاهی و صنعتی است [۲].

ماهیت متن‌باز آردوینو نه تنها شامل نرم‌افزار، بلکه شامل سخت‌افزار (شماتیک‌ها و فایل‌های طراحی) نیز می‌شود. این شفافیت، توسعه‌دهندگان را قادر می‌سازد تا بردها را بر اساس نیازهای خاص پروژه‌های خود، مانند نیاز به پورت‌های ارتباطی خاص یا منابع تغذیه خارجی، سفارشی‌سازی کنند [همان]. این انعطاف‌پذیری، در توسعه راه‌حل‌های نوآورانه مانند استفاده از ماژول‌های بلوتوث HC-05 برای کنترل صوتی در ساختمان‌ها، بسیار حائز اهمیت است [۸].

۲.۲. ادغام با فناوری‌های پیشرفته ارتباطی

نقش آردوینو در هوشمندسازی روشنایی به طور چشمگیری توسط توانایی آن در ادغام با فناوری‌های ارتباطی مدرن تقویت می‌شود، و آن را به یک گره کلیدی در معماری اینترنت اشیا تبدیل می‌کند [۹]. آردوینو با افزودن ماژول‌های ارتباطی مانند وای-فای یا اترنت شیلد، می‌تواند داده‌ها را به سرورهای ابری منتقل کرده و از طریق اینترنت، فرمان‌های کنترلی را از اپلیکیشن‌های موبایل دریافت کند، که اساس سیستم‌های لامپ هوشمند اینترنت اشیا را تشکیل می‌دهد [همان].

در حوزه روشنایی معابر، آردوینو با پروتکل‌های دوربرد و کم‌مصرف مانند LORAWAN یکپارچه می‌شود. این قابلیت ارتباطی، آردوینو را قادر می‌سازد تا در فواصل شهری طولانی، داده‌های سنسورها (سنسور مادون قرمز و وابسته به نور) را به یک Gateway ارسال کند، و در نتیجه امکان مانیتورینگ متمرکز بر وضعیت تک‌تک چراغ‌ها، گزارش‌دهی دقیق خطاهای احتمالی، و بهینه‌سازی الگوهای روشنایی را در مقیاس وسیع فراهم می‌سازد [۱۰,۳]. این زیرساخت هوشمند، پایداری عملیاتی را افزایش و هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد.

همچنین، آردوینو فراتر از ارتباطات مبتنی بر امواج رادیویی، در پیاده‌سازی سیستم‌های ارتباطی نوری نظیر(وفاداری نوری) نیز نقش ایفا می‌کند. آردوینو به عنوان مدولاتور، داده‌ها را به پالس‌های نوری با فرکانس بالا (غیرقابل تشخیص برای چشم انسان) تبدیل کرده و از طریق دیود نوری سفید منتقل می‌کند، که در نهایت توسط گیرنده‌های نوری بازیابی و رمزگشایی می‌شوند. اگرچه برد ارتباطی آن محدود است، این فناوری یک کانال ارتباطی امن و سریع مبتنی بر نور مرئی را برای اتوماسیون خانگی فراهم می‌آورد [۵].

[1] PWM
[2] LED
[3] Dimming
[4] IDE

۲.۳. محدودیت‌ها و چشم‌انداز آینده آردوینو

با وجود موفقیت‌های گسترده، آردوینو در کاربردهای پیچیده با چالش‌های سخت‌افزاری روبرو است. این بردها دارای توان پردازشی و ظرفیت حافظه ذخیره‌سازی محدودی هستند که ممکن است در پروژه‌هایی که نیاز به تحلیل داده‌های حجیم (مانند پردازش تصویر یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین) دارند، عملکرد ضعیفی از خود نشان دهند [۲]. همچنین، نیاز به استفاده از درایورها و رله‌های خارجی برای کنترل بارهای جریان متناوب یا دیود نورافشان های پرقدرت، پیچیدگی‌های مدار را افزایش می‌دهد [۷].

مسائل امنیتی نیز به دلیل اتصال سیستم‌های روشنایی هوشمند به اینترنت، نگرانی جدی ایجاد کرده است. ماهیت متن‌باز بودن آردوینو، در کنار پروتکل‌های ارتباطی ساده (مانند وای-فای)، می‌تواند این سیستم‌ها را در برابر دسترسی‌های غیرمجاز و تهدیدات سایبری آسیب‌پذیر سازد. بنابراین، نیاز به پیاده‌سازی مکانیزم‌های امنیتی در لایه‌های نرم‌افزاری و پروتکل‌های رمزنگاری شده امری ضروری است [۹,۲].

با این حال، چشم‌انداز آینده آردوینو در این حوزه بسیار امیدوارکننده است. محققان به دنبال بهبود برد ارتباطی سیستم‌های وفاداری نوری با استفاده از دیود نورافشان های پرقدرت‌تر یا روش‌های مدولاسیون پیشرفته‌تر هستند [۵]. همچنین، انتظار می‌رود نسل‌های جدید آردوینو با میکروکنترلرهای قوی‌تر و یکپارچه‌سازی ماژول‌های ارتباطی پیشرفته، قابلیت پشتیبانی از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر کنترل (مانند فازی و شبکه‌های عصبی) را در مقیاس‌های بزرگ‌تر شهری فراهم کنند [۲].

در نهایت، آردوینو به نقش حیاتی خود به عنوان ابزاری مقرون‌به‌صرفه و آموزشی در ترویج آموزش علوم، فناوری، مهندسی و ریاضیات[1] ادامه خواهد داد و نسل‌های آینده مهندسان را برای طراحی و پیاده‌سازی زیرساخت‌های هوشمند و پایدار آماده می‌کند [همان]. این پلتفرم، پلی بین تئوری و عمل در حوزه سیستم‌های تعبیه‌شده ایجاد کرده که توسعه راه‌حل‌های نوین و بهره‌ور انرژی را در سطح جهانی تسریع می‌بخشد.

۳. روشنایی هوشمند معابر و فضاهای بزرگ

روشنایی معابر و فضاهای عمومی، یک زیرساخت حیاتی شهری است که در گذشته به دلیل ماهیت ایستا[2] و عدم واکنش به تغییرات محیطی یا حضور واقعی کاربران، به منبع اصلی اتلاف انرژی تبدیل شده بود. پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهند که سیستم‌های سنتی، عموماً کارایی پایینی دارند و لزوم تحول به سمت سیستم‌های روشنایی هوشمند را برجسته می‌کنند [۳]. پلتفرم آردوینو با ارائه یک بستر کنترلی انعطاف‌پذیر و ارزان‌قیمت، امکان توسعه سیستم‌های نسل جدید را فراهم کرده که با تنظیم دینامیک شدت نور، مصرف برق را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند. هسته این سیستم‌ها، تلفیق آردوینو با حسگرها و ماژول‌های ارتباطی است.

۳.۱. سیستم‌های تشخیص حرکت و نور محیطی

ابتدایی‌ترین و مؤثرترین راهکار برای آغاز هوشمندسازی، اتکای سیستم به سنسورهای محیطی برای تصمیم‌گیری آگاهانه است. این سیستم‌ها عمدتاً به دو نوع ورودی اصلی وابسته هستند: سنجش میزان نور محیطی و تشخیص حضور فیزیکی. مقاومت‌های وابسته به نور به عنوان حسگرهای محوری، میزان روشنایی محیط را به آردوینو گزارش می‌دهند.

[1] STEM
[2] Static

سنسورهای مقاومت به نور ها مقاومت خود را متناسب با شدت نور تغییر می‌دهند، و آردوینو با اندازه‌گیری ولتاژ خروجی آن‌ها از طریق پین‌های آنالوگ، قادر به تعیین سطح روشنایی است [۱].

