



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)  
دانشکده مهندسی کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی

توسعه و پیاده سازی کارت واسط شبکه خط برق با به کارگیری مدولاسیون  
FSK

نگارش  
سید علیرضا صالحی دهنوی

استاد راهنما  
دکتر حمیدرضا زرندی

شهریور ۱۴۰۱

صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه- فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه (هر سه مقطع تحصیلی) باید فرم ارزیابی یا تایید و تصویب پایان-  
نامه/رساله موسوم به فرم کمیته دفاع برای ارشد و دکترا و فرم تصویب برای کارشناسی،  
موجود در پرونده آموزشی را قرار دهند.



اینجانب سید علیرضا صالحی دهنوی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی من تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است. در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

علیرضا صالحی

امضا

تقدیم به همه کسانی که در راه آزادی و آزادگی از خود هزینه داده‌اند.

زندگی صحنه یکتای هنرمندی ماست، هرکسی نغمه خود خواند و از صحنه رود، صحنه پیوسته بجاست، خرم آن نغمه که مردم بسپارند به یاد.

از اینکه در مسیر زندگی توانستم فرصت و توان یادگیری را داشته باشم و فرصت ارزشمند مقطع کارشناسی را تجربه کنم و با موفقیت به پایان برسانم، بسیار خرسندم.  
بدین وسیله مراتب سپاس و گرامیداشت خود را خدمت،

- جناب آقای دکتر حمیدرضا زرندی، استاد راهنمای گرانقدر، بابت تلاش‌ها، التفات و راهنمایی‌های ایشان،

- جناب آقای دکتر حمیدرضا کیخا، بابت تلاش‌ها و رهنمودهای بی‌دریغ‌شان،

- و در پایان، از دوست عزیزم، آقای آریا وارسته بابت نظرات و راهنمایی‌های دلسوزانه‌اش

ابراز و از کوشش آنان تشکر می‌نمایم.

علیرضا صالحی - تابستان ۱۴۰۱

## چکیده

امروزه شبکه‌های دستگاه‌ها و اشیاء نقش به‌سزایی در بهبود بهره‌وری و درآمد صنایع گوناگون دارند. به طوری که تعلل در به‌کارگیری آن‌ها می‌تواند آینده رقابتی یک شرکت را با خطر قابل توجهی روبه‌رو کند. در برخی از صنایع، پشته‌های شبکه رایج مانند TCP/IP برای ارتباط دستگاه‌ها مناسب نمی‌باشد. از جمله معایب اساسی به‌کاربردن پشته TCP/IP در این صنایع، هزینه‌ی بالای نصب زیرساخت و دستگاه‌هایی است که از آن پشتیبانی می‌کنند. در صورتی که از پیش برای تأسیسات، زیرساخت‌های لازم تدبیر نشده باشد (که در بیشتر موارد این چنین است) هزینه نصب زیرساخت تا بیش از دو برابر نیز افزایش خواهد یافت. همچنین تأثیر منفی امواج الکترومغناطیسی استفاده شده در لایه فیزیکی پشته TCP/IP بر کارکرد صحیح برخی دستگاه‌ها (مانند دستگاه‌های پایش بیمار)، از دیگر مشکلات مهم به‌کارگیری این پشته می‌باشند. از آنجا که حفظ کارکرد صحیح دستگاه‌ها امری ضروری می‌باشد، بسیاری از صنایع در برقراری اتصال میان اشیاء از راه پشته رایج TCP/IP، با مشکل جدی روبه‌رو می‌گردند. برای حل این معایب ارتباطات خط برق می‌تواند روش مناسبی برای اتصال دستگاه‌ها در چنین صنایعی باشد. از آنجا که پهنای باند رسانه در ارتباطات خط برق پایین می‌باشد، وجود یک پشته شبکه خط برق سبک با حداقل طول سرآیند در لایه‌های شبکه امری ضروری است. در این پژوهش تلاش شد با شناسایی نیازمندی‌های اساسی شبکه در این صنایع، کارت واسط شبکه خط برقی با پشته شبکه سبک و سرباری بسیار کمتر از TCP/IP با مدولاسیون FSK توسعه داده شده و پیاده‌سازی گردد.

## واژه‌های کلیدی:

ارتباطات خط برق، کارت واسط شبکه خط برق، پشته شبکه خط برق، پشته TCP/IP، مدولاسیون FSK

صفحه	فهرست مطالب
۱	چکیده.....
۱	فصل اول مقدمه .....
۶	فصل دوم معرفی مسئله .....
۷	معرفی مسئله .....
۷	۱-۲- اهمیت روزافزون اینترنت اشیا.....
۸	۲-۲- چالش‌ها و مشکلات پیشرو پیاده‌سازی شبکه.....
۸	۱-۲-۲- امنیت شبکه اشیا.....
۸	۲-۲-۲- سربار و کارایی.....
۱۲	۳-۲-۲- هزینه پیاده‌سازی.....
۱۲	۳-۲- ارتباطات خط برق.....
۱۴	۵-۲- جمع‌بندی.....
۱۵	فصل سوم روش پیشنهادی.....
۱۶	روش پیشنهادی .....
۱۷	۱-۳- کارت واسط شبکه خط برق.....
۱۷	۱-۳-۱- مودم خط برق KQ130-F.....
۱۸	۲-۳-۱- میکروکنترلر STM32F030C8T6.....
۱۹	۳-۳- گرداننده کارت واسط شبکه خط برق.....
۱۹	۳-۳- پشته شبکه طراحی شده.....
۱۹	۱-۳-۳- لایه پیوند.....
۲۰	۲-۳-۳- لایه انتقال.....
۲۱	۴-۳- جمع‌بندی.....
۲۲	فصل چهارم پیاده‌سازی و ارزیابی .....
۲۳	پیاده‌سازی و ارزیابی .....
۲۳	۱-۴- پیاده‌سازی.....
۲۳	۱-۴-۱- کارت شبکه خط برق.....
۲۳	۱-۴-۱-۱- شماتیک و قطعات مدار.....
۲۷	۲-۴-۱-۱- نرم‌افزار میکروکنترلر .....
۲۸	۲-۴-۱-۲- گرداننده کارت شبکه.....
۲۸	۱-۴-۲-۱- لایه پیوند.....
۲۹	۲-۴-۲-۱- طول داده.....

۲۹.....	۳-۱-۲-۱-۴- شناسه‌های کارت شبکه
۳۰.....	۴-۱-۲-۱-۴- درهم‌ریخته سرآیند
۳۰.....	۵-۱-۲-۱-۴- شناسه پنجره
۳۰.....	۶-۱-۲-۱-۴- داده و کد بررسی افزونگی دوره‌های
۳۰.....	۲-۲-۱-۴- لایه انتقال
۳۱.....	۱-۲-۲-۱-۴- تکه‌تکه کردن
۳۱.....	۲-۲-۲-۱-۴- رمزگذاری
۳۲.....	۲-۴- خروجی و ارزیابی
۳۲.....	۱-۲-۴- ایرادیابی
۳۵.....	۲-۲-۴- ارزیابی
۳۸.....	۳-۴- جمع‌بندی
۴۰.....	فصل پنجم جمع‌بندی و پیشنهاد کارهای آتی
۴۱.....	جمع‌بندی و پیشنهاد کارهای آتی
۴۱.....	۵-۱- جمع‌بندی
۴۳.....	۵-۲- پیشنهاد کارهای آتی



صفحه	فهرست تصاویر
۲.....	شکل ۱-۱: تأثیر افزایش ده درصدی ارتباط ماشین-ماشین بر روی تولید ناخالص ملی [۱].....
۳.....	شکل ۲-۱: لایه‌های پشته شبکه TCP/IP [۲].....
۴.....	شکل ۱-۳: دربرگرفته شدن SDU لایه بالایی به دست PDU لایه پایین آن و سربار ساختار لایه‌های [۲].....
۱۳.....	شکل ۱-۲: روش‌های پایه مدولاسیون داده دیجیتال [۲].....
۱۳.....	شکل ۲-۲: روش کلی ارتباطات خط برق [۱۱].....
۱۴.....	شکل ۲-۳: نمودار نویز منتشر شده بر روی خط برق توسط برخی دستگاه‌ها [۱۲].....
۱۹.....	شکل ۳-۳: نمونه‌ای از نتیجه برخورد که باعث خطا در داده‌های دریافتی (سبز رنگ) می‌شود.....
۲۴.....	شکل ۱-۴: نمودار شماتیک مدار کارت شبکه.....
۲۵.....	شکل ۴-۲: سطح منطقی ولتاژ در هر یک از تکنولوژی‌های به کار رفته.....
۲۶.....	شکل ۴-۳: شماتیک مدار تقسیم‌کننده ولتاژ.....
۳۳.....	شکل ۴-۴: نرم‌افزار میکروکنترلرها به طور مستقل از مودم ایرادیابی شد.....
۳۴.....	شکل ۴-۵: شیوه ایجاد همبندی خطی مجازی در روند ایرادیابی گرداننده.....
۳۴.....	شکل ۶-۴: دو کارت شبکه به خط برق متصل شده‌اند و به صورت دستی ایرادیابی می‌گردند.....
۳۵.....	شکل ۷-۴: نمونه‌ای از استفاده از کل پشته شبکه برای ارسال داده‌های لایه کاربرد در برنامه کنسولی.....
۳۶.....	شکل ۸-۴: برد فیزیکی نهایی کارت شبکه خط برق.....
۳۸.....	شکل ۴-۹: سربار پشته شبکه پیشنهادی و TCP/IP در شبکه مدیریت انرژی بر حسب شمار حسگرها یا عملگرها.....

صفحه

فهرست جداول

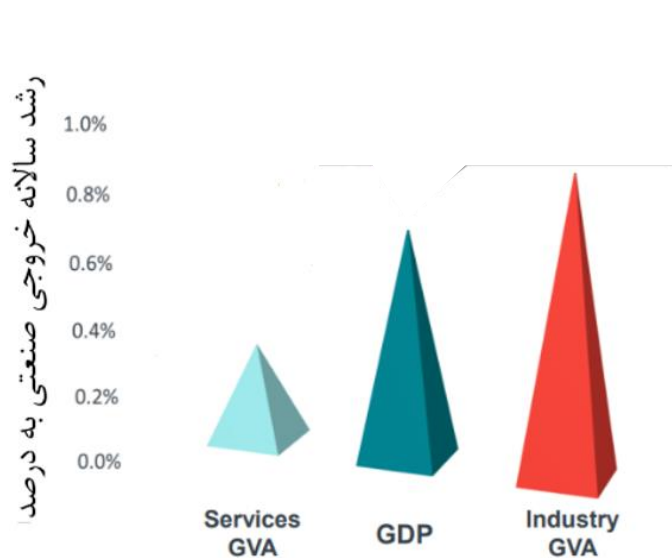
جدول ۱-۲: مشخصات شبکه در سامانه‌های ساختمان هوشمند [۹].....	۹
جدول ۲-۲: مشخصات شبکه در سامانه‌های مدیریت انرژی [۹].....	۱۰
جدول ۴-۱: ساختار قاب لایه پیوند.....	۲۸
جدول ۴-۲: ساختار قطعه لایه انتقال.....	۳۱
جدول ۴-۳: نرخ موفقیت در مدیریت انواع خرابی‌هایی که بر اثر برخورد ایجاد میشوند.....	۳۷

## فصل اول

### مقدمه

## مقدمه

امروزه شبکه‌های رایانه‌ای با اندازه‌گیری، گردآوری و جابه‌جایی، تحلیل داده و در نهایت اعمال عملیات‌های کنترلی باعث افزایش بهره‌وری و بهبود بسیاری از فرآیندهای ساخت و تولید گشته‌اند. همچنین امکان نظارت و کنترل فرآیندهای مختلف را فراهم آورده‌اند.



شکل ۱-۱: تأثیر افزایش ده درصدی ارتباط ماشین-ماشین بر روی تولید ناخالص ملی [۱]

از این رو این شبکه‌ها به نقشی بسیار مهم در جوامع انسانی دست یافته‌اند، به طوری که برپایه برآوردها مطابق شکل ۱-۱ افزایش ده درصدی ارتباط‌های ماشین-ماشین در بازه ۱۵ ساله ۲۰۱۸ الی ۲۰۳۲ در کشور آمریکا منجر به افزایش ۰.۷ درصدی تولید ناخالص داخلی<sup>۱</sup> و رشد ۰.۹ درصدی ارزش افزوده ناخالص<sup>۲</sup> صنعتی، و ۰.۳ درصدی ارزش افزوده ناخالص خدماتی در این کشور شده است [۱].

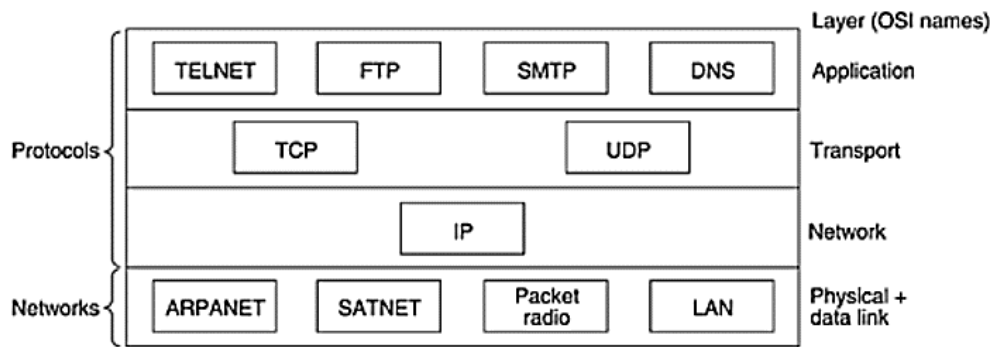
ساخت و نگهداری اتکاپذیر شبکه‌های رایانه‌ای نیازمند اتصال قابل اطمینان میان رایانه‌های شبکه می‌باشد. برای این منظور رسانه‌های انتقال داده<sup>۳</sup> و پشته‌های شبکه<sup>۴</sup> گوناگونی توسعه داده شده است که از جمله شناخته‌ترین آن‌ها می‌توان به پشته TCP/IP اشاره کرد، که این پشته یک ارتباط اتکاپذیر را بر روی یک بستر انتقال داده اتکناپذیر فراهم می‌آورد [۲].

