فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و سوم، شماره ۹۲، بهار ۱۴۰۲، ص. ۳۷-۲۵

طراحی، تولید و به‌کارگیری چراغ‌های راهنمایی فوق کم‌مصرف

محمدباقر شاهقلیان (مسئول مکاتبات)، مهندسی برق-هوش ماشین و رباتیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

E-mail: m_shahgholian@sbu.ac.ir

نفیسه محمودآبادی، دانشجوی دکتری، مرکز کنترل ترافیک و نظارت تصویری شهرداری اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

در این مقاله طراحی جدیدی برای چراغ‌های راهنمایی ارائه گردیده به‌گونه‌ای که م صرف هر چراغ با همان میزان رو شنایی به شدت کاهش می‌یابد. امروزه با توسعه‌ی شهرنشینی میزان مصرف انرژی نیز افزایش یافته است. احداث نیروگاه‌های جدید جهت تأمین انرژی نه‌تنها پرهزینه است، افزایش آلودگی هوا را به همراه دارد. می‌توان گفت تنها راه‌حل ممکن استفاده از فناوری‌های جدید درزمینه‌ی مصرف‌کننده‌های انرژی است به‌گونه‌ای که با همان کارایی قبلی مصرف آن‌ها به‌شدت کاهش یابد. در حال حاضر در تقاطع‌ها از چراغ‌هایی ا ستفاده می شود که توان هر یک به‌طور میانگین ۱۰ وات ا ست. این میزان به این معنا ست که م صرف رو شنایی یک تقاطع به‌طور میانگین برابر ۳۲۰ وات ا ست. البته م صرف زیاد د ستگاه‌های کنترل آنالوگ را باید به این میزان ا ضافه کرد. در این مقاله چراغ‌های راهنمایی فوق کم‌مصرف طراحی و تولید شده است که توان آن‌ها به‌طور میانگین ۱٫۵ وات است. در حقیقت چراغ‌های همان تقاطع قبلی ۴۸ وات‌ساعت انرژی مصرف می‌کند. با چراغ‌های جدید نه‌تنها مصرف انرژی ۸۵٪ کاهش یافته، با در نظر گرفتن م صرف د ستگاه کنترل دیجیتال (۸ وات) و فرض اینکه هر شبانه‌روز دارای ۱۲ ساعت رو شنایی ا ست، با به‌کارگیری دو پنل خورشیدی ۶۰ وات می‌توان تقاطع را مستقل از برق شهری کرد.

واژه‌های کلیدی: چراغ راهنمایی، مصرف انرژی، تقاطع چراغ‌دار

۱. مقدمه

در یک LED[۱] وقتی جریان الکتریکی از یک اتصال p–n عبور می‌کند، نور تابش می‌شود. به این پدیده الکترولومینسانس گفته می‌شود. در دیودهای سیلیسیم و ژرمانیم الکترون‌ها انرژی خود را به شکل گرما دفع می‌کنند، اما در نیمه‌رساناهای گالیم آرسنید فسفید (GaAsP) و گالیم فسفید (GaP)، الکترون‌ها با انتشار فوتون انرژی خود را دفع می‌کنند. اگر نیمه‌رسانا شفاف باشد، اتصال تبدیل به یک منبع نور، یا دیود نورگسیل می‌گردد. الکترولومینسانس به‌عنوان یک پدیده در سال ۱۹۰۷ توسط آزمایشگر انگلیسی اچ. جی. روند[۲] کشف شد. اولگ لوسِف[۳]، مخترع روسی، اختراع اولین LED را در سال ۱۹۲۷ خبر داد. در اکتبر ۱۹۶۲، تگزاس اینسترومنتس[۴] اولین محصول تجاری LED یعنی (SNX-100) را معرفی کرد که از کریستال خالص گالیم آرسنید برای تولید نور ۸۹۰ نانومتر استفاده می‌کرد. اولین LEDهای تجاری با طول‌موج مرئی معمولاً به‌عنوان جایگزین لامپ‌های رشته‌ای و لامپ‌های نئون و در نمایشگرهای هفت بخشی، ابتدا در تجهیزات گران‌قیمت مانند تجهیزات آزمایشگاهی و الکترونیکی و سپس در وسایل خانگی مانند ماشین‌حساب، تلویزیون، رادیو، تلفن و همچنین ساعت استفاده شدند. تا سال ۱۹۶۸، LEDهای مرئی و فروسرخ به میزان ۲۰۰ دلار در هر واحد قیمت داشتند که بسیار گران بودند و ازاین‌رو کاربرد عملی کمی داشتند. در اواخر دهه ۱۹۸۰، موفقیت‌های کلیدی کسب‌شده در رشد برآرایی گالیم نیترید (GaN) و آلایش نوع-p، باعث آغاز عصر جدیدی از افزاره‌های نوری-الکترونیکی مبتنی بر نیترید گالیم شد. با استفاده از این پایه، تئودور موستاکاس[۵] در دانشگاه بوستون روشی را برای تولید LEDهای آبی با روشنایی بالا با استفاده از یک فرایند دومرحله‌ای جدید در سال ۱۹۹۱ ثبت اختراع کرد. دو سال بعد، یعنی در سال ۱۹۹۳، شوجی ناکامورا[۶] از شرکت نیچیا با استفاده از فرایندی برای رشد گالیم نیترید، LEDهای آبی با روشنایی بالا را اختراع کرد. شدت نور و راندمان LEDهای آبی و نزدیک به فرابنفش افزایش یافت و قیمت آن‌ها کاهش پیدا کرد. این امر منجر به استفاده از LEDهای پرقدرت برای روشنایی محیط و جایگزینی آن‌ها با لامپ‌های رشته‌ای و مهتابی گردید. امروزه LEDهای موجود در بازار تا ۲۲۳ لومن بر وات بهره‌وری دارند. ازآنجایی‌که LEDها مزایای زیادی نسبت به منابع نور سنتی دارند، مانند راندمان نوری بالا، اندازه کوچک و طول عمر طولانی، اعتقاد بر این است که در آینده جایگزین لامپ‌های رشته‌ای و فلورسنت معمولی برای روشنایی عمومی خواهند شد. هزینه جایگزینی لامپ‌های فلورسنت موجود با لامپ‌های LED (شامل تمام هزینه‌های حذف و نصب مجدد) برای ساختمان‌های انرژی‌بر مانند مراکز تجاری و دفاتر فضای باز با توجه به کاهش مصرف می‌تواند زیر پنج سال جبران شود. با جایگزین کردن روشنایی‌های موجود با چراغ‌های LED در انرژی مصرفی سالانه فعلی ایالات‌متحده تقریباً ۳۰ تراوات ساعت معادل ۳ میلیارد دلار در انرژی و هزینه صرفه‌جویی می‌شود. همین میزان صرفه‌جویی را می‌توان از به‌کارگیری LED در اروپا انتظار داشت. انتظار می‌رود مصرف کل انرژی روشنایی طی دو دهه آینده افزایش یابد. بااین‌حال اگر تا سال ۲۰۳۵ اهداف وزارت انرژی ایالات‌متحده برآورده شود، روشنایی LED می‌تواند ۵۰۰ تراوات ساعت در سال صرفه‌جویی کند. این مقدار انرژی معادل ۵۰ میلیارد دلار در سال و ۵٪ از کل بودجه انرژی آمریکا می‌شود. این میزان در سراسر جهان ۳ تا ۵ برابر بیشتر خواهد شد. یکی دیگر از مزایای استفاده از LEDها، چرخه عمر[۷] است. بررسی-های DOE[۸] نشان داد که از سال ۲۰۱۳ محصولات LED چرخه مصرف انرژی، ازجمله انرژی مصرف‌شده در طول تولید، حمل‌ونقل و همچنین میزان استفاده از مواد اولیه را کاهش داده-اند. بر اساس مطالعات اولیه در چرخه عمر LEDها، استفاده از این محصولات منجر به کاهش ۵۰٪ مصرف انرژی در ۵ سال گذشته شده است. مطالعات DOE همچنین نشان داد که چراغ-های LED میزان روشنایی را بدون استفاده از مقادیر زیادی مواد سمی یا کمیاب حفظ می‌کند. محصولات روشنایی LED نیازی