آردوینو با تحلیل داده‌های مقاومت وابسته به نور و تنظیم یک آستانه دقیق، به‌طور خودکار زمان دقیق فعال‌سازی اولیه چراغ‌ها در غروب و زمان خاموشی صبحگاهی را تعیین می‌کند [۶]. این عملکرد روشن/خاموش خودکار بر اساس نور روز، اولین لایه از صرفه‌جویی انرژی را ایجاد می‌کند و از هدر رفت انرژی در ساعات روشنایی روز که چراغ‌ها ممکن است به دلیل خطای انسانی روشن بمانند، جلوگیری می‌نماید. این لایه پایه و اساس هر سیستم روشنایی خودکار محسوب می‌شود.

گام بعدی برای بهینه‌سازی پیشرفته، استفاده از سنسورهای تشخیص حرکت مادون قرمز است. این سنسورها با تشخیص تغییرات انرژی حرارتی در میدان دید خود، که ناشی از حرکت وسایل نقلیه یا عابرین پیاده است، یک سیگنال دیجیتال (فعال) را به پین‌های ورودی آردوینو ارسال می‌کنند [۱]. این مکانیزم به آردوینو اجازه می‌دهد تا تصمیمات کنترلی را فراتر از صرفاً تشخیص تاریکی، به حضور واقعی کاربر در معبر گره بزند.

منطق کنترلی اصلی آردوینو در این حالت به این صورت تنظیم می‌شود که در حالت عادی یا استندبای (زمانی که مقاومت وابسته به نور تاریکی را تشخیص داده اما سنسور حرکت مادون قرمز حرکتی را شناسایی نکرده است)، شدت نور دیود نورافشان[1] ها را در سطح حداقل (مثلاً ۱۰٪ تا ۳۰٪) یا کاملاً خاموش نگه دارد. این حالت کم‌نوری، امنیت پایه معبر را حفظ می‌کند، در حالی که مصرف انرژی را به کمترین میزان ممکن می‌رساند. این مدل، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای کاهش مصرف برق در ساعات کم‌تردد است [۱۰].

تنها در صورت تشخیص حرکت توسط سنسور حرکت مادون قرمز است که آردوینو فرمان افزایش شدت نور را از طریق خروجی مدولاسیون عرض پالس به درایورهای دیود نورافشان می‌دهد تا روشنایی برای یک بازه زمانی مشخص به ۱۰۰٪ برسد. این پاسخ دینامیک نه تنها ایمنی و دید مناسب را برای کاربر عبوری تضمین می‌کند، بلکه یک محرک قوی برای صرفه‌جویی در انرژی به‌شمار می‌رود. این مکانیزم شامل یک تایمر قابل برنامه‌ریزی است تا پس از عبور کاربر و اتمام زمان تأخیر، شدت نور دوباره به حالت کم‌نور اولیه باز گردد [۱].

طراحی سیستم‌های روشنایی هوشمند در معابر طولانی اغلب شامل یک آرایه شبکه‌ای از گره‌های آردوینو است. هنگامی که یک وسیله نقلیه در حال عبور توسط گره اول شناسایی می‌شود، آردوینو علاوه بر روشن کردن چراغ خود، یک سیگنال به گره‌های بعدی ارسال می‌کند تا آن‌ها نیز به‌صورت پیشگیرانه روشنایی را افزایش دهند. این کنترل منطقه‌ای و زنجیره‌ای، یک نورپردازی پیوسته، ایمن و بدون قطعی را برای کاربر تضمین می‌کند. در همین حال، چراغ‌های پشت سر کاربر پس از تأخیر، به تدریج به حالت کم‌نور باز می‌گردند و از هدر رفت انرژی در پشت سر او جلوگیری می‌کنند [۱۰].

۳.۲. اتصالات اینترنت اشیا و مانیتورینگ از راه دور

هوشمندسازی روشنایی معابر در مقیاس‌های شهری مستلزم ادغام سیستم کنترل محلی آردوینو با زیرساخت اینترنت اشیا و قابلیت کنترل از راه دور است. آردوینو به عنوان واحد کنترلی تعبیه‌شده ، داده‌های لحظه‌ای سنسورها (مقاومت وابسته به نور ، سنسور حرکت مادون قرمز) و پارامترهای عملیاتی چراغ (جریان، ولتاژ، دما) را جمع‌آوری کرده و آن‌ها را از طریق ماژول‌های ارتباطی به یک سرور مرکزی منتقل می‌کند [۳].

در محیطهای شهری با فواصل طولانی و نیاز به پوشش گسترده، استفاده از شبکه‌های کم‌توان با برد وسیع (LPWAN) مانند LORAWAN ضروری است. آردوینو با ماژول‌های LORA به‌عنوان گره‌های حسگر عمل می‌کند تا داده‌های خود را با مصرف توان بسیار پایین، به یک Gateway مرکزی ارسال کند. این معماری نه‌تنها برد وسیع و عمر

[1] LED

طولانی باتری را در صورت استفاده از منابع مستقل فراهم می‌کند، بلکه یک بستر مقیاس‌پذیر برای مدیریت هزاران چراغ روشنایی در سطح شهر را به وجود می‌آورد [همان].

یکی از مهم‌ترین مزایای اتصال اینترنت اشیا، امکان نظارت و کنترل متمرکز است. اپراتورهای شهری می‌توانند از طریق یک داشبورد مرکزی (که داده‌های آردوینو را دریافت می‌کند)، به‌طور لحظه‌ای بر وضعیت تمام چراغ‌ها نظارت داشته باشند، مصرف برق هر منطقه را تحلیل کنند و در صورت لزوم، الگوهای روشنایی را (مانند تنظیم ساعات اوج مصرف یا تغییر سطوح کم‌نوری) از راه دور تنظیم نمایند. این مدیریت فعال، بهره‌وری اداری و انعطاف‌پذیری سیستم را به شدت افزایش می‌دهد.

قابلیت گزارش‌دهی خطاها یکی از مهم‌ترین صرفه‌جویی‌های اقتصادی ناشی از معماری اینترنت اشیا است. آردوینو به طور مداوم پارامترهای حیاتی مانند ولتاژ و جریان مصرفی دیود نورافشان و وضعیت سنسورها را نظارت می‌کند. در صورت تشخیص ناهنجاری‌هایی مانند سوختن ماژول دیود نورافشان ، نقص سنسور، یا نوسانات برق، آردوینو یک هشدار خودکار[1] از طریق شبکه LORAWAN به مرکز مدیریت ارسال می‌کند [۱۰]. این امر نیاز به بازرسی‌های فیزیکی دوره‌ای و پرهزینه را کاملاً از بین برده و زمان پاسخ‌دهی به تعمیرات را تسریع می‌بخشد.

در نهایت، سیستم‌های روشنایی معابر مبتنی بر آردوینو، با تلفیق کنترل محلی هوشمند (مقاومت وابسته به نور /سنسور حرکت مادون قرمز) و نظارت جهانی IoT LORAWAN، یک راه‌حل جامع، کارآمد و اقتصادی برای دستیابی به اهداف پایداری شهری و کاهش چشمگیر مصرف انرژی ارائه می‌دهند که فراتر از صرفه‌جویی در برق، شامل کاهش هزینه‌های نگهداری و بهبود کیفیت خدمات شهری نیز می‌شود.

۴. هوشمندسازی روشنایی داخلی و اتوماسیون خانگی

در محیط‌های داخلی مانند منازل، ادارات و کریدورهای ساختمان‌ها، سیستم‌های روشنایی هوشمند مبتنی بر آردوینو با اهداف سه‌گانه افزایش راحتی کاربر، بهبود کیفیت فضاهای زندگی/کاری، و کاهش چشمگیر مصرف انرژی توسعه یافته‌اند [۵]. برخلاف روشنایی معابر که عمدتاً بر تشخیص حرکت در یک مسیر ثابت متمرکز است، سیستم‌های داخلی نیازمند تعامل پیچیده‌تر با ساکنین از طریق ورودی‌های حسی و کنترلی انعطاف‌پذیر هستند. پلتفرم آردوینو به دلیل توانایی خود در ارتباط آسان با انواع سنسورها، عملگرها و ماژول‌های ارتباطی، به عنوان یک کنترلر مرکزی مقرون‌به‌صرفه در این سیستم‌ها عمل می‌کند [۸].