1 Gross Domestic Product

2 Gross Value Product

3 Communication Media

4 Network Stack



شکل ۱-۲: لایه‌های پشته شبکه TCP/IP [۲]

با توجه به شکل ۱-۲ پشته TCP/IP دارای پنج لایه کاربرد<sup>۱</sup>، انتقال<sup>۲</sup>، شبکه<sup>۳</sup>، پیوند<sup>۴</sup> و فیزیکی<sup>۵</sup> می‌باشد. به طور خلاصه لایه فیزیکی انتقال بیت‌های خام میان دو دستگاه را که به یکدیگر از طریق رسانه انتقال متصل هستند، لایه پیوند مدیریت رسانه انتقال و خطایابی قاب‌ها، لایه شبکه هدایت و مسیریابی بسته‌ها و لایه انتقال فراهم کردن ابزاری مطمئن انتقال داده بر عهده دارد. در نهایت لایه کاربرد نیز پیام‌های ارتباطی میان دو دستگاه نهایی را دریافت و ارسال می‌کنند [۲].

هر یک از این پشته‌ها مناسب برای کاربردی خاص می‌باشند. از این رو برپایه کاربرد، ممکن است در مواردی مانند:

- محدودیت در توان پردازشی
- نرخ پایین تولید داده و اهمیت آن
- ساده بودن شبکه
- بی‌درنگ بودن عملیات‌ها

پشته به صورت کامل پیاده‌سازی نشود.

برای مثال در سیستم‌های نهفته که به طور میانگین کمتر از ۱۰۰ کیلوبایت حافظه اصلی و حافظه ثانویه وجود دارد، نمی‌توان پیاده‌سازی‌های کامل این پشته را استفاده کرد چراکه دست‌کم چند ۱۰۰ کیلوبایت حافظه اصلی و ثانویه نیاز دارند [۳]. به طوری که در تلاش‌هایی که برای پیاده‌سازی این پشته

<sup>۱</sup> Application

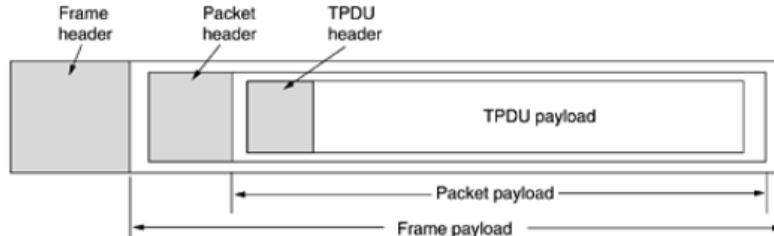
<sup>۲</sup> Transport

<sup>۳</sup> Network

<sup>۴</sup> Link

<sup>۵</sup> Physical

بر روی میکروکنترلرها انجام شده است برخی امکانات مانند درخواست بازفرستی خودکار انتخابی<sup>۱</sup> و کنترل اذحام<sup>۲</sup> پیاده‌سازی نشده است [۴].



شکل ۱-۳: دربرگرفته شدن SDU لایه بالایی به دست PDU لایه پایین آن و سربار ساختار لایه‌ای [۲]

به عنوان مثالی دیگر می‌توان شبکه‌های دربرگیرنده حسگرها و القاگرهایی با نرخ داده پایین را در نظر گرفت که برای کنترل و پایش به کار می‌روند. از جمله این سیستم‌ها می‌توان سامانه روشنایی و مدیریت انرژی ساختمان را نام برد که در مواقع لازم دستگاه‌ها را به شبکه برق متصل یا از آن قطع می‌کند. در این گونه سیستم‌ها پهنای باند داده اندک می‌باشد و رایانه‌ها نیز محدودیت توان پردازشی دارند. از این رو استفاده از پشته TCP/IP که به هر پیام لایه کاربرد دست کم ۲۰ بایت در لایه انتقال و ۲۰ بایت در لایه شبکه می‌افزاید که سربار بزرگی برای شبکه ایجاد می‌کند [۲].

پشته‌های شبکه را می‌توان از نظر هزینه برپاسازی نیز بررسی کرد. از عوامل موثر بر هزینه برپاسازی پشته شبکه می‌توان موارد زیر را برشمرد:

۱. جنس رسانه و روش بازنمایی بیت‌ها در لایه فیزیکی (زمان‌بندی<sup>۳</sup>، مدولاسیون<sup>۴</sup>): به طور کلی با افزایش فرکانس سیگنال داده ارسالی هزینه ساخت گیرنده و فرستنده لایه فیزیکی افزایش می‌یابد، زیرا نیاز به ابزارهای دقیق‌تر و پردازش سریع‌تر سیگنال افزایش می‌یابد. در صورت به‌کاربردن مدولاسیون هرچه روش مدولاسیون پیچیده‌تر باشد هزینه ساخت افزایش می‌یابد، به طور کلی روش ASK ساده‌ترین و ارزان‌ترین و روش‌های FSK و PSK پیچیده‌تر و گران‌تر می‌باشند [۵].

<sup>1</sup> Selective ARQ

<sup>2</sup> Congestion Control

<sup>3</sup> Bit Timing

<sup>4</sup> Modulation

۲. **سربار لایه‌های بالاتر:** هرچه میزان پردازش واحدهای داده<sup>۱</sup> در لایه‌های بالاتر بیشتر باشد، نیاز به فضای حافظه اصلی و ثانویه بیشتر و همچنین پردازنده با توان بالاتر است.

در شبکه TCP/IP رایج‌ترین رسانه انتقال، زوج سیم‌های تابیده می‌باشد که به طور میانگین در ۶۰۰ متر کابل‌کشی برای ساختمان‌های در حال تاسیس حدود ۲۰۰۰ دلار هزینه در بر خواهد داشت اما این رقم برای ساختمان‌هایی که پس از ساخت اقدام به نصب تجهیزات می‌کنند، بیش از دو برابر افزایش خواهد یافت<sup>۲</sup> [۶]. از این رو در کاربردهایی مانند سامانه نظارت انرژی ساختمان‌ها که گستردگی فیزیکی تأسیسات و همچنین شمار دستگاه‌ها قابل توجه است و پهنای باند داده مورد نیاز نیز کم می‌باشد، می‌توان دریافت که پشته TCP/IP مناسب نمی‌باشد.

---

<sup>۱</sup> Protocol Data Unit (PDU)

<sup>۲</sup> البته هرچند می‌توان از اتصال بی‌سیم نیز برای برپاسازی شبکه بهره برد که هزینه کمتری دارد، اما اتکاپذیری، امنیت و سرعت اتصال سیمی به طور کلی بیشتر می‌باشد و این نکته می‌تواند در برخی کاربردها تعیین‌کننده باشد.

## فصل دوم

### معرفی مسئله



## معرفی مسئله

در این فصل نخست اهمیت روزافزون به کارگیری شبکه‌های رایانه‌ای و اینترنت اشیا<sup>۱</sup> در صنایع گوناگون را بررسی کرده، سپس به چالش‌های پیش‌رو صنایع برای پیاده‌سازی شبکه‌های رایانه‌ای متداول در حوزه کاریشان می‌پردازیم. در نهایت درباره ارتباطات خط برق<sup>۲</sup> صحبت خواهد شد و این‌که چگونه خواهد توانست برخی از این چالش‌ها و مشکلات پیاده‌سازی شبکه را برطرف نماید.

### ۲-۱- اهمیت روزافزون اینترنت اشیا

امروزه بسیاری از شرکت‌ها و صنایع رو به خودکارسازی و سامانه‌های نظارت بر روند ساخت و تولید روی آورده‌اند، چرا که امکان نظارت گسترده، بی‌درنگ و کم‌هزینه، پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیندها را فراهم می‌آورد و که به طور خلاصه باعث کاهش قابل توجه هزینه‌ها می‌گردد [۷].

این افزایش بهره‌وری تا اندازه‌ای است که برپایه برآوردها استفاده از اتوماسیون تا سال ۲۰۲۷ به واسطه ایجاد صرفه جویی در هزینه‌ها، باعث افزایش ۱۴۸.۶ میلیارد دلاری درآمد صنایع می‌گردد. از این رو تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه رشد بی‌سابقه را تجربه خواهد کرد و تخمین زده می‌شود تا پایان سال ۲۰۲۲ شمار دستگاه‌های اینترنت اشیا به ۲۹ میلیارد عدد برسد. انگیزه ۵۴ درصد از پروژه‌های اینترنت اشیا که در صنایع به منظور کاهش هزینه‌ها می‌باشد، از این رو به کارگیری اینترنت اشیا در صنایع می‌تواند توان رقابتی آن‌ها را افزایش دهد، به طوری که ۲۳ درصد از شرکت‌های چینی به این منظور از اینترنت اشیا بهره می‌برند [۸]. از این رو بیش از ۸۰ درصد از مدیران اجرایی صنایع بر این باورند که اینترنت اشیا برای برخی یا همه خط‌های تولیدشان ضروری است. و ۵۸ درصد از تولیدکنندگان باور دارند که این فن‌آوری تبدیل به یک ضرورت راهبردی برای عملیات‌های صنعتی شده است و در نهایت ۸۳ درصد از سازمان‌هایی که فن‌آوری یادشده را پیاده‌سازی کرده‌اند اعلام کرده‌اند که بهبود قابل توجهی را در کارایی تجربه کرده‌اند [۸].

<sup>۱</sup> IoT

<sup>۲</sup> Powerline Communication

در نتیجه به نظر می‌رسد که حرکت به سوی اینترنت اشیا و پیاده‌سازی آن در صنایع مختلف یک ضرورت گریز ناپذیر گشته است و شرکت‌هایی که در این راه دیر اندیشه و عمل کنند، از نظر راهبردی و رقابتی به طور قابل توجهی از دیگر رقبای خود عقب می‌افتند.

## ۲-۲- چالش‌ها و مشکلات پیش‌رو پیاده‌سازی شبکه

اما این حرکت به سوی اینترنت اشیا ساده نخواهد بود و چالش‌های گوناگون بر حسب کاربردهای مورد نیاز ممکن است روبه‌روی شرکت‌ها قرار گیرد. که در ادامه به آن می‌پردازیم.

### ۲-۲-۱- امنیت شبکه اشیا

به طور کلی دستگاه‌های اینترنت اشیا متصل به شبکه در بازه پنج دقیقه‌ای اتصال به شبکه مورد حمله قرار می‌گیرند. این حملات در سال ۲۰۱۸ به شدت افزایش یافت به طوری که در سال ۲۰۱۹ به بیش از ۳۰۰ درصد رسید. با این وجود ۴۸ درصد از شرکت‌ها اقرار می‌کنند که نمی‌توانند نقص‌های امنیتی در شبکه خود را شناسایی کنند [۸].

از این رو در نظر گرفتن پشته‌های شبکه‌ای که بتوانند نیازمندی‌های امنیتی را پوشش دهند، از همان آغاز طراحی سامانه ضروری به نظر می‌رسد چراکه پس از پیاده‌سازی تغییر و اصلاح شبکه نیازمند هزینه‌های هنگفت است. این امر به ویژه زمانی قابل توجه می‌شود که ۷۴ درصد از مشتریان نگران ازدست دادن حریم خصوصی و آزادی‌های شهروندی خود هستند که موجب فشار افزوده بر شرکت‌ها برای در نظر گرفتن روش‌های ایمن در پیاده‌سازی شبکه خود شده است [۸].

### ۲-۲-۲- سربار و کارایی

برای بررسی سربار و کارایی پیاده‌سازی شبکه‌های گوناگون بهتر است نخست به تحلیل نیازمندی‌های شبکه بسته به کاربردها بپردازیم. به عنوان مثالی رایج، سامانه‌های اتوماسیون ساختمان و نظارت بر توان مصرفی را بررسی می‌کنیم. به طور کلی این دو سامانه پهنای باند و نیازمندی‌های شبکه‌ای پایینی دارند که جزئیات هریک در جدول‌های ۱-۲ و ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۱: مشخصات شبکه در سامانه‌های ساختمان هوشمند [۹]

نام خدمات	اندازه شبکه	پوشش شبکه	نرخ ترافیک	جهت ترافیک	نیاز به کیفیت خدمات <sup>۱</sup>
نظارت وضعیت ساختمان	کوچک (ده دستگاه) تا متوسط (۱۰۰ دستگاه)	کوچک (چند ده متر)	یکنواخت؛ یک پیام در هر دقیقه به ازای هر دستگاه	دوطرفه	کم؛ تاب‌آوری تاخیر یک دقیقه
کنترل نور			نایکنواخت؛ نادر		زیاد؛ تاب‌آوری تاخیر سه ثانیه
کنترل آب و هوا			یکنواخت؛ یک پیام هر ۱۵ دقیقه به ازای هر دستگاه		زیاد؛ تاب‌آوری تاخیر پنج ثانیه
ابزارهای هوشمند			نایکنواخت؛ نادر		زیاد؛ تاب‌آوری تاخیر سه ثانیه
نظارت برای امنیت و ایمنی			یکنواخت؛ رایج		متوسط؛ تاب‌آوری تاخیر سه ثانیه؛ زیاد برای هشدارها
سرگرمی			نایکنواخت؛ رایج		زیاد؛ تاب‌آوری تاخیر چند صد میلی ثانیه

<sup>۱</sup> Quality of Service

جدول ۲-۲: مشخصات شبکه در سامانه‌های مدیریت انرژی [۹]

نام خدمات	اندازه شبکه	پوشش شبکه	نرخ ترافیک	جهت ترافیک	نیاز به کیفیت خدمات
مدیریت توان خانگی ۱	کوچک (ده دستگاه)	کوچک (چند ده متر)	یکنواخت؛ یک پیام در هر دقیقه به ازای هر دستگاه	دوطرفه	زیاد؛ تاب‌آوری تاخیر پنج ثانیه
زیرساخت پیشرفته اندازه-گیری ۲	متوسط (۱۰۰ دستگاه) تا بزرگ (۱۰۰۰ دستگاه)	متوسط (چند ۱۰۰ متر)	یکنواخت؛ یک پیام در هر ساعت به ازای هر دستگاه		متوسط؛ تاب-آوری تاخیر ۱۵ ثانیه
مدیریت پاسخ به نیاز ۳	بزرگ (۱۰۰۰ دستگاه)	بزرگ (چند ده کیلومتر)	نایک‌نواخت؛ نارایج، یک پیام به ازای هر دستگاه در همه پخشی ۴		کم؛ تاب‌آوری تاخیر یک دقیقه
حفاظت و کنترل گستره پهناور			یکنواخت؛ یک پیام هر ۱۰ تا ۱۰۰ میلی ثانیه به ازای هر دستگاه		زیاد؛ تاب‌آوری تاخیر سه ثانیه

بر پایه جزئیات نیازمندی‌های شبکه این دو سامانه که در بالا آورده شده است، می‌توان کران بالا و پایین گزیده‌ی و جزئیات کارایی استفاده از پشته TCP/IP برای این سامانه‌ها را محاسبه کرد.