به جیوه یا سرب نداشته و از مواد کمیاب بسیار مؤثرتر از نورهای فلورسنت استفاده می‌کنند.

۲. ادبیات پژوهش

اولین چراغ راهنمایی نسل جدید توسط ویلیام پاتس[۹] مأمور پلیس راهنمایی و رانندگی در سال ۱۹۲۰ ساخته شد. او این چراغ را با الهام از چراغ کنترل خط ریل راه‌آهن که از گذشته به چراغ‌های برقی خودکار مجهز شده بودند، طراحی کرد. این فانوس با سه چراغ‌قرمز، نارنجی و سبز در یک تقاطع در شهر دیترویت نصب شد. با آزمایش موفقیت‌آمیز این چراغ، ظرف کمتر از یک سال ۱۵ تقاطع در این شهر به چراغ راهنمایی مجهز شدند. از آن تاریخ به بعد پیشرفت‌های بسیاری در حوزه طراحی و ساخت و مدیریت چراغ‌های راهنمایی به دست آمده است و امروزه چراغ‌های راهنمایی ابزار اصلی کنترل و مدیریت تقاطع‌های مهم هستند. چراغ‌های راهنمایی در تقاطع‌هایی نصب می‌شوند که حجم زیاد ترافیک جلوی استفاده‌ی کارا و امن از تقاطع را بگیرد. کنترل چراغ‌های راهنمایی (TSC[۱۰]) به‌طور مرسوم به‌عنوان مؤثرترین روش جهت بهبود عملکرد شبکه‌ی ترافیک خیابانی شناخته می‌شود. به‌طورکلی برنامه‌های مربوط به زمان‌بندی چراغ دارای سه خروجی طول چرخه[۱۱]، طول قطعه[۱۲] و آفست[۱۳] است. هر چرخه درواقع یک دور تغییر کامل رنگ چراغ‌های راهنمایی مربوط به یک تقاطع است. هر قطعه طول زمانی است که به هر فاز در چرخه اختصاص داده می‌شود. آفست نیز بازه‌ی زمانی میان آغاز زمان چراغ سبز میان یک تقاطع و تقاطع‌های اطراف آن است که تلاش می‌کند حداقل تأخیر را هنگام عبور گروهی خودروها از تقاطع برای آن‌ها ایجاد نماید. چراغ‌های راهنمایی درواقع جریان ترافیک را توسط زمان‌های اختصاص داده‌شده به هر فاز در چرخه و تنظیم زمان آفست کنترل می‌کنند.

در چراغ‌های راهنمایی و رانندگی، طول عمر، ضریب اطمینان روشنایی، درخشندگی بالا و دید در روز اهمیت زیادی دارند و به همین علت LEDها برای این منظور بسیار مناسب‌اند. در حال حاضر چراغ‌های LED در بسیاری از تقاطع‌های شهرهای بزرگ نصب و بهره‌برداری شده‌اند. علی‌رغم تغییر فناوری از لامپ‌های فلورسنت به LED هنوز توان مصرفی به‌اندازه کافی کاهش نیافته است. میانگین توان مصرفی چراغ‌های موجود ۱۰ وات است. به عبارتی چراغ‌های یک تقاطع (شامل چراغ‌های مدیریت تردد خودرویی و عابر پیاده) مانند وحید–رودکی شهر اصفهان درمجموع ۳۲۰ وات است. عوامل مصرف زیاد این چراغ‌ها عبارت‌اند از:

۱- عدم تنظیم بهینه نقطه کار: سطح ولتاژ خروجی مبدل‌های AC به DC به‌گونه‌ای است که تلفات مقاومتی در این چراغ-ها بسیار زیاد است.

۲- وابستگی دمایی: دمای چراغ‌ها پس از مدتی کار کردن بالا رفته و در ادامه توان مصرفی هر چراغ که ۱۰ وات بود تا ۱۲ وات زیاد می‌شود.

۳- استفاده از مبدل AC به DC: با توجه به اینکه دستگاه‌های کنترل تقاطع قدیمی است، مدار قدرت این دستگاه‌ها برق شهری است؛ لذا پشت هر چراغ مبدل AC به DC قرار داده شده که خود یکی از عوامل اتلاف انرژی است.