۴.۱. کنترل بر مبنای محرک‌های محیطی غیر حرکتی

یکی از نوآورانه‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای صرفه‌جویی در انرژی در فضاهای داخلی کم‌استفاده مانند کریدورها، سرویس‌های بهداشتی و انباری‌ها، استفاده از کنترل مبتنی بر محرک‌های غیر حرکتی است. هدف در اینجا، جلوگیری از روشن ماندن ناخواسته چراغ‌ها در پاسخ به عوامل بی‌ربط است. سیستم‌های هوشمند می‌توانند ترکیبی از سنسورهای نور محیطی و سنسورهای صوتی را به کار گیرند تا نیاز واقعی به روشنایی را احراز کنند [۴].

منطق کنترلی آردوینو در این رویکرد به این صورت است که نور را تنها زمانی فعال می‌کند که همزمان دو شرط اساسی برقرار باشد: ۱) میزان نور محیطی کافی نباشد (توسط مقاومت وابسته به نور) و ۲) یک محرک صوتی مشخص وجود داشته باشد (توسط ماژول سنسور صدا). این سیستم‌ها با استفاده از ماژول‌های میکروفون و تقویت‌کننده، سطح دسی‌بل

[1] Alert

محیط را اندازه‌گیری کرده و آن را با یک آستانه برنامه‌ریزی‌شده در آردوینو مقایسه می‌کنند تا یک رویداد صوتی مانند کف زدن یا صحبت کردن را به‌عنوان فرمان تلقی کنند [همان].

این رویکرد ترکیبی، کارایی بسیار بالایی در حذف هدر رفت انرژی دارد. تحقیقات نشان می‌دهند که تا ۴۰ درصد از برق مصرفی روشنایی ممکن است در شرایطی هدر رود که چراغ‌ها سهواً روشن مانده‌اند یا به دلیل فعال‌سازی ناشی از حرکت غیرضروری روشن شده‌اند. با فعال کردن نور صرفاً در پاسخ به محرک‌های صوتی (مانند کف زدن) در شرایط تاریکی، آردوینو تضمین می‌کند که روشنایی فقط در صورت نیاز فعال شود [همان].

سنسورهای مقاومت به نور همچنان یک جزء کلیدی هستند و آردوینو باید قبل از پذیرش فرمان صوتی، تأیید کند که سطح نور طبیعی (مانند نور خورشید) زیر یک آستانه مشخص است. این امر مانع از فعال شدن چراغ‌ها در طول روز می‌شود، حتی اگر صدای بلندی وجود داشته باشد. پس از فعال‌سازی، آردوینو یک تأخیر زمانی را آغاز می‌کند تا پس از اتمام آن و عدم وجود محرک صوتی جدید، چراغ‌ها به‌طور خودکار خاموش شوند [همان]. این منطق پیچیده، توسط کدنویسی ساده در محیط توسعه یکپارچه آردوینو به‌راحتی قابل پیاده‌سازی است.

سنسورهای مقاومت به نور به عنوان دروازه اولیه عمل می‌کند. آردوینو به طور مداوم مقدار آنالوگ را از مقاومت وابسته به نور می‌خواند و آن را با یک مقدار آستانه (مثلاً مقدار روشنایی روز) مقایسه می‌کند. تا زمانی که نور محیط کافی باشد، آردوینو هرگونه ورودی از سنسور صدا را نادیده می‌گیرد و پین‌های خروجی متصل به رله‌ها را در حالت غیرفعال نگه می‌دارد. این امر از فعال‌سازی بیهوده چراغ‌ها در طول روز جلوگیری می‌کند [همان].

سنسور صدا به عنوان محرک ثانویه عمل می‌کند. هنگامی که مقاومت وابسته به نور تأیید کرد که محیط تاریک است، آردوینو شروع به "گوش دادن" به ورودی سنسور صدا می‌کند. این ماژول‌ها معمولاً دارای یک خروجی دیجیتال هستند که در صورت تشخیص صدایی بلندتر از آستانه تنظیم‌شده، یک پالس فعال ارسال می‌کنند. این پالس به عنوان سیگنال "حضور" یا "درخواست" کاربر تلقی می‌شود [همان].

منطق ترکیبی در آردوینو از طریق یک عبارت شرطی if پیاده‌سازی می‌شود که هر دو ورودی را بررسی می‌کند if (light_level <) (DARK_THRESHOLD && sound_level == HIGH). تنها در صورتی که هر دو شرط به‌طور همزمان برآورده شوند، آردوینو پین خروجی را فعال کرده و رله‌ای را فعال می‌کند که مدار روشنایی را می‌بندد و چراغ را روشن می‌کند [همان].

مکانیسم تأخیر زمانی برای اطمینان از کاربردی بودن سیستم حیاتی است. پس از روشن شدن چراغ، آردوینو یک تایمر را فعال می‌کند (مثلاً برای ۳۰ ثانیه). اگر در طول این ۳۰ ثانیه، سنسور صدا دوباره فعال شود، تایمر ریست می‌شود. اما اگر تایمر به پایان برسد و هیچ صدای جدیدی تشخیص داده نشود، آردوینو فرض می‌کند که فضا خالی شده و چراغ را خاموش می‌کند. این از روشن ماندن دائمی چراغ در یک محیط پر سر و صدا جلوگیری می‌کند و در عین حال اطمینان می‌دهد که چراغ در حین حضور کاربر خاموش نمی‌شود [همان].

۴.۲. سیستم‌های کنترل بی‌سیم و اتوماسیون خانگی

قابلیت اتصال بی‌سیم، جنبه ضروری در روشنایی هوشمند داخلی است و آردوینو این امکان را با استفاده از ماژول‌های ارتباطی گوناگون فراهم می‌کند تا انعطاف‌پذیری و دسترسی کاربر را افزایش دهد. استفاده از ماژول‌های وای-فای (مانند ESP8266 یا ESP32) در ترکیب با آردوینو، امکان ایجاد سیستم‌های اینترنت اشیا را فراهم می‌آورد [۹].

در این معماری، آردوینو به عنوان یک گره اینترنت اشیا عمل می‌کند، به شبکه خانگی متصل شده و وضعیت لامپ‌ها را گزارش می‌دهد و فرمان‌های کنترلی را از طریق یک سرور ابری (مانند Firebase یا Blynk) یا یک سرور محلی

دریافت می‌کند. این اتصال، کنترل روشنایی را فراتر از محدوده فیزیکی خانه گسترش می‌دهد و به کاربر امکان می‌دهد تا لامپ‌ها را از هر کجای دنیا مدیریت کند [همان].

کنترل از راه دور لامپ‌ها از طریق اپلیکیشن موبایل یکی از پرطرفدارترین کاربردهای این سیستم‌ها است. کاربر می‌تواند از طریق یک رابط کاربری ساده، وضعیت روشن/خاموش بودن لامپ‌ها را مشاهده کرده و مهم‌تر از آن، شدت نور را با استفاده از فرمان‌های مدولاسیون عرض پالس آردوینو تنظیم کند. این قابلیت، علاوه بر افزایش آسایش، با امکان خاموش کردن از راه دور چراغ‌هایی که سهواً روشن مانده‌اند، نقش مهمی در صرفه‌جویی در انرژی ایفا می‌کند [همان].