در این سامانه‌ها هر پیام لایه کاربرد را می‌توان به دو دسته: (۱) انتقال داده حسگر (۲) انتقال فرمان بخش‌بندی کرد. دسته اول نیازمند یک بایت ابرداده<sup>۵</sup>، یک بایت شناسه دستگاه برده<sup>۶</sup>، یک بایت شناسه حسگر و دو بایت داده حسگر می‌باشد که روی هم این دسته از پیام‌ها طول میانگین برابر با پنج بایت دارد.

1 Home Energy Management (HEM)

2 Advanced Metering Infrastructure (AMI)

3 Demand Response Management (DRM)

4 Broadcast

5 Metadata

6 Slave

دسته دوم نیز نیازمند یک بایت ابر داده، یک بایت شناسه دستگاه برده، یک بایت شناسه عملگر و دو بایت نیز برای کیفیت فرمان عملگر که روی هم برابر با پنج بایت خواهد شد. به طور میانگین برای محاسبه کران بالا می توان گفت هر دستگاه در هر ۱۵ ثانیه یک پیام حسگر ارسال و یک پیام فرمان دریافت می کند و روی هم رفته ۱۰۰ دستگاه داریم؛ در این صورت کران بالای گذردهی کل بر اساس رابطه ی ۱-۲ بدست می آید:

$$Throghput = \frac{Number\ of\ packets \times Packet\ Length}{Seconds} \quad \text{رابطه ۱-۲}$$

$$Throghput_{Sensors} = \frac{100 \times 5bytes}{15s} \cong 33.4 \frac{bytes}{sec}$$

$$Throghput_{Commands} = \frac{100 \times 5bytes}{15s} \cong 33.4 \frac{bytes}{sec}$$

$$Throghput_{total} = Throghput_{Sensors} + Throghput_{Commands} \\ \cong 66.8 \frac{bytes}{sec}$$

از آن جا که در پشته TCP/IP ۲۰ بایت در لایه انتقال و ۲۰ بایت در لایه شبکه به پیام افزوده می شود در نتیجه دست کم ۴۰ بایت سربار به ازای هر پیام خواهیم داشت که بر این اساس کارایی انتقال پیام بر اساس رابطه ۲-۲ به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$Efficiency = \frac{Data\ bytes}{Data\ bytes + Header\ bytes\ (Metadata)} \times 100 \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

$$Efficiency = \frac{5bytes}{5bytes + 40bytes} \times 100 \cong 10.0 \text{ درصد}$$

همچنین گذردهی شبکه TCP/IP دست کم برابر با یک مگابیت بر ثانیه می باشد اما با وجود نیازمندی کم این سامانه در صورت استفاده از این پشته نرخ بهره وری به شدت پایین می آید [۱۰].

با توجه به این توصیفات به نظر می رسد که پشته رایج برای اتصال رایانه ها (TCP/IP) گزینه مناسبی برای برقراری اتصال شبکه در سامانه های اینترنت اشیا نمی باشد. و باید از پشته هایی با کارایی و بهره وری بالاتر استفاده کرد.

## ۲-۳- هزینه پیاده‌سازی

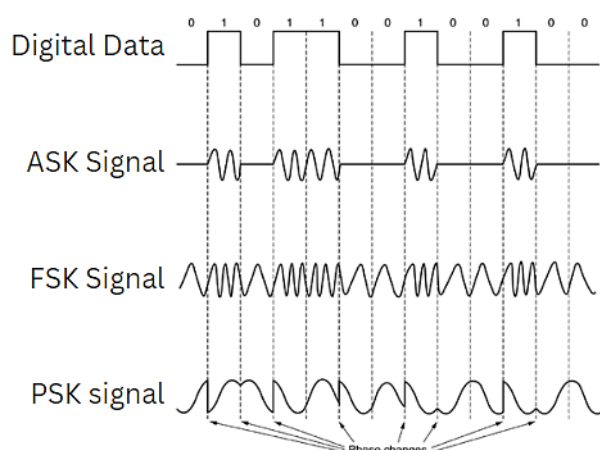
با وجود تلاش‌ها برای پیاده‌سازی فن‌آوری اینترنت اشیا، اما بسیاری از صنایع زیرساخت‌های لازم برای شبکه را پیش از ساخت تأسیسات تدبیر نکرده‌اند. از این رو هزینه نصب زیرساخت برای اتصال دستگاه‌های شبکه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با این وجود ممکن است بتوان با بهره‌گیری از اتصال بی‌سیم این هزینه‌ها را کاهش داد. اما گاهی موانعی بر سر راه استفاده از اتصال بی‌سیم وجود دارد که به صورت زیر باشند:

- (۱) چنانچه تأسیسات دارای دیوارهای ضخیم یا طبقه‌های زیرزمینی داشته باشد. در این صورت اتصال بی‌سیم کاربری پایینی خواهد داشت.
- (۲) چنانچه سطح محرمانگی بالاتری نیاز باشد به طوری که نمی‌بایست داده‌ها به صورت بی‌سیم جابه‌جا گردند.
- (۳) چنانچه امواج الکترومغناطیسی اثر ناخواسته‌ای بر روی دستگاه‌های دیگر بگذارد، مانند بیمارستان‌ها

## ۲-۳- ارتباطات خط برق

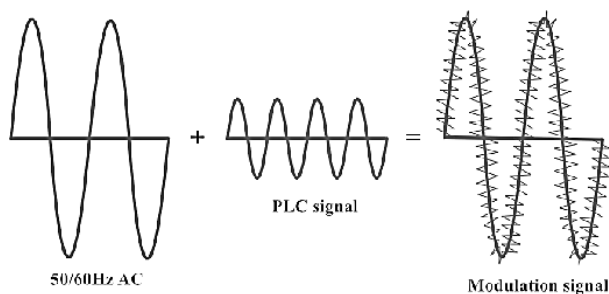
یکی از روش‌های ارسال داده‌های دیجیتال تبدیل آن‌ها به سیگنال‌های آنالوگ می‌باشد که به این روش مدولاسیون دیجیتال به آنالوگ گفته می‌شود و وارون این عملیات دمدولاسیون نام دارد. مدولاسیون به طور کلی از فرکانس‌هایی پایه برای انتقال داده‌های دیجیتال استفاده می‌کند که به آن‌ها فرکانس‌های حامل گفته می‌شود [۲].

با استفاده از مدولاسیون امکان حضور همزمان چندین سیگنال بر روی یک رسانه فراهم می‌گردد. این سیگنال‌ها می‌توانند به تمامی سیگنال‌های داده باشند یا سیگنال برق را نیز دربر بگیرند [۲]. از این رو با بهره‌بردن از مدولاسیون این امکان فراهم می‌گردد که بتوان بر روی خط برق داده نیز ارسال کرد.

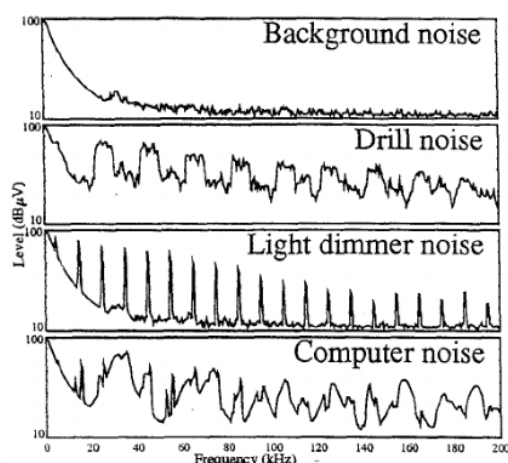


شکل ۲-۱: روش‌های پایه مدولاسیون داده دیجیتال [۲]

البته به دلیل برخی از ویژگی‌های سیم‌های برق نظیر: کابل و اتصال‌های کیفیت پایین، منتشر شدن نویز دستگاه‌های متصل مانند: جاروبرقی، لامپ‌ها و یخچال بر روی خط برق، بازتاب امواج الکترومغناطیسی بر روی آن به طوری ذاتی محیط چالش برانگیزی برای انتقال داده می‌باشد. که البته می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های مقاوم در برابر نویز مانند PSK و FSK، کاهش فرکانس حامل و استفاده از مکانیسم‌های شناسایی خطا با این چالش به مقابله پرداخت [۱۱].



شکل ۲-۲: روش کلی ارتباطات خط برق [۱۱]



شکل ۲-۳: نمودار نویز منتشر شده بر روی خط برق توسط برخی دستگاه‌ها [۱۲]

همان‌گونه که در شکل ۲-۳ مشخص شده‌است، روش کلی این فن‌آوری قراردادن سیگنال داده بر روی موج AC می‌باشد. لازم به ذکر است که می‌توان چندین سیگنال داده را به طور همزمان بر روی خط برق قرار داد و یا به عبارتی چندین کانال داده داشت که هر کدام از آن‌ها فرکانس حامل متفاوتی دارند. به این ترتیب می‌توان گذردهی رسانه را افزایش داد.

## ۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا اهمیت گریز ناپذیر به کارگیری اینترنت اشیا در صنایع و کارخانه‌ها را مورد بررسی قرار دادیم. سپس به چالش‌ها و مشکلات پیش‌روی پیاده‌سازی و به کارگیری این فن‌آوری پرداختیم. در نهایت با ارتباطات خط برق آشنا شدیم و این‌که این فناوری چگونه می‌تواند در برخی از کاربردها چالش‌های پیش‌رو را حل کند و مناسب‌ترین گزینه باشد.



## فصل سوم

### روش پیشنهادی

## روش پیشنهادی

در فصل پیش رو اجزای کلی کارت واسط شبکه پیشنهادی برای ایجاد شبکه اشیا برشمرده می شود و جزئیات پیاده سازی در فصل ۴ پوشش داده می شود. قابلیت هایی که مدولاسیون خط برق برای ما فراهم می کند برای برطرف کردن چالش های یادشده در فصل پیشین چشمگیر است. اما همچنان تلاش های بیشتری باید صورت گیرد تا بتوان بر بستر آن روشی اتکا پذیر ساخت. چرا که در یک شبکه عملیاتی ممکن است حالت های گوناگونی رخ دهد که برای هر یک باید اقدام متناسبی صورت گیرد. از جمله این حالت ها می توان موارد زیر را برشمرد:

۱. برخورد سیگنال های ارسال شده از دو یا چند مودم (نیاز به شناسایی و مدیریت برخورد سیگنال ها بر روی رسانه)
  ۲. رخ دادن خطا در داده های ارسالی در هنگام ارسال، بر روی خط برق یا دریافت (نیاز به مکانیسم شناسایی خطا و بازفرستادن داده)
  ۳. ایمن نبودن رسانه و نگرانی از نشت اطلاعات (نیاز به فراهم کردن نوعی از رمزگذاری داده ها)
  ۴. وجود چندین دستگاه متصل به خط (نیاز به تخصیص شناسه یکتا به هر کدام)
- حالت های یک، دو و چهار در لایه پیوند و دو و سه در لایه انتقال از پشته شبکه مدیریت می شوند. از آن جا که همبندی<sup>۱</sup> شبکه در خط برق را می توان خطی<sup>۲</sup> در نظر گرفت از این رو شبکه تک سطحی خواهد بود. در نتیجه مفاهیم مسیریابی<sup>۳</sup> و هدایت<sup>۴</sup> وجود نخواهد داشت زیرا هر یک از دستگاه ها به طور مستقیم با همه دستگاه های دیگر در ارتباط است. پس در این مدل اتصال، لایه شبکه وجود ندارد.
- با توجه به توضیحات بالا ضرورت پیاده سازی کارت واسط شبکه که لایه های مورد نیاز از پشته شبکه را پیاده سازی می کند مشخص می شود.

---

<sup>1</sup> Topology

<sup>2</sup> Bus

<sup>3</sup> Routing

<sup>4</sup> Forward

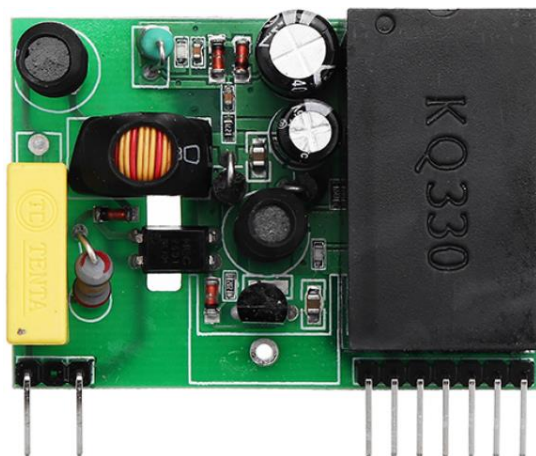
### ۱-۳- کارت واسط شبکه خط برق<sup>۱</sup>

کارت‌های شبکه وظیفه متصل کردن رایانه‌ها به شبکه را دارند. کارت شبکه خط برق نیز با پیاده‌سازی بخش‌های مورد نیاز از پشته شبکه، وظیفه متصل کردن دستگاه‌های مختلف به یکدیگر از طریق خط برق را بر عهده دارد. کارت شبکه پیشنهادی دربردارنده یک مودم خط برق<sup>۲</sup> و یک میکروکنترلر خواهد بود.