از طرف دیگر کاهش توان الکتریکی استفاده از منابع برق تجدید پذیر را تسهیل می‌کند. فناوری چراغ‌های LED و فتوولتائیک نرخ توسعه بالایی داشته و چشم‌انداز قابل‌توجهی در مورد کاهش هزینه دارند. این دو فناوری با محدوده ولتاژ معمولاً ۱۲ تا ۴۸ ولت DC کار می‌کنند. همچنین می‌توان در این زمینه از کنترل-کننده‌های بی‌سیم و اینترنت اشیاء بهره برده و راه‌حل‌هایی یکپارچه جهت مدیریت عملکرد روشنایی چراغ‌های تقاطع ارائه داد. پیش‌بینی می‌شود این فناوری‌ها تا ۱۰ سال آینده سیستم‌های روشنایی را به‌طور اساسی تحت تأثیر قرار دهد.

علاوه بر توان مصرفی چراغ‌های موجود نقاط ضعف دیگری نیز در طراحی دارند.

۱- وابستگی عملکرد LEDها به یکدیگر: در این چراغ‌ها LEDها به‌صورت سری با یکدیگر قرار داده شده‌اند. در این

طراحی با سوختن یک LED مابقی LEDهای سری نیز خاموش می‌شوند. جهت جلوگیری از بروز این اتفاق هر سه LED با یک دیود زنر موازی شده است.

۲- هزینه تولید: قطعات مربوط به مبدل و همچنین قطعات مربوط به اصلاح عملکرد LEDها همگی غیرضروری بوده و با اصلاح طراحی می‌توان آن‌ها را حذف کرد.

۳- هزینه تعمیر و نگهداری: مطابق [18] علت خاموشی چراغ‌های LED در ۷۳٪ مواقع منابع تغذیه هستند. در صورت حذف این مبدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که میزان خرابی نیز ۷۰٪ کاهش می‌یابد.

تلفات زیاد، هزینه‌ی اولیه و عدم امکان به‌کارگیری منابع تجدید پذیر از عوامل ناکارآمدی چراغ‌های LED موجود در تقاطع هستند. در این مقاله طراحی نوینی برای چراغ‌های راهنمایی LED معرفی‌شده، به‌گونه‌ای که با همان شدت روشنایی، مصرف تقاطع تا ۸۵٪ کاهش یافته، هزینه‌ی اولیه سخت‌افزار الکتریکی چراغ ٤۰٪ کمتر شده، وابستگی میان LEDها از بین رفته و استقلال دمایی تا حد امکان ایجاد شده است. همچنین امکان بهره‌گیری از منابع تجدید پذیر فراهم گشته است.

در ادامه ابتدا توضیحاتی راجع به چراغ‌های LED فوق کم-مصرف بیان گشته است. در این قسمت ضمن بیان شاخص‌های تأثیرگذار در شدت روشنایی و بازدهی چراغ‌ها، روش ایجاد پایستگی جریان و ولتاژ توضیح داده‌شده، در ادامه نحوه‌ی تعیین سطح ولتاژ مدار قدرت مطرح گشته است. در انتها چگونگی قرار دادن LEDها (با در نظر گرفتن قیود لازم) در چراغ راهنمایی ایراد گردیده است. در بخش ٤ نتایج پیاده‌سازی و بهره‌برداری چراغ‌های راهنمایی فوق کم‌مصرف در تقاطع بیان شده است. در این بخش ابتدا میزان مصرف چراغ‌های راهنمایی موجود بررسی شده، سپس میزان مصرف تقاطع وحید-رودکی با این چراغ‌ها محاسبه گشته است. در ادامه میزان مصرف چراغ‌های تولیدی نمایش داده‌شده، سپس میزان مصرف تقاطع قبلی با لامپ‌های جدید محاسبه گردیده است. در پایان میزان مصرف تقاطع وحید-رودکی به‌صورت عملی در محل اندازه‌گیری و تحلیل شده است. در بخش ۵ نتایج به‌دست‌آمده از طراحی ارائه‌شده، بیان‌شده و در بخش پایانی نیز از حامیان و مشارکت‌کنندگان در طرح تقدیر و تشکر به عمل آمده است.

۲-۱ چراغ‌های LED فوق کم‌مصرف

در طراحی چراغ‌های راهنمایی باید شش شاخص در نظر گرفته شود:

۱- شدت روشنایی: طبق [19] شدت روشنایی هر چراغ راهنمایی قرمز از فاصله ۱۰۰ متری با قطر ۳۰ سانتیمتر برابر ۲۰۰ کاندلا است. در ساخت چراغ‌های راهنمایی از LEDهای فوق درخشان[14] ۵ میلی‌متری استفاده می‌شود. با توجه به دفترچه راهنمای تولیدکننده میزان درخشندگی LEDهای قرمز و زرد ٦۰۰۰ میلی‌کاندلا و LEDهای سبز ۱۲۰۰۰ میلی‌کاندلا است.

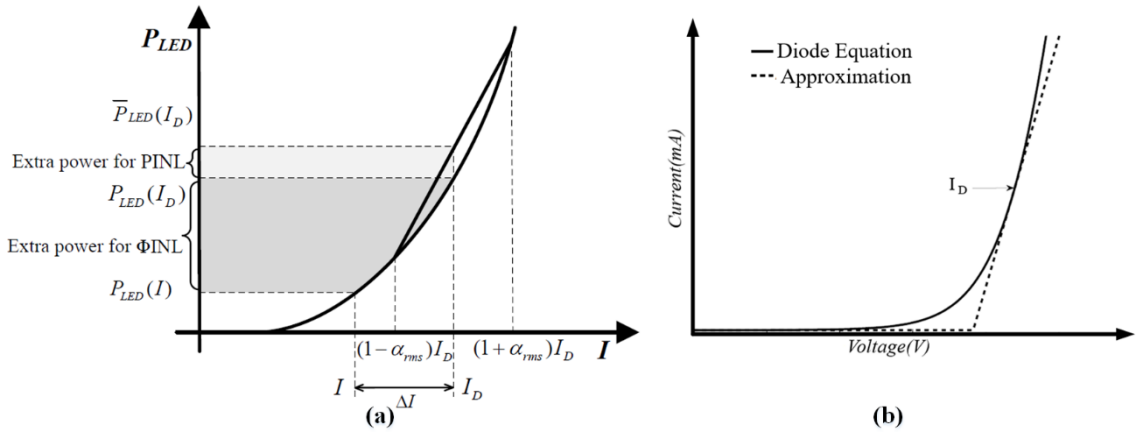
۲- بازدهی: منظور از بازدهی نسبت میزان روشنایی به توان مصرفی هر چراغ است. هر چه این مقدار بیشتر باشد، به معنای مصرف انرژی کمتر است. در شکل ۱(a) توان مصرفی هر LED نسبت به جریان عبوری از آن نشان داده شده است.