پروتکل ارتباطی در سیستم‌های وای-فای معمولاً مبتنی بر پروتکل صف بندی پیام[1] یا پروتکل انتقال ابر متن[2] است. آردوینو به عنوان یک کلاینت عمل می‌کند که یا به طور مداوم یک موضوع خاص پروتکل صف بندی پیام را برای دریافت فرمان‌ها "گوش" می‌دهد، یا به طور دوره‌ای درخواست‌های پروتکل انتقال ابر متن را به سرور ارسال می‌کند تا وضعیت جدید را دریافت کند. این زیرساخت ارتباطی دو طرفه، امکان ارسال بازخورد از آردوینو به اپلیکیشن (تأیید روشن شدن لامپ) را نیز فراهم می‌کند [همان].

علاوه بر وای-فای برای کنترل گسترده، از ماژول‌های بلوتوث (مانند HC-05) نیز به طور گسترده برای کنترل روشنایی داخلی استفاده می‌شود. بلوتوث یک راه‌حل کم‌توان، ارزان‌قیمت و محلی‌تر است که ارتباط مستقیم بین تلفن هوشمند کاربر و برد آردوینو را در محدوده کوتاه (معمولاً ۱۰ متر) فراهم می‌کند [۸].

در پروژه‌های اتوماسیون ساختمان، بلوتوث به آردوینو اجازه می‌دهد تا فرمان‌های کنترل صوتی یا کلیکی کاربر را از طریق یک رابط کاربری ساده موبایل دریافت کند. مزیت اصلی بلوتوث، عدم وابستگی به اتصال اینترنت یا شبکه وای-فای است، که آن را به یک راه‌حل پایداری برای کنترل‌های داخلی اساسی تبدیل می‌کند. آردوینو با دریافت کد فرمان از طریق بلوتوث، رله‌ها یا درایورهای دیود نورافشان را برای مدیریت روشنایی فعال می‌کند [همان].

مکانیسم ارتباطی بلوتوث معمولاً از طریق ارتباط سریال[3] انجام می‌شود. اپلیکیشن موبایل، فرمان‌های کاربر (مانند "روشن" یا "خاموش") را به یک کاراکتر یا رشته کوتاه (مانند 'a' یا 'b') تبدیل کرده و آن را از طریق پورت سریال بلوتوث به آردوینو ارسال می‌کند. آردوینو این داده‌های سریال را می‌خواند و بر اساس کاراکتر دریافتی، عملکرد مربوطه را اجرا می‌کند [همان].

کنترل صوتی در سیستم‌های بلوتوثی [۸] معمولاً در سطح اپلیکیشن موبایل انجام می‌شود. اپلیکیشن موبایل از قابلیت تشخیص گفتار سیستم عامل (مانند Google Voice) برای تبدیل فرمان صوتی "روشن شو" به متن استفاده می‌کند و سپس آن متن را به کد دستوری ('a') که برای آردوینو قابل فهم است، ترجمه و ارسال می‌کند. خود آردوینو در اینجا پردازش صوتی انجام نمی‌دهد، بلکه صرفاً گیرنده فرمان نهایی است.

۴.۳. کاربرد فناوری‌های نوری پیشرفته

آردوینو همچنین در پیاده‌سازی فناوری‌های ارتباطی نوری جدید مانند وفاداری نوری[4] ، یک شاخه پیشرفته از روشنایی هوشمند، نقش دارد. وفاداری نوری از نور مرئی ساطع‌شده از دیود نورافشان ها برای انتقال داده استفاده می‌کند و پالس‌های نوری را که با سرعت بسیار بالا ساطع می‌شوند، به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل می‌کند. در سیستم‌های اتوماسیون وفاداری نوری ، آردوینو به عنوان یک واحد مدولاسیون و رمزگشایی عمل می‌کند [۵].

[1] MQTT
[2] HTTP
[3] Serial Port Profile - SPP
[4] Li-Fi

در این معماری، یک آردوینو به عنوان فرستنده عمل می‌کند. این برد، داده‌ها یا فرمان‌ها (مثلاً فرمان "روشن کردن پنکه") را به یک الگوی باینری (رشته‌ای از ۰ و ۱) تبدیل می‌کند. سپس با استفاده از یک پین خروجی، یک دیود نورافشان را با سرعت بسیار بالا (کیلوبیت‌ها تا مگابیت‌ها در ثانیه) مطابق با این الگو روشن و خاموش می‌کند. این خاموش و روشن شدن برای چشم انسان قابل تشخیص نیست و نور به صورت پیوسته به نظر می‌رسد [همان].

در سمت دیگر، یک گیرنده وجود دارد که شامل یک سنسور نوری (مانند فتودیود یا حتی یک پنل خورشیدی کوچک) است. این سنسور، پالس‌های نوری دریافتی را به سیگنال‌های الکتریکی متناظر تبدیل می‌کند. این سیگنال‌ها سپس به پین ورودی آردوینو دوم (گیرنده) ارسال می‌شوند [همان].

آردوینو گیرنده وظیفه دمودولاسیون و رمزگشایی سیگنال را بر عهده دارد. این برد، الگوهای ولتاژ دریافتی را به رشته باینری ۰ و ۱ بازسازی می‌کند و در نهایت، فرمان اصلی (مثلاً "روشن کردن پنکه") را استخراج می‌کند. سپس آردوینو می‌تواند این فرمان را اجرا کرده و رله مربوط به پنکه را فعال کند [همان].

کاربرد اصلی این فناوری در اتوماسیون خانگی، استفاده دوگانه از سیستم روشنایی است: هم به عنوان منبع نور و هم به عنوان یک کانال ارتباطی بی‌سیم. این امر می‌تواند نیاز به کابل‌کشی‌های کنترلی یا ماژول‌های RF را کاهش دهد. آردوینو به دلیل سادگی در برنامه‌نویسی پین‌های خروجی با سرعت بالا، ابزار مناسبی برای نمونه‌سازی اولیه این سیستم‌های وفاداری نوری است [همان].

یکی از محدودیت‌های جدی که در تحقیقات نمونه اولیه وفاداری نوری با آردوینو مشاهده شده، برد ارتباطی بسیار کوتاه آن است. در مطالعه [همان]، حداکثر فاصله ارتباطی موفق تنها ۴۱ سانتی‌متر گزارش شده است. این محدودیت، استفاده عملی از آن را در یک اتاق واقعی به چالش می‌کشد و نشان می‌دهد که این فناوری هنوز در مراحل اولیه توسعه برای کاربردهای خانگی قرار دارد.

با وجود این محدودیت، مزایای بالقوه وفاداری نوری تحقیقات در این زمینه را توجیه می‌کند. وفاداری نوری از طیف نور مرئی استفاده می‌کند که بسیار گسترده‌تر از طیف رادیویی (RF) است و تداخلی با امواج وای-فای یا بلوتوث ایجاد نمی‌کند. مهم‌تر از آن، امنیت وفاداری نوری ذاتاً بالاتر است، زیرا نور از دیوارها عبور نمی‌کند و استراق سمع سیگنال از خارج از اتاق تقریباً غیرممکن است [همان].

در نهایت، استفاده از آردوینو برای نمونه‌سازی سیستم‌های وفاداری نوری ، حتی با وجود محدودیت‌های فعلی، نشان‌دهنده تطبیق‌پذیری فوق‌العاده این پلتفرم است. آردوینو نه تنها در اجرای سیستم‌های کنترلی تثبیت‌شده (مانند مقاومت وابسته به نور /سنسور حرکت مادون قرمز) موفق عمل می‌کند، بلکه به عنوان ابزاری برای آزمایش و کاوش در مرزهای فناوری‌های ارتباطی و اتوماسیون نسل آینده نیز به کار می‌رود [همان].