#### ۱-۱-۳- مودم خط برق KQ130-F

مودم خط برق وظیفه دارد داده‌های دیجیتال دریافتی از میکروکنترلر را به سیگنال‌های آنالوگ تبدیل کرده و بر روی خط برق قرار دهد. در همین هنگام دیگر مودم‌های متصل، سیگنال‌های آنالوگ را دریافت می‌کنند و در فرآیند دمدولاسیون آن‌ها را به داده‌های دیجیتال اصلی باز می‌گردانند. پس از آن داده دیجیتال را به میکروکنترلر ارسال می‌کنند و میکروکنترلر نیز در نهایت آن را برای دستگاه ارباب<sup>۳</sup> می‌فرستد.

مودم خط برق پیشنهادی KQ130-F می‌باشد که از مدولاسیون FSK استفاده می‌کند [۱۳]. این مودم از طریق پروتکل UART با میکروکنترلر در ارتباط می‌باشد. فرکانس سیگنال UART مورد نیاز برای ارتباط با مودم برابر با 9600 هرتز می‌باشد. بیت تقارن به کار برده نمی‌شود و شمار بیت‌های پایان برابر با یک می‌باشد [۱۴].

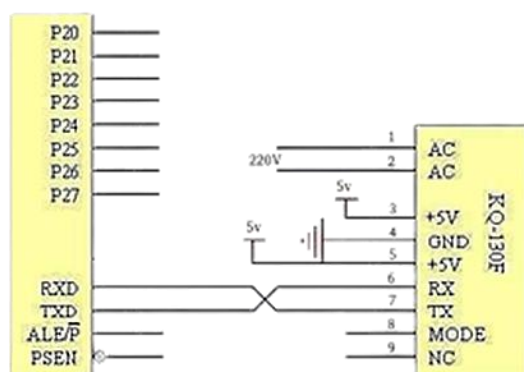


تصویر ۱-۳: نمایی از ماژول KQ130-F

<sup>1</sup>Powerline Network Card Interface (plNIC)

<sup>2</sup> Powerline Modem

<sup>3</sup> Master Device



تصویر ۳-۲: شماتیک شیوه اتصال مودم KQ۱۳۰-F به میکروکنترلر

این مودم دو مد کارکردی دارد، که با قرار دادن مقدار صفر و یا یک منطقی (یا Hi-Z) بر روی پایه MODE مشخص می‌گردد. در صورتی که پایه MODE مقدار یک منطقی داشته یا رهاسده باشد، بایتهای داده ارسالی را به همان شکل که هستند برای مودم ارسال می‌شوند. ولی اگر پایه یادشده بر روی صفر منطقی باشد نیاز است که پیش از ارسال بایتهای، تعداد آنها برای مودم مشخص شود. برای مثال برای فرستادن رشته کاراکتری "Hello World!" باید رشته بایتی "0c 48 65 6c 6c 6f 20 57 6f 72 6c 64 21" را بر روی پایه TX میکروکنترلر قرار داد که مقدار 0c یا ۱۲ مشخص کننده شمار بایتهای ارسالی می‌باشد [۱۴].

### ۳-۱-۲- میکروکنترلر STM32F030C8T6

برای به کار بردن مودم نیاز به یک میکروکنترلر هستیم که در نقش واسط به مدیریت مودم بپردازد. میکروکنترلر داده‌های دریافتی از دستگاه ارباب را بافر کرده و با فرمت مدنظر مودم برای آن ارسال می‌نماید. از سوی دیگر بایتهای دریافتی از مودم را بافر می‌کند و سپس بایتهای داده را از آن جدا می‌کند و برای دستگاه ارباب می‌فرستد.

این میکروکنترلر از ۶ کیلو بایت رم برخوردار است که توانایی خوبی را در مدیریت و بافر کردن داده‌های ارسالی و دریافتی به آن می‌دهد.

### ۳-۲- گرداننده<sup>۱</sup> کارت واسط شبکه خط برق

کارت واسط شبکه پیشنهادی نیاز به یک برنامه در دستگاه ارباب دارد تا به درستی با کارت واسط ارتباط برقرار کرده و اقدام به فرستادن و دریافت داده بکند. در ادامه به جزئیات این پشته شبکه بیشتر پرداخته می‌گردد.

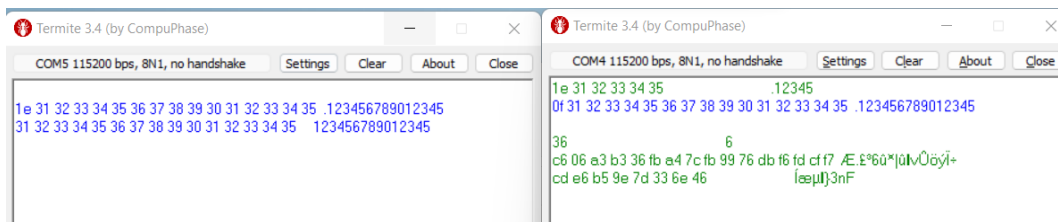
### ۳-۳- پشته شبکه طراحی شده

مجموعه برنامه گرداننده و کارت واسط شبکه پیشنهادی، لایه‌های موردنیاز از پشته شبکه را پیاده‌سازی می‌کنند. که در ادامه به کارکردهای مورد نیاز از هر لایه که باید در طرح پیشنهادی پیاده گردد، می‌پردازیم.



### ۳-۳-۱- لایه پیوند

از آنجا که همبندی شبکه در ارتباط خط برق به صورت خطی می‌باشد، در نتیجه احتمال برخورد سیگنال‌های ارسالی از سوی دستگاه‌های گوناگون وجود دارد، زیرا همه دستگاه‌ها از یک رسانه مشترک استفاده می‌کنند و باید سازوکاری برای مدیریت دسترسی به رسانه<sup>۲</sup> به کار برده شود [۲].

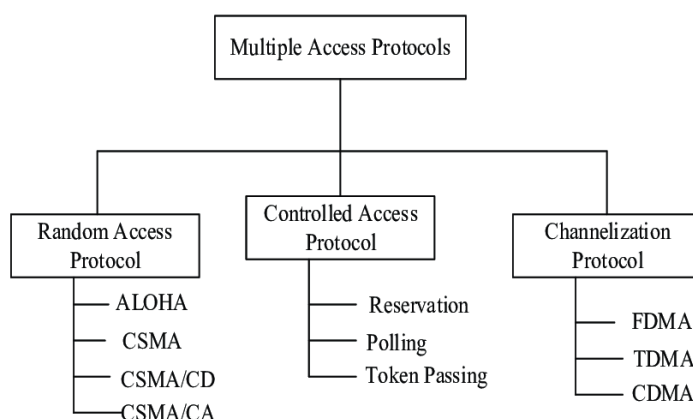


شکل ۳-۳: نمونه‌ای از نتیجه برخورد که باعث خطا در داده‌های دریافتی (سبز رنگ) می‌شود

<sup>۱</sup> Driver

<sup>۲</sup> Media Access Control

روش‌هایی که در مدیریت دسترسی رسانه به کار برده می‌شود را می‌توان به سه دسته در نظر گرفت. دسته اول روش‌های تصادفی که در آن‌ها هر یک از دستگاه‌ها بدون داشتن دانشی از حضور و تلاش‌های دیگر دستگاه‌ها اقدام به فرستادن داده می‌کند. دسته دوم روش‌های برپایه نوبت‌دهی پویا که در این روش‌ها یک دستگاه‌ها چنانچه داده‌ای برای فرستادن داشته باشند می‌توانند در فرصتی که برای به دست آوردنش رقابت کرده یا به نوبت به دست می‌آورند داده‌ی خود را ارسال نمایند. دسته سوم نیز روش‌های تقسیم ایستای رسانه انتقال داده میان دستگاه‌ها می‌باشد که گاهی اتلاف منابع زیادی را در بر خواهد داشت [۱۵].



شکل ۳-۴: دسته‌بندی انواع روش‌های مدیریت دسترسی رسانه

همچنین از آنجا که بستر خط برق به تنهایی اتکاپذیر نیست، نیاز می‌باشد که سازوکارهایی برای شناسایی خطا و آگاه کردن فرستنده از رخداد خطا و بازفرستادن داده تعیین گردد. به این سازوکارها به طور کلی بازفرستی خودکار می‌گویند.

همچنین باید شناسه‌ای به هر یک از دستگاه‌های همبند تخصیص یابند که بتوان قاب‌ها را به درستی از فرستنده فرستاد و دستگاه گیرنده، به قاب ارسالی پاسخ دهد.

### ۳-۳-۲- لایه انتقال

پس نیاز قاب‌بندی داده در لایه پیوند روشن شد. اما این قاب‌بندی از آنجا که محدودیت بیشینه طول قاب را به پیام ارسالی اعمال می‌کند از این رو نمی‌توان داده‌هایی را با اندازه‌ای بزرگتر از طول قاب فرستاد. برای حل این مهم نیاز است که تکه‌تکه سازی پیامی که از لایه کاربرد به لایه انتقال داده می‌شود، در این لایه پیاده‌سازی شود. ممکن است در الگوریتم پیاده‌سازی تکه‌تکه کردن نیز یک محدودیت حداکثر طول وجود

داشته باشد و هر چند به ندرت گاهی پیام‌های لایه کاربرد بزرگتر از این مقدار باشند که در این صورت خود لایه کاربرد باید آن را مدیریت کند.

یکی دیگر از دغدغه‌ها در رابطه با این شبکه، خطر شنود داده می‌باشد. زیرا هر کس که به طور فیزیکی این امکان را ( هر چند نامحتمل) بیاید که به سیم برق دسترسی پیدا کند، می‌تواند با یک مودم مناسب سیگنال‌ها را بر روی فرکانس‌های به کار رفته دریافت کرده و با بررسی و به دست آوردن روش مدولاسیون به کار رفته، به اطلاعات دادوستد شده در شبکه دسترسی یابد. از این رو باید یک روش رمزنگاری مناسب نیز در لایه انتقال تدبیر گردد.

### ۳-۴- جمع‌بندی

در این فصل تلاش کردیم رویکرد کلی را در راه‌حلی توضیح دهیم که برای مشکلات پیش‌رو در پیاده‌سازی شبکه‌های اینترنت اشیا پیشنهاد شد. اینکه چگونه می‌توان پشته شبکه‌ای را بر بسته خط برق به جای پشته TCP/IP ارائه داد که هم اتکاپذیری مناسب را ارائه دهد و هم مشکلات یادشده در کاربردهای صنایع را بهبود بخشد. در فصل بعدی به بررسی جزئیات این راه پیشنهادی می‌پردازیم.

## فصل چهارم

### پیاده‌سازی و ارزیابی



## پیاده‌سازی و ارزیابی

در این فصل روند طراحی و پیاده‌سازی برد کارت شبکه خط برق و گرداننده‌ی آن بررسی می‌شود. از آنجا که پروژه دارای بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری می‌باشد، ناهمگون است و روند طراحی، پیاده‌سازی و آزمون و خطا اندکی دشوارتر از زمانی می‌باشد که کل سامانه نرم‌افزاری یا سخت‌افزاری باشد زیرا تعامل میان سخت‌افزار و نرم‌افزار مهم می‌گردد و وجود نویز در مدار، اتصالی در بخشی از مدار و اتصالات و یا آسیب دیدگی قطعات مدار می‌تواند با وجود پیاده‌سازی صحیح نرم‌افزار منجر به سردرگمی گردد.

### ۴-۱- پیاده‌سازی

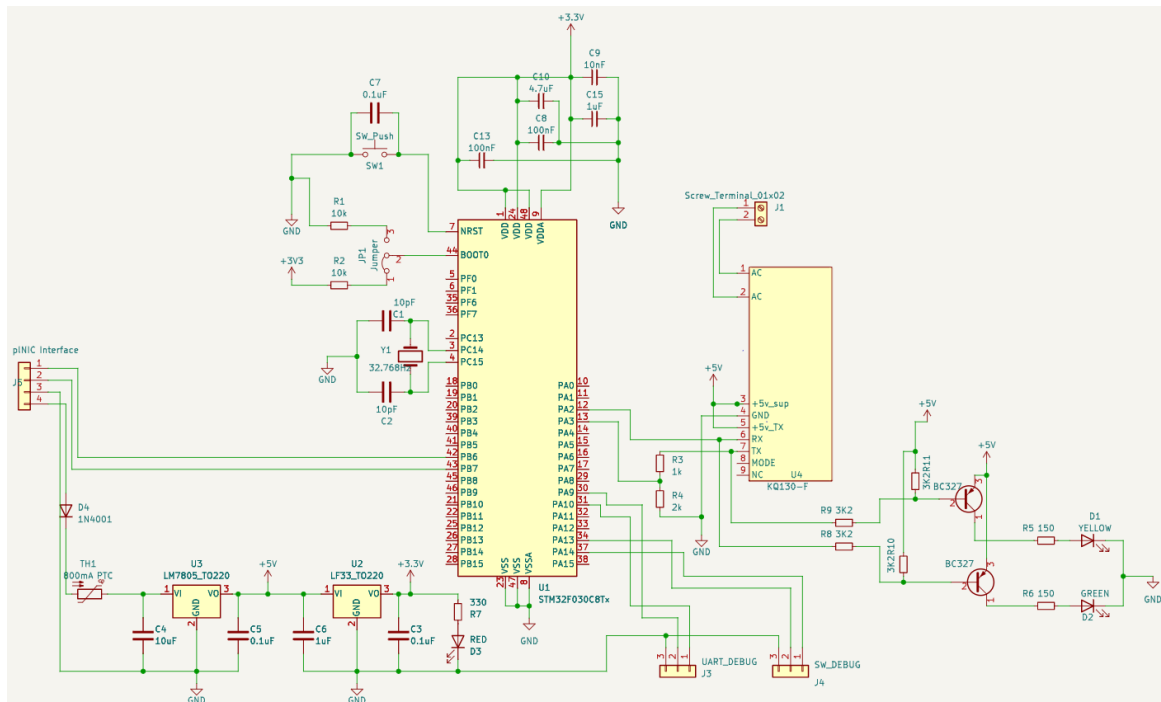
در این بخش نخست در رابطه با کارت شبکه خط برق صحبت خواهد شد اینکه طراحی مدار به چه صورت بوده و سپس در رابطه با شیوه پیاده‌سازی نرم‌افزار آن و اینکه از چه بستری برای توسعه برنامه آن استفاده شد، صحبت می‌شود. سپس در رابطه با بستر پیاده‌سازی گرداننده کارت شبکه و اجزای نرم‌افزاری آن صحبت خواهد شد.