۳- پایداری جریان: میزان روشنایی هر LED بر اساس میزان جریان عبوری از آن مطابق شکل ۲(a) تغییر می‌کند.

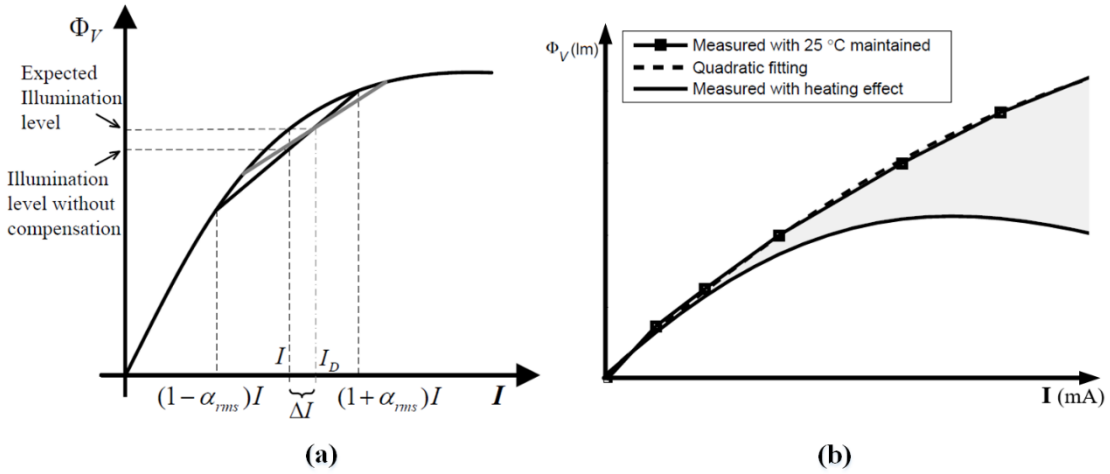
٤- پایداری دمایی: با توجه به شکل ۲(b) میزان روشنایی هر LED در صورت بالا رفتن دما کم می‌شود.

۵- پایداری ولتاژ: همان‌طور که در شکل ۱(b) مشخص است، میزان جریان عبوری از هر LED با توجه به میزان ولتاژ دو سر آن تغییر می‌کند.

٦- هزینه نهایی: این هزینه شامل هزینه تولید، هزینه تعمیر و نگهداری و طول عمر مفید چراغ می‌شود.



شکل ۱. (a) توان مصرفی LED برحسب شدت جریان/ (b) جریان عبوری از LED برحسب ولتاژ دو سر آن



شکل ۲. (a) شدت روشنایی LED برحسب جریان/ (b) تأثیر تغییرات دما بر شدت روشنایی با همان جریان قبلی

در طراحی جدید مبدل برق AC به DC حذف گردیده است؛ لذا تلفات ناشی از تبدیل حذف می‌شود. همچنین کاهش قطعات سخت‌افزاری منجر به کاهش هزینه نهایی خواهد شد.

با توجه به شش شاخص فوق می‌توان نتیجه گرفت که شدت روشنایی هر چراغ راهنمایی تابعی از میزان بازدهی، ولتاژ، جریان و دما است. طراحی چراغ باید به‌گونه‌ای باشد که هر LED حداکثر پایداری جریان و ولتاژ را داشته و مدار مجتمع هر چراغ حداکثر بازدهی و حداقل وابستگی به تغییرات دمایی را داشته باشد.

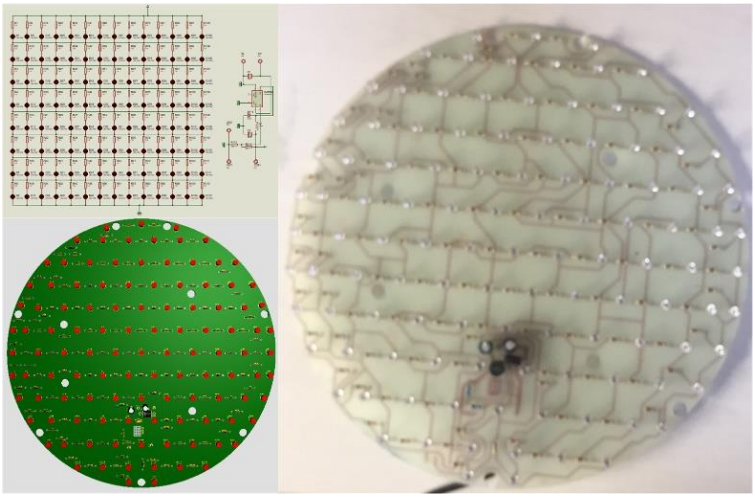
اگر فرض شود که تنها یک LED در چراغ باشد، به‌منظور دریافت حداکثر بازدهی از آن باید ولتاژ دو سر آن برابر ولتاژ شکست باشد. در این حالت با افزایش اندک ولتاژ، میزان جریان به‌شدت افزایش‌یافته و LED می‌سوزد. جهت جلوگیری از این اتفاق و پیشگیری از افزایش شدید جریان باید LED را با یک مقاومت سری نمود. اضافه شدن مقاومت به معنای افزایش توان مصرفی و کاهش بازدهی است؛ بنابراین میزان آن باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که حداقل تلفات رخ دهد.