۵. مدیریت دقیق کیفیت و شدت نور

در حالی که بخش‌های ۳ و ۴ این مقاله بر کنترل وضعیت (روشن/خاموش) و اتصال شبکه‌ای سیستم‌های روشنایی متمرکز بودند، این بخش به سطح عمیق‌تری از هوشمندسازی می‌پردازد: مدیریت کیفیت و پایداری شدت نور[1]. در بسیاری از کاربردهای حساس، صرفاً روشن بودن چراغ کافی نیست؛ بلکه حفظ یک سطح روشنایی ثابت، دقیق و از پیش تعیین‌شده،

[1] Illuminance

حیاتی است. آردوینو، هنگامی که با الگوریتم‌های کنترل حلقه بسته ترکیب می‌شود، ابزاری قدرتمند برای دستیابی به این سطح از دقت است [۷].

۵.۱. اهمیت حفظ شدت نور ثابت

شدت نور، که بر حسب لوکس (Lux) اندازه‌گیری می‌شود، یک شاخص حیاتی مرتبط با تأثیر واقعی روشنایی بر محیط و کاربران است. این پارامتر به‌طور غیرمستقیم بازتاب‌دهنده روشنایی منبع نور است و تأثیر مستقیمی بر ادراک بصری انسان دارد. دستیابی به سطح مناسبی از شدت نور، برای انجام دقیق وظایف بصری ضروری است [همان].

فراتر از تأثیرات بصری، تحقیقات نشان می‌دهند که شدت نور دارای "اثرات غیر بصری" قابل توجهی بر انسان است. سطح روشنایی محیط می‌تواند بر حالات عاطفی، سطح خستگی و مهم‌تر از آن، بهره‌وری کاری تأثیر بگذارد. سطوح بهینه شدت نور می‌توانند بهره‌وری اداری را به طور قابل توجهی افزایش دهند، در حالی که سطوح بسیار بالا یا بسیار پایین می‌توانند اثرات منفی داشته باشند [همان].

اگرچه ممکن است تصور شود که سیستم‌های روشنایی باید در برابر کوچکترین نوسانات نور محیط (مانند عبور ابرها) واکنش نشان دهند، اما ادراک انسان دارای یک ویژگی به نام "تفاوت قابل تشخیص جزئی"[1] است. این بدان معناست که برای مقاصد روشنایی عمومی، مغز انسان قادر به تشخیص نوسانات جزئی (در حد ۲۰ تا ۳۰ لوکس) نیست. بنابراین، کنترل بیش از حد حساس می‌تواند منجر به نوسانات ناخواسته و آزاردهنده شود [همان].

با این حال، چالش اصلی در کنترل روشنایی دیود نورافشان ها، نوسانات محیطی نیست، بلکه ناپایداری خود دیود نورافشان ها است. یک چالش فنی اساسی این است که با افزایش دمای کاری دیود نورافشان (که در حین کار گرم می‌شود)، شار نوری[2] و در نتیجه شدت نور خروجی آن کاهش می‌یابد. این پدیده، که به "انحراف دمایی" معروف است، باعث می‌شود روشنایی یک لامپ پس از مدتی کار کردن، کمتر از زمان شروع آن باشد [همان].

دومین چالش فنی عمده، عدم یکنواختی تولید است. حتی در بین دیود نورافشان هایی که از یک نوع و یک خط تولید هستند، تفاوت‌های قابل توجهی در شار نوری خروجی وجود دارد. این عدم یکنواختی بر ثبات کیفی محصول نهایی تأثیر منفی می‌گذارد و باعث می‌شود دو لامپ که ظاهراً یکسان هستند، روشنایی متفاوتی تولید کنند [همان].

بنابراین، فناوری کنترل شدت نور ثابت برای غلبه بر این دو محدودیت فنی (اثر دما و عدم یکنواختی) ضروری است. این فناوری با دریافت بازخورد لحظه‌ای از یک سنسور نور، به‌طور مداوم جریان ارسالی به دیود نورافشان را تنظیم می‌کند تا اطمینان حاصل شود که خروجی نور، بدون توجه به دمای دیود نورافشان یا تغییرات ذاتی آن، دقیقاً در سطح مطلوب باقی می‌ماند [همان].

این سطح از دقت در کاربردهای خاصی حیاتی است. در حالی که تفاوت قابل تشخیص جزئی برای روشنایی عمومی مطرح است، در کاربردهای تصویربرداری یا شبیه‌سازهای صحنه (مانند سیستم‌های شبیه‌سازی موشکی)، کنترل دقیق و سخت‌گیرانه‌ای بر شدت نور مورد نیاز است که سیستم‌های کنترل باز قادر به تأمین آن نیستند [همان].

در نهایت، این فناوری در سیستم‌های روشنایی پاسخگو به نور روز کاربرد اساسی دارد. در این سیستم‌ها، هدف این نیست که صرفاً با تاریک شدن هوا چراغ روشن شود، بلکه هدف ادغام نور الکتریکی با نور طبیعی برای حفظ یک سطح شدت نور ثابت در تمام طول روز است. این کار ضمن صرفه‌جویی در مصرف انرژی، یک محیط بصری یکنواخت را برای ساکنین فراهم می‌کند [همان].

[1] Just Noticeable Difference - JND
[2] Luminous Flux

۵.۲. پیاده‌سازی کنترلر PID با آردوینو

ساده‌ترین شکل کنترل روشنایی، کنترل آستانه‌ای است. در این روش، که در بسیاری از پروژه‌های مقدماتی آردوینو دیده می‌شود، یک سنسور مقاومت وابسته به نور نور خورشید را می‌سنجد و اگر مقدار آن از یک آستانه مشخص کمتر شود، آردوینو یک رله را فعال کرده و چراغ را با ۱۰۰٪ توان روشن می‌کند. این روش یک کنترل حلقه باز و دودویی است و هیچ کنترلی بر کیفیت یا ثبات نور خروجی ندارد [۶].

برای دستیابی به کنترل دقیق شدت نور ثابت، به یک الگوریتم کنترل حلقه بسته نیاز است. متداول‌ترین و پایدارترین روش برای این کار، الگوریتم کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر[1] است. این الگوریتم به‌طور مداوم "خطا" یعنی تفاوت بین "مقدار مطلوب" و "مقدار واقعی" را اندازه‌گیری می‌کند و خروجی را برای به صفر رساندن این خطا تنظیم می‌نماید [۷].

پلتفرم آردوینو ابزاری ایده‌آل برای پیاده‌سازی کنترل PID است، زیرا کتابخانه PID استاندارد آردوینو پیچیدگی‌های ریاضی این الگوریتم را از دید برنامه‌نویس پنهان می‌کند. توسعه‌دهندگان می‌توانند به سادگی با تعریف متغیرهای ورودی، خروجی و نقطه تنظیم، و همچنین ضرایب[2]، یک کنترلر PID کامل را به سرعت پیاده‌سازی کنند [همان].

برای پیاده‌سازی این حلقه کنترل، آردوینو به دو بخش سخت‌افزاری اصلی نیاز دارد: یک واحد سنجش و یک واحد درایور. در واحد سنجش، به جای استفاده از سنسورهای دیجیتال گران‌قیمت (مانند Bh1750)، می‌توان از یک فتورزیستور ساده و ارزان‌قیمت استفاده کرد. اگرچه فتورزیستور دقت سنسور دیجیتال را ندارد، اما مزیت آن هزینه بسیار پایین و سرعت نمونه‌برداری بالاتر (به دلیل اتصال مستقیم به مبدل آنالوگ به دیجیتال) است که برای یک حلقه PID سریع، مناسب‌تر ارزیابی می‌شود [همان].

در سمت خروجی، آردوینو نمی‌تواند مستقیماً دیود نورافشان های پرقدرت را راه‌اندازی کند. بنابراین، آردوینو به یک واحد درایور دیود نورافشان نیاز دارد. در پژوهش [همان]، یک شیلد[3] اختصاصی برای آردوینو UNO با استفاده از چیپ درایور جریان ثابت HV9910B طراحی شده است. این شیلد، وظیفه تأمین جریان دقیق مورد نیاز دیود نورافشان ها را بر عهده دارد.