#### ۴-۱-۱- کارت شبکه خط برق

کارت شبکه برق به طور کلی از دو بخش برد فیزیکی و نرم‌افزار آن تشکیل شده است که در ادامه به شماتیک مدار، نرم‌افزار به کار رفته برای طراحی شماتیک و تدبیرهای در نظر گرفته شده در شماتیک می‌پردازیم و سپس به سراغ نرم‌افزار کارت شبکه خواهیم رفت.

#### ۴-۱-۱-۱- شماتیک و قطعات مدار

در قسمت به بخش‌های مختلف مدار مانند تغذیه، ال‌ای‌دی‌های دریافت و ارسال داده، تدبیرهای ایمنی و پیشگیری از نویز به کار رفته در مدار می‌پردازیم.



شکل ۴-۱: نمودار شماتیک مدار کارت شبکه

شماتیک مدار که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است با نرم‌افزار متن‌باز طراحی شماتیک و شبیه‌سازی KiCad طراحی شده است. در ادامه به توضیح بخش‌های گوناگون شماتیک می‌پردازیم.

#### ۴-۱-۱-۱-۱-۱-۱ بخش تغذیه

از آنجا که مودم KQ130-F تغذیه پنج ولت نیاز دارد [۱۴]، از رگولاتور LM7805 با بسته بندی دیپ<sup>۱</sup> استفاده شده است که سه پایه دارد. (U3) این رگولاتور می‌تواند بیشینه جریان ۱.۵ آمپر در سطح ولتاژ پنج ولت فراهم کند. که البته برای کارکردن با بیشینه جریان نیاز به یک گرماپخش‌کن<sup>۲</sup> می‌باشد. کمترین ولتاژ ورودی برابر با ۷.۵ ولت و بیشینه ولتاژ ورودی ۱۶ ولت می‌باشد [۱۶].

همچنین میکروکنترلر STM32 نیز نیاز به تغذیه ۳.۳ ولت دارد که برای فراهم کردن آن از رگولاتور LF33 استفاده شده است که بسته‌بندی آن دیپ می‌باشد. (U2) کمترین ولتاژ ورودی آن برابر با ۳.۸ ولت می‌باشد. و بیشینه جریانی که فراهم می‌کند برابر با ۵۰۰ میلی آمپر می‌باشد [۱۷].

<sup>۱</sup> DIP

<sup>۲</sup> Heat Sink

برای پیشگیری از آسیب رسیدن به قطعه‌ها در صورت اتصال وارونه پایانه‌های اصلی تغذیه از دیود یکسو کننده بر سر راه تغذیه اصلی استفاده شده است. (D4) از این رو چنانچه به تصادف پایانه‌ها وارونه بسته شوند جریان بسیار کمی از مدار گذر خواهد کرد و به قطعات آسیب نخواهد رسید.

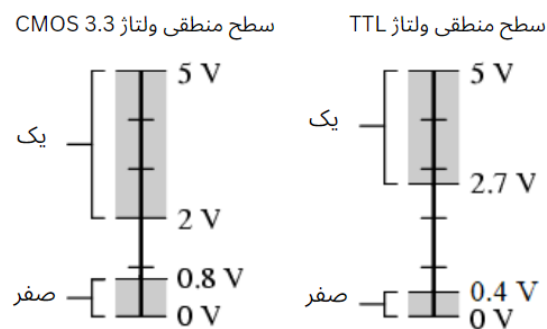
#### ۴-۱-۱-۱-۲- مدار نمایانگر دریافت و ارسال داده

برای ایرادیابی و نمایش وضعیت کارت شبکه در هر لحظه دو چراغ ال‌ای‌دی در نظر گرفته شده است که یکی از آن‌ها برای نمایش دریافت بایت‌های ورودی (رنگ سبز) و دیگری برای نمایش بایت‌های ارسالی می‌باشد. (رنگ زرد) این دو ال‌ای‌دی در شماتیک قطعه‌های D1 و D2 می‌باشند. برای گرداندن این چراغ‌ها نمی‌توان به طور مستقیم خط‌های سیگنال را استفاده کرد زیرا می‌تواند منجر به آسیب رساندن به پایه‌های سیگنال داده شود.

از این رو از ترانزیستورهای PNP با شماره BC327 استفاده شده است که در شماتیک قطعات مشخص شده‌اند. پایه امیتر<sup>۱</sup> این ترانزیستورها به یک منطقی متصل شده است که با یک منطقی سیگنال داده که به پایه بیس<sup>۲</sup> ترانزیستور متصل شده، برابر می‌باشد.

#### ۴-۱-۱-۱-۳- اتصال میکروکنترلر و مودم

همانگونه که در فصل پیش گفته شده مودم KQ130-F از ارتباط UART استفاده می‌کند. اتصال‌ها در این ارتباط ساده است پایه Rx به پایه Tx متصل میگردد و پایه Tx به پایه Rx متصل میگردد.



شکل ۴-۲: سطح منطقی ولتاژ در هر یک از تکنولوژی‌های به کار رفته

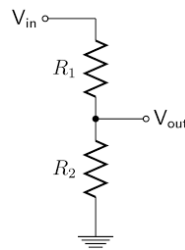
<sup>۱</sup> Emitter

<sup>۲</sup> Base

همانگونه که در تصویر ۰-۱ مشخص است با وجود اختلاف در سطح ولتاژ منطقی در مودم (سمت راست) و میکروکنترلر (سمت چپ) مشخص است که دو دستگاه می‌توانند به بدون مشکل از نظر تفسیر سطوح منطقی با یکدیگر صحبت بکنند.

تنها مسئله‌ای که باید به آن توجه شود اختلاف ولتاژ سطح‌های منطقی مودم و میکروکنترلر می‌باشد که در اولی سطح منطقی یک برابر با پنج ولت می‌باشد و در دومی سطح منطقی یک برابر با ۳.۳ ولت می‌باشد. این در اتصال Tx میکروکنترلر به Rx مودم اشکالی ایجاد نمی‌کند ولی در اتصال Rx میکروکنترلر به Tx مودم ممکن است که پایه میکروکنترلر آسیب ببیند زیرا ولتاژ در حالت بیکار<sup>۱</sup> برابر با پنج ولت می‌باشد و ممکن است پایه ۳.۳ ولتی میکروکنترلر آن را تحمل نکرده و آسیب ببیند.

از این رو از تقسیم‌کننده ولتاژ مقاومتی استفاده شد که مفهوم آن ساده است و اساس آن افت ولتاژ سیگنال به هنگام گذر از مقاومت می‌باشد.



شکل ۴-۳: شماتیک مدار تقسیم‌کننده ولتاژ

تصویر ۴-۳ مدار کلی تقسیم‌کننده مقاومتی ولتاژ را نشان می‌دهد و با توجه به این مدار و رابطه ۴-۱ ولتاژ خروجی تقسیم‌کننده ( $V_{out}$ ) به دست می‌آید.

$$V_{out} = \frac{V_{in} \times R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

در مدار تقسیم‌کننده مقاومتی ولتاژ برای  $R_1$  مقدار یک کیلو اهم و برای  $R_2$  مقدار دو کیلو اهم در نظر گرفته شده است. که در این صورت اگر  $V_{in}$  برابر با پنج ولت باید  $V_{out}$  طبق رابطه ۴-۱ بدست می‌آید:

$$V_{out} = \frac{5v \times 2k}{2k + 1k} \cong 3.34v$$

<sup>۱</sup> Idle

در نتیجه با این مدار تقسیم‌کننده پنج ولت به ۳.۳۴ ولت تبدیل می‌شود که به خوبی برای پایه میکروکنترلر مناسب می‌باشد.

#### ۴-۱-۱-۲- نرم‌افزار میکروکنترلر

نرم‌افزار میکروکنترلر به زبان سی‌پلاس‌پلاس/سی<sup>۱</sup> و بر بستر STM32CubeMX نوشته شده است. این چهارچوب<sup>۲</sup> نرم‌افزاری متن باز توسط شرکت STM32 برای میکروکنترلرهای خود فراهم شده و در آن کتابخانه‌های<sup>۳</sup> پایه برای کار با واحدهای سخت‌افزاری مانند UART، TWI، ADC پیاده‌سازی شده است. همچنین در محیط توسعه STM32CubeIDE امکان به کار بردن واحدهای نرم‌افزاری نیز فراهم شده است مانند رمزنگاری WolfSSL و کتابخانه‌های گرافیکی [۱۸].

در پیاده‌سازی نرم‌افزار میکروکنترلر از وقفه‌های سخت‌افزاری برای ارسال داده‌ها به و دریافت داده‌ها از USART استفاده شد. به این صورت که هرگاه داده‌ی تازه‌ای دریافت شود در ثبات داده دریافتی (USART\_RDR) قرار داده می‌شود و به طور خودکار پرچم خالی نبودن ثبات داده ورودی (RXNE) در ثبات وقفه و وضعیت (USART\_ISR) یک شود و وقفه خالی نبودن ثبات دریافت، رخ می‌دهد. افزون بر این وقفه خالی بودن ثبات داده ارسالی (USART\_TDR) هنگامی رخ می‌دهد که از پیش داده‌ای در این ثبات ریخته شده باشد و پس از ارسال موفقیت‌آمیز ثبات خالی گردد [۱۹].

لازم به ذکر است که باید برای استفاده از وقفه‌ها بیت فعال‌سازی متناظرشان را نیز در ثبات کنترل فعال کرد. برای فعال کردن وقفه‌های خالی نبودن ثبات دریافت داده، باید بیت RXNEIE را در ثبات USART\_CR1 برابر با یک قرار داد. برای فعال کردن وقفه خالی بودن ثبات ارسال نیز باید بیت TXEIE را در ثبات کنترل یاد شده برابر با یک قرار داد [۱۹].

همچنین برای فعال‌سازی کلی هر یک از خطوط وقفه باید بیت متناظر با آن خط وقفه در NVIC فعال گردد. از این رو باید این بیت‌ها را برای واحدهای USART1 و USART2 در NVIC فعال کرد.

به علاوه برای فعال‌سازی هر یک از واحدهای جانبی به کار رفته مانند USART1 و USART2 باید کلاک فعال شود. که برای اینکار باید بیت‌های متناظر در ثبات کنترل واحد RCC فعال گردد [۱۹].

1 C/C++ Programming Language

2 Framework

3 Library

## ۴-۱-۲- گرداننده کارت شبکه

در پیاده‌سازی کارت شبکه از چهارچوب NET استفاده و زبان C# انتخاب شد. محیط توسعه یک پارچه‌ای که در آن پیاده‌سازی برنامه گرداننده انجام گردید، Visual Studio 2022 می‌باشد. پشته شبکه که متشکل از کارت شبکه و گرداننده آن می‌باشد، همان طور که در فصل پیش گفته شد قابلیت‌هایی از لایه‌های پیوند و انتقال را دربر می‌گیرد که در ادامه به توضیح جزئیات هر یک می‌پردازیم.

## ۴-۱-۲-۱- لایه پیوند

این لایه در پشته شبکه طراحی شده، قطعه<sup>۱</sup> را از لایه انتقال می‌گیرد و آن را در درون یک قاب قرار می‌دهد. در این لایه کنترل خطا برای سرآیند و برای داده، درخواست خودکار بازفرستی و تخصیص شناسه به کارت‌های شبکه، پیاده‌سازی شده است. با توجه به این، ساختار هر قاب لایه پیوند مطابق با شکل ۱-۳ می‌باشد:

جدول ۱-۴: ساختار قاب لایه پیوند

کد بررسی	داده	شناسه	درهم‌شده	شناسه	طول داده	پرچم‌ها
افزونگی دوره‌ای <sup>۲</sup>	تا ۳۱	پنجره	سرآیند	فرستنده	پنج بیت	سه بیت
دو بیت	بایت	چهار بیت	چهار بیت	چهار بیت		

طول سرآیند در قاب برابر با سه بایت می‌باشد، و طول کد بررسی افزونگی دوره‌ای نیز برابر با دو بایت است از این رو حداکثر کارایی در این لایه برابر با  $۸۳ \cong ۱۰۰ \times \frac{۲۹}{۳۵}$  درصد می‌باشد. در ادامه به توضیح هر یک از این زمینه‌ها<sup>۳</sup> در قاب می‌پردازیم.

## ۴-۱-۲-۱-۱- پرچم‌ها

پرچم‌ها نوع قاب را مشخص می‌کنند. به طور کلی چهار نوع قاب وجود دارد که به شرح زیر می‌باشند:

۱. قاب داده: این قاب دربردارنده‌ی داده‌ای است که لایه پیوند از لایه بالایی دریافت کرده و پس از قرار دادن در قاب ارسال می‌کند.

<sup>۱</sup> Segment<sup>۲</sup> CRC<sup>۳</sup> Field

۲. قاب تأیید داده: پس از آنکه یک فرستنده قابی را ارسال می‌کند در صورتی که قاب گیرنده یکتایی داشته باشد، گیرنده پس از بررسی صحت سرآیند و داده‌ی قاب، باید قاب تأیید داده را برای فرستنده ارسال کند تا فرستنده از دریافت درست داده اطمینان حاصل کرده و قاب بعدی را ارسال نماید. قاب تأیید دارای زمینه‌های داده و کد بررسی افزونگی دوره‌ای نمی‌باشد. از این رو اندازه آن تنها سه بایت است.