حال اگر تعداد LEDها بیشتر از یکی باشد، آن‌ها را به دو طریق می‌توان روشن نمود. درصورتی‌که LEDها موازی باشند، ولتاژ دو سر همه برابر بوده، اما جریان عبوری از هر یک متناسب با مشخصات ذاتی همان LED است. با تغییر مشخصات ذاتی، جریان عبوری از LED به‌سادگی تغییر می‌کند. به عبارت دقیق‌تر LEDها در حالت موازی پایداری ولتاژ داشته، اما پایداری جریان ندارند. اگر LEDها سری شوند، جریان عبوری از همه

آن‌ها برابر بوده، لیکن ولتاژ دو سر هر یک متناسب با مشخصات ذاتی همان LED است. در این حالت پایداری جریان تا حدودی وجود دارد، اما ولتاژ LEDها پایدار نیست. همچنین در این حالت با سوختن یک LED تمام چراغ‌ها خاموش می‌شود. طبق شکل‌های ۱ و ۲ حساسیت شدت روشنایی LED به تغییرات جریان بسیار بیشتر از حساسیت آن به تغییرات ولتاژ است، لذا برقراری پایداری جریان نسبت به ولتاژ دارای اولویت است. یک چراغ راهنمایی ساده حداقل دارای ۱۰۰ LED است. می‌توان گفت بهترین حالت قرار دادن LEDها کنار هم درایه‌های یک ماتریس ۱۰*۱۰ است. به عبارت دقیق‌تر ابتدا هر ۱۰ LED را موازی نموده، سپس ۱۰ گروه به‌دست‌آمده با یکدیگر سری می‌شوند. در این حالت سوختن یک LED منجر به خاموش شدن LEDهای دیگر نشده و شدت جریان قبلی بر روی ۹ LED موازی باقیمانده پخش می‌شود. چراغ راهنمایی فلش در تقاطع دارای حداقل ٤٠ LED است. اگر مشابه چراغ ساده تحلیل شود، ترکیب LEDهای این چراغ باید مطابق یک ماتریس ٦*٧ یا ٧*٦ باشد.

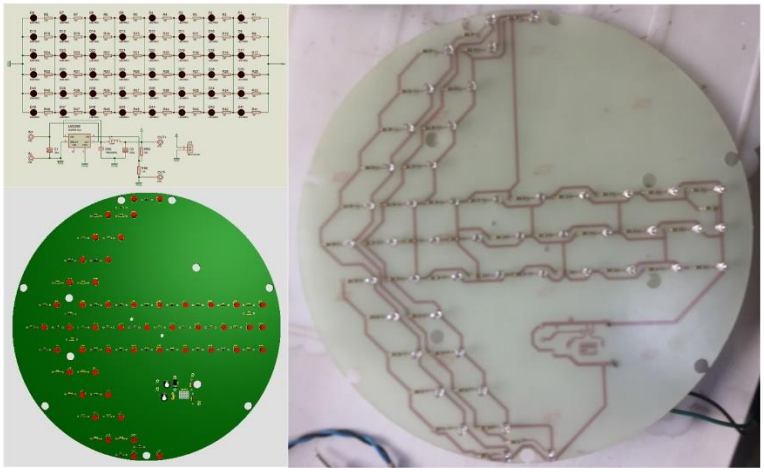
مدار قدرت دستگاه دیجیتال دارای یک سطح ولتاژ ثابت و مشخص برای تمامی خروجی‌ها است؛ اما تفاوت تعداد LEDهای سری در چراغ‌های ساده و فلش به معنای تفاوت سطح ولتاژ لازم برای روشن شدن آن‌ها است. همین‌طور LEDهای با رنگ‌های متفاوت دارای ولتاژ شکست متفاوت هستند؛ بنابراین لازم است از یک مبدل DC به DC جهت تنظیم ولتاژ هر چراغ شود. بازدهی مبدل‌های DC به DC وابسته به میزان تغییر ولتاژ است. به عبارتی هر چه این تغییر ولتاژ بیشتر باشد، تلفات تبدیل نیز بیشتر است. از طرف دیگر با توجه به هزینه تولید بوردهای الکتریکی، چراغ‌های با رنگ‌های متفاوت را باید به‌طور یکسان طراحی نمود. تفاوت طراحی منجر به کاهش تیراژ و افزایش هزینه خواهد شد.

پیش از پرداختن به قیود قبلی که در طراحی باید در نظر گرفته شوند، باید سطح ولتاژ مدار قدرت دستگاه کنترل دیجیتال را تعیین نمود. با فرض ثابت بودن توان مصرفی تقاطع، افزایش ولتاژ به معنای کاهش جریان عبوری است. از طرف دیگر متداول‌ترین سطح ولتاژ DC، ۱۲(V) است. با توجه به ولتاژ شکست LEDها، انتخاب سطح ولتاژ ۱۲ ولت به این معنا است که در طراحی حداکثر ٤ LED را می‌توان سری نمود. در این حالت اگر نوع چراغ ساده باشد، حداقل ۲۵ گروه ٤ تایی LED لازم است که توازن بیان‌شده در بخش قبلی به هم می‌خورد؛ بنابراین با توجه به بررسی بازار، سطح ولتاژ بعدی باید ۲٤ ولت باشد. در این سطح ولتاژ طراحی چراغ‌های ساده مطابق شکل ۳ می‌شود.



شکل ۳. نمای الکتریکی چراغ راهنمایی ساده فوق کم‌مصرف

با توجه به شکل فوق هر چراغ ساده شامل ۱۱۲ عدد LED است که هر ۱٤ LED با یکدیگر موازی شده سپس ۸ گروه به‌دست‌آمده با یکدیگر سری شده‌اند. چراغ‌های راهنمایی فلش نیز مطابق شکل ٤ طراحی شده است.