فرایند کامل حلقه کنترل PID به این صورت عمل می‌کند: ۱) نقطه تنظیم (مثلاً معادل ۵۰۰ لوکس) در کد آردوینو تعریف می‌شود. ۲) ورودی، که ولتاژ بازگشتی از فتورزیستور (متصل به پین آنالوگ A4) است، به عنوان نماینده شدت نور فعلی خوانده می‌شود. ۳) کتابخانه PID خطا (تفاوت بین نقطه تنظیم و ورودی) را محاسبه می‌کند [همان].

پس از محاسبه خطا، الگوریتم PID یک خروجی (عددی بین ۰ تا ۲۵۵) را محاسبه می‌کند. این عدد خروجی، مستقیماً به تابع analogWrite() آردوینو ارسال می‌شود تا یک سیگنال مدولاسیون عرض پالس روی یک پین دیجیتال (مثلاً پین ۳) تولید کند. این سیگنال مدولاسیون عرض پالس به ورودی دیمینگ شیلد درایور HV9910B اعمال می‌شود و درایور، جریان ارسالی به دیود نورافشان ها را متناسب با آن تنظیم می‌کند [همان].

مرحله نهایی و حیاتی در این پیاده‌سازی، تنظیم ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر است. اگر این ضرایب به درستی انتخاب نشوند، سیستم یا بسیار کند واکنش نشان می‌دهد یا دچار نوسان شده و نور چراغ شروع به چشمک زدن می‌کند. این ضرایب باید از طریق آزمایش‌های مکرر به دست آیند تا در نهایت یک خروجی نوری پایدار و یکنواخت حاصل شود، که قادر است نور خروجی را در یک سطح ثابت نگه دارد و نوسانات ناشی از دما یا نور محیط را جبران کند [همان].

[1] PID
[2] KP, Ki, KD
[3] Expansion Board

۶. چالش‌ها، محدودیت‌ها و چشم‌انداز آینده

با وجود اینکه پلتفرم آردوینو توسعه سیستم‌های روشنایی هوشمند را به طور قابل توجهی تسریع و دموکراتیزه کرده است، گذار از نمونه‌های اولیه آزمایشگاهی به راه‌حل‌های قوی، مقیاس‌پذیر و امن در دنیای واقعی، با چالش‌های فنی، عملیاتی و امنیتی متعددی روبرو است. این بخش به بررسی محدودیت‌های شناسایی‌شده در پیاده‌سازی‌های مبتنی بر آردوینو و همچنین چشم‌انداز آینده‌ای که این فناوری‌ها به سوی آن در حرکت هستند، می‌پردازد.

۶.۱ چالش‌های فنی و محدودیت‌های عملکردی

یکی از اساسی‌ترین محدودیت‌های پلتفرم آردوینو، به ویژه در مدل‌های پایه مانند UNO، قدرت پردازشی پایین و ظرفیت حافظه محدود آن است [۲]. اگرچه این مشخصات برای کنترل‌های ساده سنسور-رله کافی است، اما هنگام تلاش برای پیاده‌سازی پروژه‌های بزرگ یا الگوریتم‌های پیچیده، به یک گلوگاه تبدیل می‌شود. این محدودیت‌ها می‌توانند سرعت، کارایی و توانایی ذخیره‌سازی داده‌های ورودی و خروجی سیستم را به شدت کاهش دهند [همان].

این کمبود حافظه و توان پردازشی، به‌ویژه در سیستم‌های نیازمند پردازش بلادرنگ، چالش‌برانگیز است. برای مثال، در سیستم‌های روشنایی معابر که باید داده‌های چندین سنسور (سنسور حرکت مادون قرمز ,مقاومت وابسته به نور) را مدیریت کرده و همزمان با یک شبکه ارتباطی (مانند LORAWAN) در ارتباط باشند [۳]، میکروکنترلر باید قادر به مدیریت همزمان وظایف بدون تأخیر قابل توجه باشد.

یک چالش فنی بسیار خاص، در پیاده‌سازی کنترلرهای PID برای حفظ شدت نور ثابت، نهفته است. همانطور که در [۷] اشاره شده است، تنظیم ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر یک فرآیند پیچیده و تکراری است. اگر این ضرایب به درستی انتخاب نشوند، سیستم به جای پایداری، دچار نوسان می‌شود که در عمل به صورت چشمک زدن نور دیود نورافشان ظاهر می‌شود و این امر برای کاربر نهایی کاملاً غیرقابل قبول است [همان].

دقت و کالیبراسیون سنسورها نیز یک چالش عملی مداوم است. در سیستم‌هایی که به سنسورهای آنالوگ مانند فتورزیستورها متکی هستند [۶]، کالیبراسیون دقیق برای تبدیل مقادیر خام آنالوگ به واحدهای معنی‌دار (مانند لوکس) ضروری است. بدون کالیبراسیون، سیستم ممکن است در تشخیص دقیق غروب یا سطوح نوری محیط دچار خطا شود و چراغ‌ها را زودتر از موعد روشن یا دیرتر خاموش کند، که این امر هدف اصلی صرفه‌جویی در انرژی را تضعیف می‌کند [۷].

در فناوری‌های نوظهور مانند وفاداری نوری ، چالش اصلی محدودیت برد فیزیکی است. در نمونه اولیه مبتنی بر آردوینو [۵]، حداکثر فاصله ارتباطی موفق تنها ۴۱ سانتی‌متر گزارش شده است. این برد بسیار کوتاه، استفاده عملی از این فناوری را برای اتوماسیون خانگی در یک اتاق واقعی، غیرممکن می‌سازد و نشان می‌دهد که برای غلبه بر این محدودیت، به تحقیقات بیشتر در زمینه استفاده از دیود نورافشان های پرقدرت‌تر یا تکنیک‌های مدولاسیون پیشرفته‌تر نیاز است.

چالش "خط دید مستقیم" در سیستم‌های مبتنی بر وفاداری نوری [۵] و همچنین در سیستم‌های مبتنی بر سنسورهای سنسور حرکت مادون قرمز [۱] یک محدودیت عملکردی است. موانع فیزیکی می‌توانند به راحتی سیگنال نوری وفاداری نوری را مسدود کنند یا از تشخیص صحیح حرکت توسط سنسور حرکت مادون قرمز جلوگیری نمایند، که این امر پایداری عملکرد سیستم را در محیط‌های واقعی و پویا به چالش می‌کشد.

پیچیدگی یکپارچه‌سازی سخت‌افزاری نیز با افزایش مقیاس پروژه افزایش می‌یابد. اتصال همزمان ماژول‌های وای-فای[۹]، ماژول‌های LORAWAN [۳]، درایورهای دیود نورافشان پرقدرت [۷] و سنسورهای متعدد، نیازمند مدیریت دقیق منابع تغذیه، تداخل پین‌ها و سازگاری پروتکل‌ها است که فراتر از توانایی یک توسعه‌دهنده مبتدی است.

در نهایت، مقاومت در برابر شرایط محیطی برای سیستم‌های فضای باز (مانند روشنایی معابر) یک چالش مهندسی اساسی است. بردهای آردوینو و سنسورها باید در محفظه‌هایی قرار گیرند که در برابر رطوبت، گرد و غبار و دماهای شدید مقاوم باشند. اطمینان از پایداری منبع تغذیه، به‌ویژه در سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی، برای عملکرد مداوم در شب‌های ابری یا زمستان، یک چالش مهم دیگر است [۱۰,۳].