۳. قاب عدم تأیید داده: چنانچه گیرنده‌ی یکتای قاب با بررسی زمینه‌های کنترل خطا دریافت که قاب خطا دار است، برای فرستنده قاب عدم تأیید داده را ارسال می‌نماید و فرستنده پس از دریافت این پیام دوباره قاب داده کنونی را ارسال می‌نماید. این قاب دارای زمینه‌های داده و کد بررسی افزونگی دوره‌ای نمی‌باشد. از این رو اندازه آن تنها سه بایت است.

۴. قاب تخصیص شناسه: سازوکار تخصیص شناسه به کارت‌های شبکه می‌تواند پویا می‌باشد از این رو هر یک از کارت‌های شبکه پس از اتصال به خط برق می‌توانند در صورت امکان برای دریافت شناسه کارت شبکه با دیگر کارت شبکه‌های موجود بر روی خط برق مذاکره کنند. در این فرآیند از این نوع قاب‌ها استفاده می‌گردد.

#### ۴-۱-۲-۲- طول داده

طول داده‌ای که از لایه بالاتر دریافت شده در این زمینه مشخص می‌گردد. لازم به ذکر است که برخی از انواع قاب‌ها داده‌ای از لایه بالاتر ندارند و صرفاً برای انجام هماهنگی‌ها درون لایه پیوند در رسانه دادوستد می‌گردند. از این رو طول داده این قاب‌ها برابر با صفر خواهد بود.

از آن‌جا که اندازه این زمینه برابر با پنج بیت و طول کد CRC نیز دو بایت می‌باشد، بیشینه طول داده قابل حمل در هر قاب برابر با  $29 = 31 - 2$  بایت می‌باشد.

#### ۴-۱-۲-۳- شناسه‌های کارت شبکه

برای مشخص کردن فرستنده و گیرنده از این زمینه‌ها استفاده می‌گردد، طول هر کدام برابر با چهار بایت می‌باشد، از آنجا که شناسه صفر غیرمجاز می‌باشد و شناسه ۱۵ نیز برای همه‌پخشی است، تعداد کل شناسه‌های مجاز برای کارت‌های شبکه برابر با ۱۴ می‌باشد.

## ۴-۱-۲-۱-۴- درهم‌ریخته سرآیند

برای آنکه از درست بودن شناسه فرستنده و گیرنده و طول داده مطمئن شویم باید از سازوکار شناسایی خطا برای سرآیند استفاده شود. از میان سازوکارهای موجود روش درهم‌سازی به کار برده شد. در این روش زمینه‌های دیگر موجود در سرآیند را درهم کرده و چهار بیت نخست رشته درهم را در این زمینه قرار می‌دهیم.

## ۴-۱-۲-۱-۵- شناسه پنجره

این زمینه در سازوکار درخواست خودکار بازفرستی نقش مهمی دارد. هنگامی که لایه پیوند داده‌ای از لایه بالاتر دریافت می‌کند به قاب دربردارنده آن یک شماره پنجره اختصاص می‌دهد که در این زمینه از قاب نوشته می‌شود. گیرنده پس از دریافت این قاب می‌تواند از طریق همین شماره پنجره برای فرستنده مشخص کند که کدام قاب دچار خطا گشته و نیازمند ارسال دوباره است یا اینکه به درستی دریافت شده و می‌تواند برای ارسال قاب داده بعدی استفاده گردد.

## ۴-۱-۲-۱-۶- داده و کد بررسی افزونگی دوره‌ای

در زمینه داده، داده‌های دریافت شده از لایه بالاتر قرار داده می‌شود. همچنین کد بررسی افزونگی دوره‌ای برای این داده محاسبه می‌شود و در زمینه مربوط به خود قرار داده می‌شود. گیرنده وقتی یک قاب مربوط به خود را دریافت کرد، صحت آن را بررسی می‌کند. برای این کار زمینه درهم‌ریخته سرآیند را با درهم-ریخته‌ای که خود گیرنده از سرآیند محاسبه کرده، مقایسه می‌کند و اگر برابر نبودند قاب عدم تأیید برای فرستنده ارسال می‌شود. در صورت برابر بودن آنگاه کد بررسی افزونگی برای زمینه داده‌ی قاب دریافتی محاسبه می‌گردد و سپس با زمینه کد بررسی افزونگی درون قاب مقایسه می‌شود و چنانچه برابر بودند آنگاه قاب تأیید برای فرستنده ارسال می‌شود. در غیر این صورت قاب عدم تأیید برای فرستنده ارسال خواهد شد.

## ۴-۱-۲-۲- لایه انتقال

از آنجا که ممکن است داده‌های لایه کاربرد از حداکثر طول قاب در لایه پیوند طولانی‌تر باشند باید سازوکاری طراحی کرد برای آن که ارسال داده‌های طولانی ممکن شود. همچنین اگر داده‌ها رمزگذاری



نشده باشند، با دسترسی به سیم برق و شنود آن می‌توان به اطلاعات شبکه دسترسی پیدا کرد. در نتیجه نیاز است که سازوکاری برای رمزگذاری داده‌های لایه کاربرد در نظر گرفته شود. این موارد در لایه انتقال پیاده‌سازی می‌شود. در ادامه زمینه‌های قطعه لایه انتقال و جزئیات رمزگذاری و تکه‌تکه‌سازی توضیح داده می‌شود.

جدول ۴-۲: ساختار قطعه لایه انتقال

تکه‌های بیشتر <sup>۱</sup>	شناسه قطعه	شناسه تکه	داده
یک بیت	چهار بیت	سه بیت	تا ۸×۲۹ بایت

#### ۴-۱-۲-۲-۱- تکه‌تکه کردن

چنانچه داده‌های لایه کاربرد بزرگتر از بیشینه طول قاب در لایه پیوند باشد با تکه‌تکه کردن داده و قرار دادن آن در قطعه‌های پشت سرهم می‌توان ارسال آن را مدیریت کرد. برای آن‌که بتوان داده‌های متفاوت را به طور هم‌روند<sup>۲</sup> ارسال کرد از شماره‌ی قطعه و برای مشخص کردن ترتیب تکه‌ها در هر قطعه از شماره‌ی تکه استفاده می‌شود. همچنین برای مشخص کردن آخرین تکه از یک قطعه از پرچم تکه‌های بیشتر استفاده می‌شود. این پرچم چنانچه صفر باشد یعنی همچنان بسته آخر دریافت نشده است و در غیر این صورت یعنی بسته نهایی دریافت شده است و می‌توان با مرتب‌سازی تکه‌ها کل قطعه را به لایه بالاتر تحویل داد.

#### ۴-۱-۲-۲-۲- رمزگذاری

رمزگذاری یکی از مهم‌ترین فنونی است که برای امنیت داده‌ها در پشته شبکه به‌کاربرده شده است. رمزگذاری نامتقارن نیاز به رد و بدل کردن کلید خصوصی و عمومی می‌باشد و به طور کلی طول این کلیدها نسبت به پهنای باندی که مودم ارائه می‌کند زیاد می‌باشد. برای مثال در رمزگذاری RSA کلید می‌تواند اندازه‌ای برابر با ۱۲۸، ۲۵۶ یا ۵۱۲ بایت داشته باشد. از این رو از رمزگذاری نامتقارن استفاده نشده است.

<sup>1</sup> More Fragments

<sup>2</sup> Concurrent

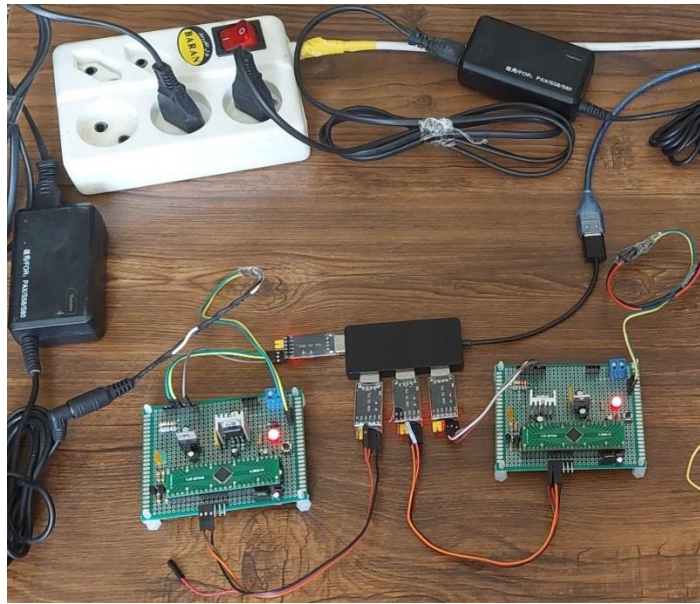
اما در روش‌های رمزگذاری متقارن از آن‌جا که کلید در میان فرستنده و گیرنده مشترک می‌باشد نیازی به تبادل کلید نمی‌باشد و از این رو سربار کمتری بر روی شبکه ایجاد می‌کند. در نتیجه برای رمزگذاری در این پشته شبکه از رمزگذاری متقارن AES با کلید ۱۲۸ بیتی استفاده شد.

#### ۴-۲- خروجی و ارزیابی

روند ایرادیابی و رفع آن در حین توسعه دستگاه چند مرحله را در بر گرفت. به دلیل ساده و سریع‌تر بودن شبیه‌سازی نرم‌افزاری، در این مراحل تا جای ممکن از این ابزار استفاده شد. چراکه امکان توسعه موازی و دقیق نرم‌افزار و سخت‌افزار پروژه را فراهم می‌کرد. پس تکمیل نسخه نهایی به ارزیابی کارایی پشته شبکه می‌پردازیم.

#### ۴-۲-۱- ایرادیابی

در این بخش به مراحل ایرادیابی و موردهای آزمونی که به کار رفت پرداخته می‌شود. این مراحل از آن جهت ضروری می‌باشند که اگر موردهای آزمون مناسبی طراحی نشده باشد، امکان دارد برخی از ایرادهای اساسی هم‌چنان در ساختار کلی طراحی شده برای پشته و یا پیاده‌سازی آن پنهان شده باشند. در نتیجه‌ی پنهان ماندن این ایرادها در ارزیابی نهایی تأثیر منفی خواهد گذاشت. در این بخش تلاش شد به طور گسترده با آزمودن جداگانه و سپس یکپارچه‌شده لایه فیزیکی و نرم‌افزاری پشته، امکان پنهان ماندن ایرادهای اساسی از بین برده شود.



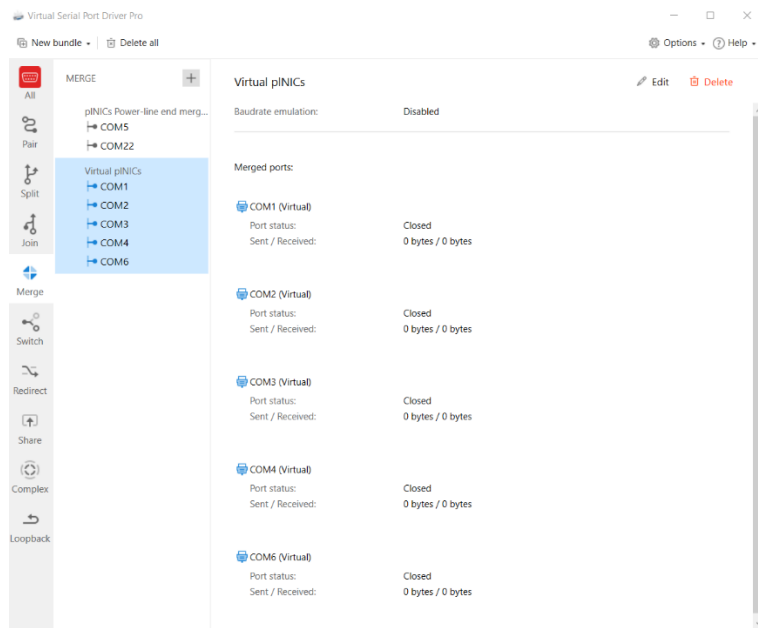
شکل ۴-۴: نرم‌افزار میکروکنترلرها به طور مستقل از مودم ایرادیابی شد

در مرحله نخست ایرادیابی، نرم‌افزار میکروکنترلرهای کارت شبکه به طور مستقل از گرداننده و مودم ایرادیابی شد. بررسی به‌کارگیری درست وقفه‌ها، ایرادیابی بافر کردن داده‌های ارسال و دریافت‌شده از سمت گرداننده یا مودم و ال‌ای‌دی‌های نمایانگر ارسال و دریافت داده از جمله کارهای انجام شده در این مرحله بود. همچنین در این مرحله مشخص شد که بر خلاف ادعای مستند مودم KQ130-F حالت پیش‌فرض کارکرد مودم که رها گذاشتن پایه MODE است به درستی عمل نمی‌کرد و داده‌های دریافتی در این حالت کارکردی به عموماً صحیح نبودند، ولی MODE دیگر که با صفر کردن این پایه فعال می‌شد به درستی عمل می‌کرد.

به طور موازی، گرداننده‌های کارت شبکه نیز به جای آنکه مستقیم به دستگاه‌ها متصل شده باشند و دستگاه‌ها نیز به خط برق، از طریق درگاه‌های سریال مجازی<sup>۱</sup> که به هم پیوند<sup>۲</sup> خورده بودند با یکدیگر در ارتباط بودند به این ترتیب ارتباط آن‌ها کاملاً نرم‌افزاری بود و در این مرحله امکان ایرادیابی گرداننده به صورت مستقل از سخت‌افزار فراهم شد. برای ایجاد و پیوند زدن درگاه‌های مجازی از نرم‌افزار Virtual Serial Port Driver استفاده شد.