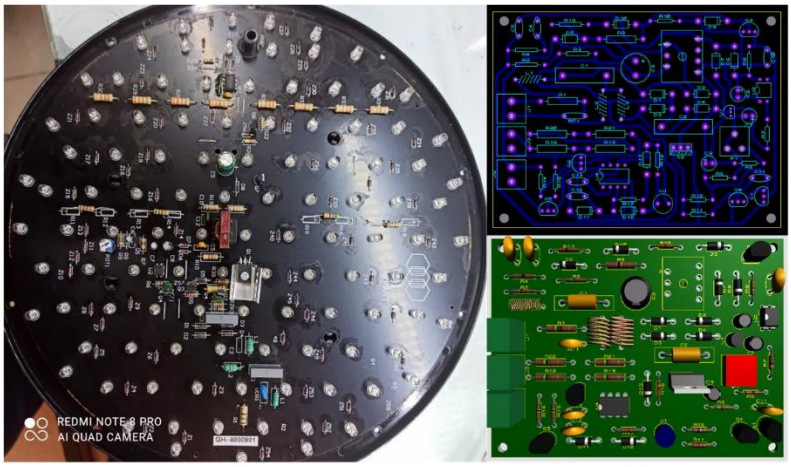


شکل ٤. نمای الکتریکی چراغ راهنمایی فلش فوق کم‌مصرف

هر چراغ فلش دارای ٤٨ LED است که هر ٦ LED با یکدیگر موازی شده سپس ۸ گروه به وجود آمده با یکدیگر سری شده‌اند. ولتاژ شکست هر LED سبز برابر ۲/۲۵۷ ولت، LED زرد برابر ۱/۸۵۲ ولت و LED قرمز برابر ۱/۷۵۲ ولت است. سطح ولتاژ مدار قدرت برابر ۲٤ ولت است. این سطح ولتاژ ابتدا توسط مبدل DC به DC پشت هر چراغ تنظیم‌شده، سپس ولتاژ باقیمانده بر روی LED ها و مقاومت‌های سری با آن‌ها تقسیم می‌شود. ولتاژ چراغ‌های سبز ۲۳ ولت، چراغ‌های زرد ۲۰/۵ ولت و چراغ‌های قرمز برابر ۲۰ ولت است. مقاومت سری با LEDها در چراغ‌های سبز ساده برابر ۱۰۰ اهم و در چراغ‌های زرد و قرمز ساده برابر ۱۲۰ اهم است. با توجه به اینکه تعداد LEDهای موازی در چراغ‌های فلش نسبت به چراغ‌های ساده کمتر است، مقاومت معادل آن‌ها بیشتر شده، لذا مقدار مقاومت سری با LEDها کمتر در نظر گرفته شده است. مقاومت سری با LEDها در چراغ سبز فلش برابر ۸٤ اهم و در LEDهای زرد و قرمز فلش برابر با ۱۰۰ اهم است.

۳. روش پژوهش

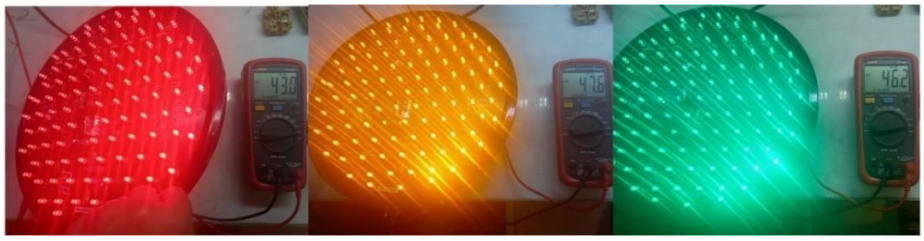
جدیدترین چراغ‌های مورداستفاده در تقاطع‌ها مطابق شکل ۵(a) است. در این طراحی هر چراغ ساده دارای ۱۰۸ LED است که در دو ردیف ٥٤ تایی به‌صورت جداگانه با یکدیگر سری شده و در انتها با ٤ مقاومت ٥٦۰ اهمی سری شده است. در این حالت اگر یک LED بسوزد، تمام ٥٤ LED مربوط به آن ردیف خاموش می‌شود. برای جلوگیری از بروز این اتفاق هر سه LED با یک دیود زنر موازی شده؛ لذا با سوختن هر LED سه‌تا خاموش می‌شود. با توجه به اینکه LEDها با برق DC روشن می‌شوند، در هر چراغ از یک مبدل AC به DC استفاده شده است. این مبدل‌ها از نوع سوئیچینگ جریان بوده و خروجی آن ۱۰۰ ولت DC است (شکل ۵(b)).



(a) (b)

شکل ۵. (a) نمای الکتریکی چراغ راهنمایی ساده موجود/ (b) نمای الکتریکی مبدل AC به DC مورداستفاده در چراغ

با توجه به شکل ٦ جریان مصرفی چراغ سبز ساده ٤٦/٢ میلی آمپر، چراغ زرد ساده ٤٧/٦ میلی‌آمپر و چراغ‌قرمز ساده ٤٣ میلی آمپر است. با توجه به اینکه چراغ‌ها با برق شهری روشن شده‌اند، توان مصرفی هر یک به ترتیب از راست به چپ برابر ١٠/١٦، ١٠/٤٧ و ٩/٤٦ وات است.



شکل ٦. میزان جریان عبوری از هر چراغ راهنمایی ساده موجود

هر چراغ فلش دارای ٤٠ LED است که با یکدیگر سری شده و مانند چراغ ساده یک دیود زنر با هر دو LED موازی شده است. همان مبدل AC به DC به‌کاررفته در چراغ‌های ساده در این چراغ نیز وجود دارد. مطابق شکل ٧ جریان مصرفی چراغ سبز فلش ٤٣ میلی‌آمپر، چراغ زرد فلش ٥٤/٨ میلی‌آمپر و چراغ‌قرمز فلش ٤٨/٣ میلی‌آمپر است.

شکل ٧. میزان جریان عبوری از هر چراغ راهنمایی فلش موجود

با توجه به اینکه چراغ‌ها با برق ٢٢٠ ولت شهری روشن شده‌اند، توان مصرفی چراغ سبز فلش ٩/٤٦، چراغ زرد فلش ١٢ و چراغ‌قرمز فلش ١٠/٦ وات است.

تقاطع وحید-رودکی شهر اصفهان دارای ٢٢ فانوس سه چراغ است که ١٢ عدد از این فانوس‌ها چراغ‌های ساده و ١٠ عدد از آن‌ها چراغ‌های فلش است. تقاطع به‌صورت سه فاز مدیریت می‌شود. اگر فرض شود طول چرخه ١٠٠ ثانیه، طول فاز یک و

دو ۲۵ و فاز سه ۳۵ ثانیه باشد و همچنین زمان زرد پس از هر فاز ۳ ثانیه و زمان تمام‌قرمز ۲ ثانیه باشد؛ می‌توان نتیجه گرفت که در هر چرخه ۸۵ ثانیه یک‌سوم چراغ‌ها سبز و مابقی قرمز، ۹ ثانیه یک‌سوم چراغ‌ها زرد و مابقی قرمز و ٦ ثانیه تمام چراغ‌ها قرمز است؛ بنابراین توان مصرفی تقاطع به‌صورت رابطه ۱ است.