۶.۲. ملاحظات امنیتی و پایداری شبکه

با اتصال سیستم‌های روشنایی آردوینو به اینترنت اشیا، این سیستم‌ها بلافاصله در معرض مجموعه‌ای از آسیب‌پذیری‌های امنیتی قرار می‌گیرند [۲]. هر دستگاه متصل به اینترنت، از جمله یک لامپ هوشمند ساده مبتنی بر وای-فای[۹]، به یک نقطه ورود بالقوه برای حملات سایبری تبدیل می‌شود.

یکی از اصلی‌ترین آسیب‌پذیری‌های شناسایی‌شده، دسترسی غیرمجاز است. اگر دستگاه‌های آردوینو (مانند ماژول‌های وای-فای) با تنظیمات پیش‌فرض یا رمزهای عبور ضعیف پیکربندی شوند، هکرها می‌توانند به راحتی کنترل سیستم روشنایی را در دست بگیرند [همان]. این امر می‌تواند از یک مزاحمت ساده (خاموش و روشن کردن چراغ‌ها) تا اقدامات خطرناک‌تر (خاموش کردن تمام چراغ‌های یک معبر عمومی در شب) متغیر باشد.

نگرانی دوم، حریم خصوصی داده‌ها[1] است. سیستم‌های روشنایی هوشمند، به‌ویژه در داخل خانه‌ها، داده‌های حساس مربوط به الگوهای حضور و فعالیت ساکنین را (از طریق سنسورهای حرکت مادون قرمز یا صوتی) جمع‌آوری می‌کنند [۲,۴]. در صورت نفوذ به سیستم، این داده‌ها می‌توانند به سرقت رفته و مورد سوءاستفاده قرار گیرند و امنیت فیزیکی ساکنین را به خطر بیندازند [۲].

خطر بدافزار نیز یک تهدید جدی برای دستگاه‌های اینترنت اشیا متصل به اینترنت است. آردوینوهایی که به اینترنت متصل هستند، می‌توانند توسط ویروس‌ها یا بدافزارهایی که برای ایجاد شبکه‌های بوت نت طراحی شده‌اند، آلوده شوند. این بدافزارها می‌توانند عملکرد دستگاه را مختل کرده، داده‌ها را به سرقت ببرند یا از دستگاه برای حمله به سایر نقاط شبکه استفاده کنند [همان].

امنیت سیستم‌های مبتنی بر وای-فای [۹] به شدت به امنیت خود شبکه وای-فای خانگی یا سازمانی وابسته است. استفاده از پروتکل‌های رمزنگاری قوی (مانند WPA3) و جداسازی دستگاه‌های اینترنت اشیا در یک شبکه مهمان برای کاهش خطرات ضروری است، اما این تنظیمات اغلب فراتر از دانش فنی کاربر عادی است.

در مقیاس شهری، شبکه‌های LORAWAN [۳] دارای مکانیزم‌های رمزنگاری داخلی (مانند AES-128) هستند که امنیت را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. با این حال، چالش در اینجا مدیریت کلید است. اطمینان از اینکه کلیدهای رمزنگاری هر گره آردوینو (هر چراغ) به صورت ایمن ذخیره شده و منتقل می‌شوند، در یک شبکه با هزاران گره، یک چالش عملیاتی بزرگ است.

در مقابل، فناوری وفاداری نوری یک مزیت امنیتی ذاتی ارائه می‌دهد. از آنجایی که وفاداری نوری از نور مرئی استفاده می‌کند و نور از دیوارها عبور نمی‌کند، استراق سمع سیگنال از راه دور[2] (مانند آنچه در وای-فای رایج است) تقریباً غیرممکن است. این ویژگی، وفاداری نوری را به گزینه‌ای امن‌تر برای محیط‌های داخلی با داده‌های حساس تبدیل می‌کند، اگرچه چالش‌های برد فیزیکی آن همچنان پابرجاست [۵].

[1] Data Privacy Concerns
[2] Eavesdropping

در نهایت، امنیت فیزیکی دستگاه‌های تعبیه‌شده در فضاهای عمومی (مانند روشنایی معابر) نباید نادیده گرفته شود. بردهای آردوینو و سنسورها باید در برابر خرابکاری فیزیکی محافظت شوند. دسترسی آسان به پورت‌های برنامه‌نویسی دستگاه یا سیم‌کشی آن می‌تواند به مهاجمان اجازه دهد تا کل سیستم را از کار بیندازند [۱۰].

۶.۳. چشم‌انداز آینده و مسیرهای تحقیقاتی

با وجود چالش‌ها، آینده سیستم‌های روشنایی مبتنی بر آردوینو بسیار امیدوارکننده به نظر می‌رسد و انتظار می‌رود تحقیقات بر روی بهبود سخت‌افزار، ارتباطات و هوشمندی سیستم متمرکز شود [۲]. جامعه کاربری فعال آردوینو به طور مداوم در حال نوآوری و بهبود قابلیت‌های این پلتفرم است.

اولین پیشرفت مورد انتظار، ظهور بردهای آردوینو یا سازگار با آردوینو با قدرت پردازشی و حافظه بهتر است [همان]. این ارتقاء سخت‌افزاری، پلتفرم را قادر می‌سازد تا الگوریتم‌های پیچیده‌تر، سیستم‌عامل‌های بلادرنگ[1] و حتی مدل‌های یادگیری ماشین در لبه[2] را اجرا کند [۱]. این امر به سیستم‌های روشنایی اجازه می‌دهد تا تصمیمات هوشمندانه‌تری را به صورت محلی و بدون وابستگی دائمی به اینترنت اتخاذ کنند.

در حوزه ارتباطات، یکپارچه‌سازی با شبکه‌های پیشرفته مانند LORA به عنوان یک روند کلیدی شناخته شده است [۲]. استفاده از این فناوری، که قبلاً در [۳] با موفقیت آزمایش شده است، کاربردهای اینترنت اشیا آردوینو را در مقیاس‌های بزرگ شهری به طور چشمگیری گسترش خواهد داد.

استقلال انرژی یک هدف مهم در آینده است. سیستم‌های روشنایی، به‌ویژه در معابر، به طور فزاینده‌ای با پنل‌های خورشیدی یکپارچه خواهند شد [۱]. این امر نه تنها سیستم را کاملاً سبز و پایدار می‌کند، بلکه نیاز به کابل‌کشی برق پرهزینه در مناطق دورافتاده را نیز برطرف می‌سازد. تحقیقات آینده بر روی بهینه‌سازی الگوریتم‌های مدیریت شارژ باتری توسط آردوینو متمرکز خواهد بود.

در حوزه سنسورها، آینده فراتر از مقاومت وابسته به نور و سنسور حرکت مادون قرمز خواهد بود. پیشنهادهایی برای افزودن سنسورهای مادون قرمز پیشرفته‌تر یا سنسورهای اولتراسونیک برای تشخیص دقیق‌تر افراد و اشیاء و جلوگیری از هشدارهای کاذب مطرح شده است [۴].

جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها نقش مهم‌تری ایفا خواهد کرد. سیستم‌های آینده نه تنها به صورت واکنشی عمل می‌کنند، بلکه با ثبت داده‌های مربوط به الگوهای ترافیک، آلودگی هوا [۱] و شرایط آب و هوایی، به مدیران شهری اجازه می‌دهند تا تصمیمات آگاهانه‌تری در مورد مدیریت انرژی و برنامه‌ریزی شهری اتخاذ کنند.

چندکارکردی شدن زیرساخت‌های روشنایی، چشم‌انداز نهایی است. تیرهای چراغ برق هوشمند آینده، که توسط کنترلرهای پیشرفته (مانند آردوینوهای قوی‌تر) مدیریت می‌شوند، میزبان نقاط شارژ وسایل نقلیه الکتریکی، نقاط اتصال وای-فای عمومی، دوربین‌های نظارتی و سیستم‌های هشدار اضطراری (مانند تشخیص آتش یا گاز) خواهند بود [همان].