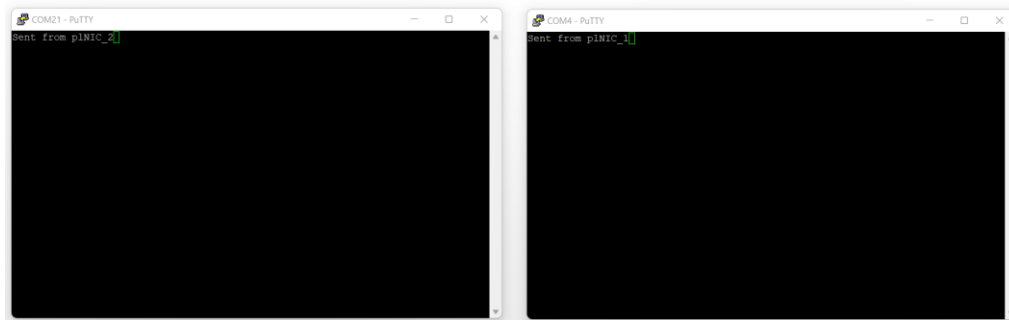
<sup>۱</sup> Virtual Serial Port

<sup>۲</sup> Bind



شکل ۴-۵: شیوه ایجاد همبندی خطی مجازی در روند ایرادیابی گرداننده

در مرحله بعدی کارت‌های شبکه نیز به طور مستقل از گرداننده ایرادیابی شد. در این مرحله نیز نرم افزار Virtual Serial Port Driver برای پیوند زدن درگاه‌های فیزیکی به‌کاربرده شد. همان‌گونه که در شکل ۴-۲ مشخص است کارت‌های شبکه از طریق سیم برق به یک دیگر متصل شده‌اند و از سوی دیگر نیز به طور دستی و بدون گرداننده داده‌ها را دریافت و ارسال می‌کنند.



شکل ۴-۶: دو کارت شبکه به خط برق متصل شده‌اند و به صورت دستی ایرادیابی می‌گردند

در مرحله بعدی، نرم‌افزار گرداننده و کارت‌های شبکه با یکدیگر یکپارچه شدند و پشته شبکه به طور کامل ایرادیابی شد. برای انجام موردهای آزمون<sup>۱</sup> یک برنامه کنسولی<sup>۲</sup> نوشته شد که در آن از گرداننده کارت شبکه برای ارسال پیام‌هایی که از طریق کنسول از کاربر دریافت می‌شد، استفاده شد و پس از آن که

<sup>۱</sup> Test Case

<sup>۲</sup> Console Application

گرداننده یک پیام را دریافت کرد نیز، داده بر روی کنسول نمایش داده می‌شد. همچنین برای ارزیابی و ایرادیابی فرآیندهایی که در حین ارسال و دریافت طی می‌شد، جزئیات فرآیندها بر روی کنسول نمایش داده می‌شد.

```

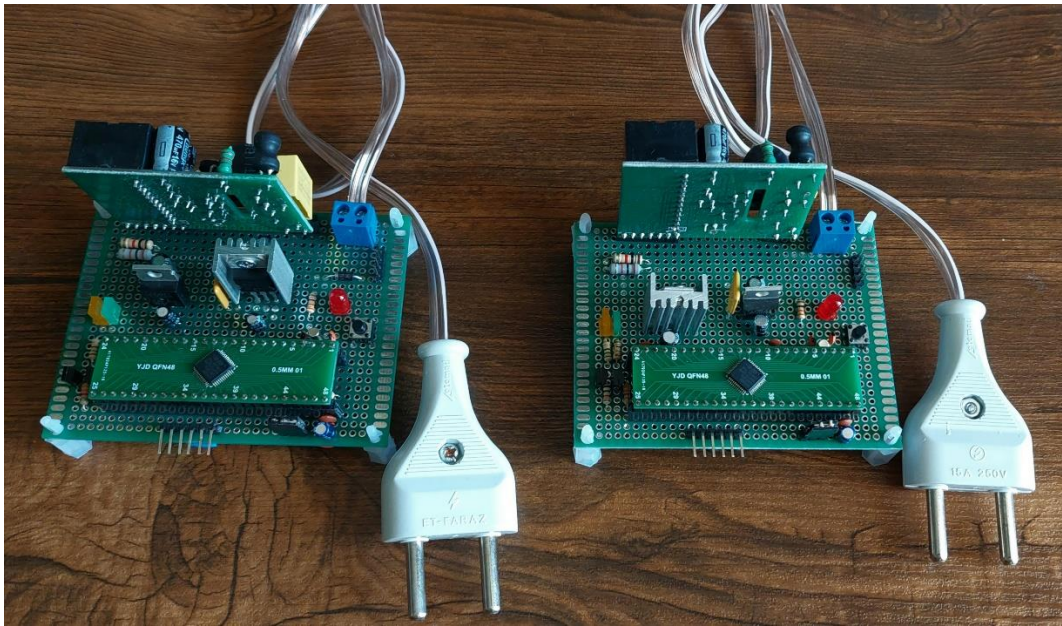
19:21:16 Dbg: Frame header received: HEADER: TxId: 6, RxId: 4, FrTp: SDU, W
Id: 0, Plen: 31, Hsh: 12 at FrameReceiveTask in FramingHandler.cs
19:21:16 Dbg: valid header at FrameReceiveTask in FramingHandler.cs
19:21:18 Dbg: Fragment received sid: 1, fid: 1, df: 0 fragLen: 29 at OnRxFra
ges in FragmentHandler.cs
19:21:18 Dbg: Fragment received nextRxSid: 2 at AddRxFragment in FragmentHa
ndler.cs
19:21:18 Dbg: Sending ACK/WCK Stat: True for 0 at OnRxFrame in ARQHandler.c
s
19:21:18 Warn: Back-off for 889 millis No TX till then! at BackOff in Frami
ngHandler.cs
19:21:19 Dbg: Frame header transmitting: HEADER: TxId: 4, RxId: 6, FrTp: AC
K, WId: 0, Plen: 0, Hsh: 0, bytes: byte[] { 3, 32, 70, 0, } at FramePriority
TransmissionTask in FramingHandler.cs
19:21:22 Dbg: Frame header received: HEADER: TxId: 6, RxId: 4, FrTp: ACK, W
Id: 0, Plen: 0, Hsh: 2 at FrameReceiveTask in FramingHandler.cs
19:21:22 Dbg: valid header at FrameReceiveTask in FramingHandler.cs
19:21:22 Warn: Segment Status True at <Main> in Program.cs
19:21:33 Dbg: Frame header received: HEADER: TxId: 6, RxId: 4, FrTp: SDU, W
Id: 0, Plen: 11, Hsh: 6 at FrameReceiveTask in FramingHandler.cs
19:21:33 Dbg: valid header at FrameReceiveTask in FramingHandler.cs
19:21:34 Dbg: Fragment received sid: 1, fid: 2, df: 1 fragLen: 9 at OnRxFra
ges in FragmentHandler.cs
19:21:34 Dbg: Fragment received nextRxSid: 2 at AddRxFragment in FragmentHa
ndler.cs
19:21:34 Dbg: encSeg seg byte[] { 233, 32, 169, 8, 40, 145, 28, 122, 24, 54
, 94, 237, 76, 31, 180, 75, 169, 50, 158, 53, 15, 195, 9, 141, 232, 167, 65,
120, 216, 185, 193, 185, 180, 191, 209, 143, 223, 150, 30, 235, 9, 214, 109
, 145, 174, 188, 198, 245, 205, 240, 237, 6, 255, 39, 119, 58, 84, 251, 91,
139, 184, 28, 116, 137, } at OnRxSegment in Transport.cs
19:21:34 Recv: salam hale shoma dostan khobe refigh haye grammi? at <M
ain> in Program.cs
19:21:34 Dbg: Sending ACK/WCK Stat: True for 0 at OnRxFrame in ARQHandler.c
s
19:21:34 Warn: Back-off for 0 millis No TX till then! at BackOff in FramingH
andler.cs
19:21:34 Warn: Waiting, bus is occupied at BackOff in FramingHandler.cs
19:21:34 Warn: Back-off for 1540 millis No TX till then! at BackOff in Frami
ngHandler.cs
19:21:36 Dbg: Frame header transmitting: HEADER: TxId: 4, RxId: 6, FrTp: AC
K, WId: 0, Plen: 0, Hsh: 0, bytes: byte[] { 3, 32, 70, 0, } at FramePriority
TransmissionTask in FramingHandler.cs
19:21:36 Dbg: Frame header received: HEADER: TxId: 6, RxId: 4, FrTp: SDU, W
Id: 0, Plen: 11, Hsh: 6, bytes: byte[] { 14, 75, 100, 96, 138, 84, 251,
91, 139, 184, 28, 116, 137, 241, 98, } at FramePriorityTransmissionTask in F
ramingHandler.cs
19:21:37 Warn: Back-off for 1540 millis No TX till then! at BackOff in Frami
ngHandler.cs
19:21:37 Dbg: Frame header transmitting: HEADER: TxId: 6, RxId: 4, FrTp: SD
U, WId: 0, Plen: 11, Hsh: 6, bytes: byte[] { 14, 75, 100, 96, 138, 84, 251,
91, 139, 184, 28, 116, 137, 241, 98, } at FramePriorityTransmissionTask in F
ramingHandler.cs
19:21:37 Dbg: Frame header received: HEADER: TxId: 4, RxId: 6, FrTp: ACK, W
Id: 0, Plen: 0, Hsh: 0 at FrameReceiveTask in FramingHandler.cs
19:21:37 Dbg: valid header at FrameReceiveTask in FramingHandler.cs
  
```

شکل ۴-۷: نمونه‌ای از استفاده از کل پشته شبکه برای ارسال داده‌های لایه کاربرد در برنامه کنسولی

در شکل ۴-۴ می‌توان ارسال موفقیت‌آمیز یک پیام لایه کاربرد که طولی بیش از ۲۹ بایت (بیشترین طول داده در قاب لایه پیوند) را مشاهده کرد. این پیام نخست در لایه کاربرد رمزگذاری شده و سپس تکه‌تکه‌سازی شده و هر تکه به لایه پیوند داده می‌شود. رسیدن داده‌ها به طور صحیح به گیرنده‌ی دلخواه و قاب‌بندی برای هر یک از تکه‌ها به طور جداگانه و پیشگیری و مدیریت برخورد قاب‌ها بر روی خط برق در لایه پیوند مدیریت می‌شود.

#### ۴-۲-۲- ارزیابی

با طی شدن مراحل ایرادیابی که در ۴-۲-۱ به آن پرداخته شد، وظایف کارت شبکه و گرداننده و سپس کارکرد یکپارچه پشته شبکه بررسی و تکمیل شد. در این بخش پشته شبکه‌ی تکمیل شده با توجه به اهدافی که در روش پیشنهادی در نظر گرفته شده بود، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۸: برد فیزیکی نهایی کارت شبکه خط برق

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی کارایی لایه پیوند شیوهی به کار رفته در مدیریت رسانه می‌باشد که در اینجا CSMA نامصرانه<sup>۱</sup> به کار برده شده، این روش نرخ کارایی بالاتری نسبت به روش ALOHA دارد و از دیگر سوی اندکی نیز پیچیده‌تر است. برخورد بر روی رسانه به دو روش می‌تواند دریافت داده را با مشکل روبه‌رو بکند: (۱) آنکه طول قاب تغییری نکند اما داده خراب باشد که در این صورت لایه پیوند با بررسی زمینه‌های کنترل خطا به خرابی پی برده و قاب عدم تأیید داده را برای فرستنده ارسال می‌کند. (۲) آنکه طول قاب دریافتی تغییر کند که در این صورت گیرنده در تفسیر قاب با مشکل جدی روبه‌رو خواهد شد. برای مثال در زمینه طول داده سرآیند اعلام می‌شود که طول زمینهی داده ۱۲ بایت می‌باشد ولی به دلیل برخورد کمتر از ۱۲ بایت برای زمینهی داده دریافت می‌شود و هنگامی که قاب یا قاب‌های بعدی دریافت می‌شود به اشتباه به عنوان بخشی از زمینهی داده قاب پیشین در نظر گرفته می‌شوند. در این حالت پشته شبکه پیاده‌سازی شده بررسی می‌کند که اگر دریافت بایت‌هایی با طول مشخص بیشتر از زمان معقول به طول بینجامد، آن رشته بایتی به کل مردود شود. به این ترتیب در تفسیر رشته بایت‌های دریافتی بعدی دچار مشکل نخواهیم شد.

<sup>۱</sup> Nonpersistent CSMA

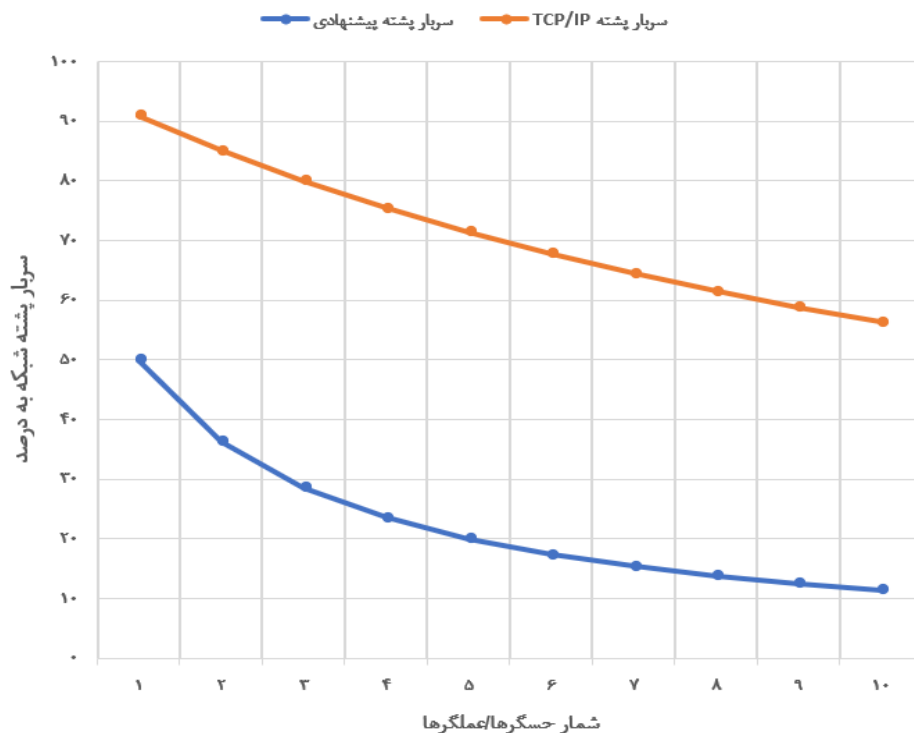
با توجه به موارد ذکر شده، مدیریت برخورد در پشته شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت. در روند ارزیابی تلاش شد که مورد آزمونی طراحی گردد که در اثر برخورد، هر دو حالت خرابی داده ظاهر گردد و شیوه مدیریت پشته در هر دو حالت ارزیابی شود. نتیجه ارزیابی عملکرد پشته در هنگام برخورد مطابق با جدول ۳-۴ می‌باشد. این نتایج از ۲۰ بار تکرار مورد آزمون - که ارسال همزمان داده طولانی توسط دو کارت شبکه به منظور ایجاد برخورد در رسانه بود - حاصل شد.