$$W = \frac{85}{100}\left(\frac{1}{3}(12G_{St} + 10G_{LT}) + \frac{2}{3}(12R_{St} + 10R_{LT})\right) + \frac{9}{100}\left(\frac{1}{3}(12Y_{St} + 10Y_{LT}) + \frac{2}{3}(12R_{St} + 10R_{LT})\right) + \frac{6}{100}(12R_{St} + 10R_{LT}) = \frac{85}{300}(12G_{St} + 10G_{LT}) + \frac{9}{300}(12Y_{St} + 10Y_{LT}) + \frac{206}{300}(12R_{St} + 10R_{LT}) \quad (۱)$$

در رابطه‌ی فوق W توان مصرفی چراغ‌های تقاطع، G_{St} توان چراغ سبز ساده، G_{LT} توان چراغ سبز فلش، Y_{St} چراغ زرد ساده، Y_{LT} چاغ زرد فلش، R_{St} چراغساده قرمز و R_{LT} چراغ قرز فلش است.

$$W = \frac{85}{300}(12 * 10.16 + 10 * 9.46) + \frac{9}{300}(12 * 10.47 + 10 * 12) + \frac{206}{300}(12 * 9.46 + 10 * 10.6) = \frac{85}{300} * 216.52 + \frac{9}{300} * 245.64 + \frac{206}{300} * 219.52 = 219.4536 \quad (۲)$$

مطابق شکل ۸ جریان مصرفی چراغ‌های راهنمایی فوق کم-مصرف به ترتیب از راست به چپ برابر ٦٨، ۹۳/٦ و ٨٤ میلی آمپر است.

شکل ۸ میزان جریان عبوری از هر چراغ راهنمایی ساده فوق کم‌مصرف

با توجه به اینکه سطح ولتاژ کاری چراغ‌های فوق ٢٤ ولت است، توان مصرفی چراغ سبز ساده برابر ۱/٦۳، چراغ زرد ساده برابر ۲/۲۵ و چراغ‌قرمز ساده برابر ۲/۰۲ وات است. به همین ترتیب توان مصرفی چراغ سبز فلش ۰/۸٦، چراغ زرد فلش ۱/۱۲ و چراغ‌قرمز فلش ۱/۰۲ وات است؛ بنابراین مطابق رابطه‌ی ۳ مصرف روشنایی تقاطع وحید-رودکی به‌صورت محاسبات زیر به دست می‌آید.

$$W = \frac{85}{300}(12 * 1.63 + 10 * 0.86) + \frac{9}{300}(12 * 2.25 + 10 * 1.12) + \frac{206}{300}(12 * 2.02 + 10 * 1.02) = \frac{85}{300} * 28.16 + \frac{9}{300} * 38.2 + \frac{206}{300} * 34.44 = 32.77 \quad (۳)$$

بنابراین مصرف چراغ‌های راهنمایی وحید–رودکی (بدون عابر پیاده) از ۲۱۹ وات به ۳۳ وات کاهش پیدا کرد. چراغ‌های راهنمایی فوق کم‌مصرف در تقاطع وحید–رودکی اصفهان نصب و بهره‌برداری شده است. به‌منظور صحت‌سنجی محاسبات فوق جریان و ولتاژ دستگاه کنترل دیجیتال حین مدیریت تقاطع اندازه گرفته شد. این دستگاه دارای دو ورودی بوده که سطح ولتاژ هریک ۱۲ ولت است. ورودی اول علاوه بر روشن کردن چراغ‌ها برق خود دستگاه را نیز تأمین می‌کند؛ لذا جریان عبوری از آن بیشتر است.

شکل ۹. میزان جریان و ولتاژ ورودی‌های دستگاه کنترل دیجیتال حین مدیریت تقاطع وحید–رودکی

مطابق تصویر فوق ولتاژ و جریان ورودی اول به ترتیب برابر ۱۲/۳۷ ولت و ۲/۲۲۵ آمپر است. ولتاژ و جریان ورودی دوم نیز به ترتیب برابر با ۱۲/٤٥ ولت و ۱/٥٦ آمپر است. با توجه به اینکه ولتاژ ورودی‌ها به‌منظور تأمین سطح ولتاژ چراغ‌ها با یکدیگر سری می‌شوند، جریان عبوری از آن‌ها جهت تأمین برق روشنایی تقاطع برابر ۱/٥٦ آمپر است؛ لذا اختلاف جریان ورودی اول و دوم مخصوص دستگاه کنترل بوده و برابر ۰/٦٦٥ آمپر است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده می‌توان مصرف چراغ‌های تقاطع را از رابطه‌ی ٤ به دست آورد.

$$W = (V_1 + V_2)I_2 = (1237 + 12.45)1.56 = 38.72 \quad (٤)$$

در رابطه‌ی فوق V_1 ولتاژ ورودی اول، V_2 ولتاژ ورودی دوم و I_2 جریان ورودی دوم است. طبق این رابطه توان مصرفی چراغ‌های راهنمایی فوق کم‌مصرف تقاطع وحید–رودکی برابر ۳۸/۷۲ است. نتیجه به‌دست‌آمده حدود ٦ وات بیشتر از محاسبات رابطه‌ی ۳ است. بخشی از این اختلاف به خاطر تفاوت طول چرخه حقیقی تقاطع با طول چرخه فرض شدشده (۰ ثانیه) است و بخشی ناشی از تلفات رخ‌داده در سیم‌های انتقال از دستگاه به چراغ‌ها است.

٤. نتیجه‌گیری

چراغ‌های فوق کم‌مصرف اکنون در تقاطع وحید–رودکی شهر اصفهان نصب و بهره‌برداری شده است.

۱- مصرف چراغ‌های هر تقاطع به‌شدت کاهش یافته (۸۵ درصد) است.

۲- در صورت نیاز به استفاده از باتری به هنگام بی‌برقی، به‌جای دو باتری ۱۰۰ آمپرساعت در سیستم UPS تنها ۲ باتری ۷ آمپرساعت کافی است.

۳- با به‌کارگیری لامپ‌های فوق کم‌مصرف در تقاطع به همراه دستگاه کنترل دیجیتال مصرف کل یک تقاطع مانند وحید- رودکی اصفهان با چراغ‌های عابر پیاده حدود ٦٠ وات می‌شود. این میزان مصرف به این معنا است که تنها با دو پنل خورشیدی ٦٠ وات می‌توان مصرف تقاطع را به‌طور کامل مستقل از برق شهری کرد.