در نهایت، پلتفرم آردوینو به نقش حیاتی خود به عنوان یک ابزار آموزشی کلیدی در آموزش علوم، فناوری، مهندسی و ریاضیات ادامه خواهد داد. سادگی و قدرت آن، نسل‌های آینده مهندسان و نوآورانی را که سیستم‌های هوشمند فردای پایدار را طراحی خواهند کرد، توانمند می‌سازد [۲].

[1] RTOS
[2] Edge Computing

۷. نتیجه‌گیری

این مقاله مروری به بررسی و تحلیل جامع نقش پلتفرم آردوینو به عنوان یک توانمندساز کلیدی در تحول سیستم‌های روشنایی سنتی به راه‌حل‌های هوشمند و بهینه‌ساز انرژی پرداخت. همانطور که در بخش‌های پیشین نشان داده شد، نیاز مبرم به کاهش مصرف انرژی در زیرساخت‌های شهری و خانگی، آردوینو را به دلیل دسترسی‌پذیری، هزینه پایین، سادگی استفاده و ماهیت متن‌باز، به انتخابی ایده‌آل برای نمونه‌سازی و پیاده‌سازی این سیستم‌ها تبدیل کرده است.

یافته‌های این بررسی نشان می‌دهد که آردوینو در هوشمندسازی روشنایی معابر و فضاهای بزرگ بسیار موفق عمل کرده است. با ادغام سنسورهای مقاومت وابسته به نور برای تشخیص نور محیط و سنسورهای حرکت مادون قرمز برای تشخیص حضور وسایل نقلیه یا عابرین، سیستم‌های مبتنی بر آردوینو قادرند از کنترل دودویی (روشن/خاموش) فراتر رفته و به کنترل دینامیک شدت نور دست یابند. این قابلیت، که در آن چراغ‌ها تنها در صورت نیاز به روشنایی کامل می‌رسند، منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی می‌شود.

علاوه بر کنترل محلی، ادغام آردوینو با پروتکل‌های ارتباطی دوربرد مانند LORAWAN، قابلیت‌های سیستم را به سطح مدیریت شهری ارتقا داده است. این معماری اینترنت اشیا، امکان نظارت متمرکز، مدیریت از راه دور و مهم‌تر از آن، گزارش‌دهی خودکار خطاها را فراهم می‌آورد. این قابلیت، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری را به شدت کاهش می‌دهد و پایداری زیرساخت روشنایی شهری را تضمین می‌کند.

در حوزه روشنایی داخلی و اتوماسیون خانگی، آردوینو انعطاف‌پذیری خود را در تطبیق با نیازهای کاربرمحور نشان داده است. این بررسی، پیاده‌سازی سیستم‌های کنترل روشنایی مبتنی بر محرک‌های صوتی در کریدورها و همچنین سیستم‌های کنترل بی‌سیم از طریق وای-فای و اپلیکیشن‌های موبایل و بلوتوث برای کنترل‌های محلی را شناسایی کرد. این راه‌حل‌ها بر افزایش راحتی کاربر و بهینه‌سازی مصرف انرژی در فضاهای شخصی متمرکز هستند.

این مرور همچنین نشان داد که نقش آردوینو فراتر از کنترل‌های واکنشی ساده است. در کاربردهای پیشرفته، آردوینو به عنوان هسته کنترلرهای حلقه بسته برای مدیریت دقیق شدت نور به کار رفته است. استفاده از الگوریتم‌های PID برای جبران نوسانات ناشی از دما یا ولتاژ و حفظ سطح نور ثابت، نشان‌دهنده بلوغ این پلتفرم در کاربردهای حساس است همچنین، آردوینو به عنوان بستری برای آزمایش فناوری‌های نوظهور مانند وفاداری نوری ، (ارتباط از طریق نور مرئی) برای اتوماسیون خانگی، مورد استفاده قرار گرفته است.

با وجود این موفقیت‌ها، این بررسی چالش‌های مشترکی را نیز در میان مقالات شناسایی کرد. محدودیت‌های سخت‌افزاری آردوینو، به‌ویژه قدرت پردازشی و حافظه در مدل‌های پایه، یک مانع در پیاده‌سازی الگوریتم‌های بسیار پیچیده یا مدیریت شبکه‌های بزرگ است علاوه بر این، آسیب‌پذیری‌های امنیتی در سیستم‌های متصل به اینترنت اشیا و چالش‌های عملیاتی مانند برد محدود در فناوری‌های نوظهور، نیازمند توجه و تحقیقات بیشتری هستند.

چشم‌انداز آینده، همانطور که در بخش چالش‌ها اشاره شد، به سمت سیستم‌های یکپارچه‌تر و هوشمندتر در حرکت است. انتظار می‌رود تحقیقات آینده بر روی استقلال انرژی سیستم‌ها از طریق ادغام با پنل‌های خورشیدی و همچنین چندکارکردی شدن زیرساخت‌های روشنایی متمرکز شوند. تیرهای چراغ برق هوشمند آینده ممکن است میزبان حسگرهای محیطی، نقاط شارژ وسیله نقلیه الکتریکی و هاب‌های ارتباطی باشند.

در نهایت، این مقاله مروری تأیید می‌کند که آردوینو به عنوان یک کاتالیزور قدرتمند در دموکراتیزه کردن فناوری روشنایی هوشمند عمل کرده است. این پلتفرم، شکاف بین نمونه‌سازی‌های آزمایشگاهی و پیاده‌سازی‌های عملی در دنیای

واقعی را با موفقیت پر کرده و به عنوان یک ابزار آموزشی و توسعه‌ای حیاتی، به توانمندسازی نسل جدیدی از مهندسان و نوآوران در مسیر دستیابی به شهرهای هوشمند پایدار و بهینه‌ساز انرژی ادامه خواهد داد.

۸. مراجع

1. Yadav, S., Jaiswar, A., Joshi, P., Goud, R., & Prasad, S. (2025). EMBEDDED SYSTEM FOR AUTOMATED STREET LIGHTING USING ARDUINO UNO. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 7(4), 9717–97
2. Redhwi, I., & Fallatah, A. (2024). The Versatile World of Arduino Boards: A Comprehensive Review. JOJ Material Sciences, 9(1), 001–004.

3. Jabbar, W. A., Sa'ad, K. H., Hassan, S., Al-Jazari, S. S., & Nordin, M. I. (2024). Optimising urban lighting efficiency with IoT and LoRaWAN integration in smart street lighting systems. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 36(3), 101738.

4. Jiang, F. (2024). Simple Light-sensitive and Voice-controlled Lighting System based on Arduino. Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Learning and Automation, 63–68.

5. Gwani, M. M., Gimba, A. M., Kunya, M. M., Amos, J. N., & Mkohol, J. U. (2024). Light Fidelity-based Home Automation System with Arduino. Asian Journal of Research and Reviews in Physics, 8(1), 47–57.

6. Islam, M. S., Mia, M. F., Rabbi, M. F., & Rabbi, K. F. (2024). Arduino Based Sun-Light Detection. Advanced Materials Research, 1205, 19–27.

7. Gao, Y., & Han, D. (2024). Study on Illuminance Control based on Arduino Method. Journal of Physics: Conference Series, 2735(1), 012002.

۸. ویژه، ع. (۲۰۲۴). هوشمند سازی چراغ های ساختمان با استفاده از برد آردوینو و زبان برنامه نویسی C++ (پایان‌نامه کارشناسی ارشد). دانشگاه جامع علمی کاربردی.

9. Wiranto, A. (2024). IOT Smart Lamp Based on Arduino Using Internet Network. International Journal of Engineering, Science and Computer, 3(2), 67-73

10. Mansor, M. N. B. (2022). SMART STREETLIGHT SYSTEM (Doctoral dissertation, Universiti Teknikal Malaysia Melaka).