۴- در چنین تقاطعی همچنین می‌توان از منابع پیزوالکتریک جهت تأمین انرژی تقاطع و شمارشگر خودرویی به‌صورت هم‌زمان استفاده کرد. این امکان با کاهش مصرف تقاطع فراهم گردیده است.

۵- هزینه تولید مدار الکتریکی هر چراغ راهنمایی فوق کم-مصرف نسبت به چراغ‌های LED موجود ٤٠٪ کمتر است.

۵. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از مرکز کنترل ترافیک و نظارت تصویری معاونت حمل‌ونقل شهرداری اصفهان به خاطر تأمین هزینه‌ها و در اختیار قرار دادن امکانات و اطلاعات لازم جهت طراحی، تولید و به‌کارگیری دستگاه کنترل دیجیتال کمال قدردانی و تشکر را به‌جا آورند.

٦. پی‌نوشت‌ها

1. Light-Emitting Diode
2. H. J. Round
3. Oleg Losev
4. Texas Instruments
5. Theodore Moustakas
6. Shuji Nakamura
7. Life Cycle
8. U. S. Department of Energy
9. William Potts
10. Traffic Signal Control
11. Cycle
12. Split
13. Offset
14. Super high bright

۷. مراجع

– J. M. Raguse and J. R. Sites, “Correlation of Electroluminescence With Open-Circuit Voltage From Thin-Film CdTe Solar Cells,” IEEE J. Photovolt., vol. 5, no. 4, pp. 1175–1178, Jul. 2015. doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2417761.

– Electrical World. McGraw-Hill, 1907.

– O. V. Lossev, “CII. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals,” Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci., vol. 6, no. 39, pp. 1024–1044, Nov. 1928. doi: 10.1080/14786441108564683.

– “LED Lights - How it Works - History.” https://edisontechcenter.org/LED.html (accessed Feb. 04, 2023).

– E. F. Schubert, Light-Emitting Diodes, 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

– T. D. Moustakas, “Highly insulating monocrystalline gallium nitride thin films,” US5686738A, Nov. 11, 1997 accessed: Feb. 04, 2023. [Online]. Available: https://patents.google.com/patent/US5686738A/en

– “Shuji Nakamura,” Jul. 17, 2015. https://materials.ucsb.edu/people/faculty/shuji-nakamura (accessed Feb. 04, 2023).

– “News | SAMSUNG LED | Samsung LED Global Website.” https://www.samsung.com/led/about-us/news-events/news/news-detail-37 (accessed Feb. 04, 2023).

– D. X, W. Y, K. Am, L. X, and L. Jmg, “LED power consumption in joint illumination and communication system,” Opt. Express, vol. 25, no. 16, Aug. 2017. doi: 10.1364/OE.25.018990.

– M. Fontoynont, “LED lighting, ultra-low-power lighting schemes for new lighting applications,” Comptes Rendus Phys., vol. 19, no. 3, pp. 159–168, Mar. 2018. doi: 10.1016/j.crhy.2017.10.014.

– P. Morgan Pattison, M. Hansen, and J. Y. Tsao, “LED lighting efficacy: Status and directions,” Comptes Rendus Phys., vol. 19, no. 3, pp. 134–145, Mar. 2018.
doi: 10.1016/j.crhy.2017.10.013.
– “About the Solid-State Lighting Program,” Energy.gov.
https://www.energy.gov/eere/ssl/about-solid-state-lighting-program (accessed Feb. 04, 2023).
– “Motor News - Automobile Club of Michigan | March 1947 | MR. ‘TRAFFICLIGHT.’” http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/miller1/docs/moyer/ (accessed Feb. 04, 2023).
– D. Zhao, Y. Dai, and Z. Zhang, “Computational Intelligence in Urban Traffic Signal Control: A Survey,” IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev., vol. 42, no. 4, pp. 485–494, Jul. 2012.
doi: 10.1109/TSMCC.2011.2161577.
– H. S. E. Chuo, M. K. Tan, A. C. H. Chong, R. K. Y. Chin, and K. T. K. Teo, “Evolvable traffic signal control for intersection congestion alleviation with enhanced particle swarm optimisation,” in 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Oct. 2017, pp. 92–97.
doi: 10.1109/I2CACIS.2017.8239039.
– P. G. Balaji and D. Srinivasan, “Multi-Agent System in Urban Traffic Signal Control,” IEEE Comput. Intell. Mag., vol. 5, no. 4, pp. 43–51, Nov. 2010.
doi: 10.1109/MCI.2010.938363.
– A. T. Zhaparova, A. E. Baklanov, and D. N. Titov, “Improving the Efficiency of Led Lighting by Switching to Low-voltage Technology,” Procedia Eng., vol. 129, pp. 171–177, Jan. 2015.
doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.028.
– European Commission. Joint Research Centre. and Vito., “Revision of the EU green public procurement criteria for street lighting and traffic signals: technical report and criteria proposal.,” LU, 2019.
doi: 10.2760/372897.
– B. L. Cole and B. Brown, “Specification of Road Traffic Signal Light Intensity,” Hum. Factors, vol. 10, no. 3, pp. 245–254, Jun. 1968.
doi: 10.1177/001872086801000306.

Modeling, Producing and Applying Super Low Consumption Traffic Signal

Mohammadbagher Shahgholian*, Machine Learning and Robotics, Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Nafiseh Mahmoudabadi, Isfahan municipality's traffic control and video surveillance center, Isfahan, Iran

E-mail: m_shahgholian@sbu.ac.ir

Abstract
In this article, a new design for traffic signals is presented in such a way that the consumption of each light with the same level of intensity is greatly reduced. Today, with the development of urbanization, energy consumption has also increased. Building new power plants to provide energy is expensive and increases air pollution. Accordingly, that the only possible solution is to use new technologies in the field of energy consumers in such a way that their consumption with the same efficiency will be significantly reduced. At present, traffic signals have an average power of 10 watts. This amount means that the lighting consumption of an intersection is equal to 320 watts on average. Also, the high consumption of analog control systems should be added to this amount. In this article, the design of super low consumption traffic signals has been produced. Their power is 1.5 watts on average. The lights of the previous intersection consume 48 watt hours of energy. With the new lights, the energy consumption is reduced by 85%, with the consumption of the digital control device (8 watts) and assuming that every day has 12 hours of lighting, by using two 60 watts solar panels, the intersection can be independent of city electricity.
Keywords: Traffic Signal, Super Low Energy Consumption, LED