جدول ۳-۴: نرخ موفقیت در مدیریت انواع خرابی‌هایی که بر اثر برخورد ایجاد می‌شوند

نرخ موفقیت در مدیریت	نوع خرابی
۸۵ درصد	خطا در طول داده
۹۰ درصد	خطا در محتوای سرآیند
۸۵ درصد	خطا در محتوای داده

منظور از موفقیت در جدول ۳-۴ مدیریت موفقیت‌آمیز برخورد می‌باشد به این معنی که خطا یافت شود و از بروز تبعات آن پیشگیری گردد. این موفقیت برای خطا در طول داده به این معنی است که در تفسیر قاب‌های بعدی دچار اشتباه نشویم، برای خطا در محتوا و سرآیند نیز به این معنی است که خطا شناسایی گردد و قاب عدم تأیید ارسال گردد. نتایج جدول ۳-۴ به دلیل استفاده از کد بررسی افزونگی دوره‌ای ۱۶ بیتی با چند جمله‌ای  $1 + X_2 + X_{15} + X_{16}$  برای زمینه داده ( که در پروتکل مدباس<sup>۱</sup> نیز به کار برده می‌شود) و درهم‌ریخته ۴ بیتی برای سرآیند قابل توجه است.

<sup>۱</sup> Modbus



شکل ۴-۹: سرپار پشته شبکه پیشنهادی و TCP/IP در شبکه مدیریت انرژی بر حسب شمار حسگرها یا عملگرها

برای ارزیابی دقیق‌تر نیاز است که گذردهی کلی دستگاه‌های شبکه و سرپار پشته شبکه را نیز بررسی کرد. به طور کلی بر اساس مثالی که در فصل یک برای شبکه مدیریت انرژی زده شد، سرپار پیام‌های لایه کاربرد بر حسب تعداد حسگرها یا عملگرهای دستگاه مطابق با شکل ۴-۹ خواهد بود. همان‌طور که در این نمودار مشخص است با افزایش تعداد حسگرها یا عملگرها سرپار شبکه نیز کاهش می‌یابد زیرا طول پیام لایه کاربرد افزایش می‌یابد.

می‌توان به طور میانگین تعداد حسگرها/عملگرها را در یک شبکه مدیریت انرژی برابر با ۴ عدد دانست. از این رو سرپار شبکه در چنین کاربردی برابر با ۲۰ درصد خواهد بود. که نسبت به پشته TCP/IP بهبود قابل توجهی می‌باشد.

#### ۴-۳- جمع‌بندی

در این فصل به طور کلی به پیاده‌سازی، ایرادیابی و ارزیابی عملی پشته شبکه پرداخته شد. در زیرفصل پیاده‌سازی از بخش سخت‌افزاری پشته که دربردارنده جزئیات شماتیک مدار کارت شبکه بود تا بخش نرم‌افزاری آن که دربرگیرنده جزئیات و قابلیت‌های لایه‌های پیوند و انتقال مانند ساختار قاب و قطعه بود،



بررسی شد. در زیربخش ایرادیابی مراحل طی شده برای یافتن خطا و اصلاح آن‌ها، از استفاده از روش‌های شبیه‌سازی استفاده شده برای ایرادیابی مستقل سخت‌افزار و نرم‌افزار تا یکپارچه‌سازی پشته مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت نیز در زیربخش ارزیابی، کمیت‌های گوناگون قابل اندازه‌گیری پشته مانند سربار پشته در ارسال پیام‌های لایه کاربرد و نرخ موفقیت در مدیریت رسانه محاسبه شد.

## فصل پنجم

### جمع‌بندی و پیشنهاد کارهای آتی

## جمع‌بندی و پیشنهاد کارهای آتی

در فصل‌های یک تا چهار در رابطه با شیوه ضرورت طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی پشته شبکه‌ی مناسب برای کاربردهایی مانند ساختمان‌های هوشمند و سیستم‌های مدیریت انرژی صحبت شد. اکنون می‌توان به این جمع‌بندی پرداخت که روش پیشنهاد شده تا چه اندازه در حل مشکلات طرح شده در فصل یک موفق بوده، سودها و عیب‌های آن چیست، در چه مواردی عملکرد بهتری دارد و چه کارهایی در آینده می‌توان برای بهبود این پشته شبکه در نظر گرفت.

### ۱-۵- جمع‌بندی

در ارزیابی که در فصل چهار درباره مقایسه کارایی پشته شبکه پیشنهادی با پشته شبکه TCP/IP انجام شد، به طور قابل توجهی پشته پیشنهادی سربار کمتری دارد. علت آن را می‌توان بیش از اندازه پیچیده بودن پشته TCP/IP برای بیشتر کاربردهای اینترنت اشیا در نظر گرفت. زیرا در این کاربردها معمولاً تک سطحی می‌باشند، این بدان معنی است که گیرنده و فرستنده به طور مستقیم با یکدیگر در ارتباط هستند و هم‌بندی شبکه به صورت خطی، ستاره‌ای<sup>۱</sup> یا حلقه‌ای<sup>۲</sup> می‌باشد. در نتیجه نیاز به هدایت و مسیریابی بسته‌ها نیست. همچنین در چنین شرایطی برخی کاربردهای دیگر مانند کنترل ازدحام نیز کاربردی ندارد. در نتیجه لایه شبکه و برخی از ویژگی‌های لایه انتقال در چنین کاربردهایی سربار بیهوده بر پشته خواهد گذاشت. این مسئله به طور دقیق‌تر در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.

با توجه به گذردهی به نسبت پایین مودم KQ130-F که واسط ارتباطی آن UART با نرخ باد<sup>۳</sup> ۹۶۰۰ می‌باشد، به نظر می‌رسد با افزایش تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه، خط شلوغ شده و نرخ برخورد افزایش یابد [۱۴]. این باعث می‌شود که گذردهی خط تا حدودی هدر برود زیرا بسته‌هایی که همزمان بر روی خط قرار می‌گیرند خراب خواهند شد و عملاً بی‌فایده هستند. اما با این وجود زمانی برای ارسال آن‌ها بر روی خط صرف شده است. همچنین به دلیل افزایش رقابت میان دستگاه‌های روی خط، تأخیر ارسال نیز افزایش خواهد یافت. این مشکل در روش‌های مدیریت دسترسی به رسانه که تصادفی هستند مانند

---

<sup>۱</sup> Start

<sup>۲</sup> Token Ring

<sup>۳</sup> Baud Rate

CSMA و ALOHA وجود دارد. زیرا هیچ قرارداد و فهم مشترکی میان دستگاه‌ها برای اولویت‌بندی دسترسی به رسانه وجود ندارد و دستگاه‌ها به ذات به صورت تصادفی به خط دسترسی خواهند داشت.

هرچند این به خودی خود مشکلی بر اساس پیش‌فرض‌های مشخص شده در معرفی مسئله ندارد. چرا که هدف ارائه راه‌کاری برای شبکه‌هایی با دستگاه‌های ساده و ارزان و نرخ تولید و تبادل داده پایین بوده است. ضمن اینکه با به حداقل رساندن سربار پشته شبکه در این پژوهش تلاش شد که کارایی کلی آن افزایش یابد. در نتیجه در مواردی که تعداد دستگاه‌ها به نسبت اندازه پیام‌های لایه کاربرد کم باشد، این مشکل وجود نخواهد داشت و دستگاه‌ها روان از خط برق استفاده کرده و به دادوستد داده می‌پردازند.

همچنین به دلیل آن که الگوریتم AES داده‌ها را به طور بلوک بلوک پردازش می‌کند، به طور میانگین طول داده رمز شده بیشتر از طول داده خام می‌باشد، برای مثال چنانچه رشته داده لایه کاربرد که در دست ارسال است پنج بایت باشد، با رمز کردن آن با الگوریتم AES با کلید ۱۲۸ بیتی، طول داده رمز شده برابر با ۱۶ بایت خواهد شد که بیش از سه برابر طول داده اولیه می‌باشد ولی چنانچه طول رشته داده اولیه ۵۹ بایت باشد، حجم داده رمز شده برابر با ۶۴ بایت خواهد شد که نسبت به داده خام تنها ۸.۵ درصد افزایش می‌یابد. از این رو سربار رمزگذاری بسیار وابسته به طول پیام‌های لایه کاربرد می‌باشد و هرچه طول داده لایه کاربرد کمتر باشد، سربار بیشتر است و وارون آن.

به طور کلی در کاربردهایی که در فصل معرفی مسئله هدف قرار گرفتند، طول رشته داده‌های لایه کاربرد کمتر از ده بایت می‌باشد از این رو سربار رمزگذاری در این کاربردها دستکم برابر با ۶۰ درصد می‌باشد. در نتیجه یک رابطه الاکلنگی میان کارایی و امنیت در این موارد وجود خواهد داشت و بر اساس کاربرد باید تصمیم گرفت که کدام روش را به کار برد. برای مثال چنانچه شمار دستگاه‌های متصل به شبکه زیاد باشد و امنیت نیز چندان در اولویت نیست، بهترین روش آن است که از رمزگذاری استفاده نشود زیرا با افزایش سربار رمزگذاری طول قطعه‌های ارسالی افزایش می‌یابد و از آن جا که تعداد دستگاه‌ها نیز زیاد است، رقابت برای دسترسی به خط برق افزایش می‌یابد.

## ۲-۵- پیشنهاد کارهای آتی

یکی از مهم‌ترین کارها برای بهبود پشته شبکه می‌تواند استفاده از یک مودم با نرخ ارسال بالاتر باشد، زیرا نه تنها ظرفیت پشته شبکه را افزایش می‌دهد و قابلیت اتصال دستگاه‌های بیشتر با پیام‌های بزرگتر را فراهم می‌کند. بلکه می‌توان با افزایش اندازه سرآیند، کاربردهای پشته شبکه را ارتقا داد. برای نمونه می‌توان چندین زیرشبکه مجازی تشکیل داد به منظور بازارسال پیام‌هایی که باید مسیرهای دورتری را بپیمایند و با تضعیف سیگنال در طول مسیر، احتمال رخ دادن خطا افزایش می‌یابد.

استفاده از روش‌های دسترسی به مدیریت رسانه‌ی کنترل شده می‌تواند بهره‌وری را در هنگام افزایش دستگاه‌ها افزایش دهد هر چند که پیاده‌سازی آن‌ها اندکی از روش‌های تصادفی پیچیده‌تر می‌باشد. به طور کلی هنگامی که بار بر روی رسانه کم باشد بهره‌وری روش‌های تصادفی اندکی بیشتر از بهره‌وری روش‌های کنترل شده می‌باشد، زیرا در روش‌های کنترل شده برای نوبت‌بندی و اولویت‌بندی دسترسی دستگاه‌ها، زمینه‌های تازه‌ای در قاب لایه پیوند افزوده می‌شود. ولی هنگامی که بار افزایش یابد بهره‌وری روش‌های کنترل شده به طرز قابل توجهی از بهره‌وری روش‌های تصادفی بیشتر خواهد شد، زیرا در چنین شرایطی در روش‌های تصادفی رقابت برای در اختیار گرفتن رسانه افزایش می‌یابد و همچنین نرخ برخورد نیز افزایش می‌یابد ولی در روش‌های کنترل شده نرخ برخورد تقریباً ثابت است. از جمله این روش‌ها می‌توان گذراندن نشان<sup>۱</sup> و سرکشی<sup>۲</sup> را نام برد. در دسته گذراندن نشان از سازوکارهایی برای نوبت‌دهی به دستگاه‌ها استفاده می‌شود. و در روش سرکشی یک دستگاه ارباب به طور پیوسته دستگاه‌ها را برای بررسی آن‌که آیا داده‌ای برای ارسال دارند بررسی می‌کند.

بسته به کارکردهایی که غالباً پوشش داده شد، ممکن است روش گذراندن نشان یا سرکشی به کار برده شود. برای مثال در سامانه مدیریت روشنایی یک ساختمان چنانچه رخداد در سامانه تعریف نشده باشد و زمانبندی همه عملیات‌ها از خواندن اندازه‌گیری‌های حسگرها تا فرستادن دستور به صورت همگام انجام شود، روش سرکشی روش مناسب‌تری است. ولی چنانچه رخدادهایی مانند شناسایی آتش‌سوزی در سامانه تعریف شده باشند و نیاز به پیگیری بی‌درنگ دارند، بهتر است از روش نوبت‌دهی استفاده شود و از روش متمرکز سرکشی پرهیز کرد.

<sup>1</sup> Token Passing

<sup>2</sup> Polling

از دیگر موارد قابل بهبود، پیاده‌سازی سازوکاری برای به‌کار بردن انتخابی قابلیت‌های پشته شبکه بر حسب کاربرد می‌باشد. در برخی از کاربردها طول پیام‌های لایه کاربرد به نسبت طول سرآیندهای لایه‌های پشته شبکه کم می‌باشد و این باعث می‌شود که سربار پشته زیاد باشد. در این کاربردها برخی از قابلیت‌های پشته مانند تکه‌تکه‌سازی هرگز به کاربرده نمی‌شود. در این صورت وجود این قابلیت‌ها تاثیر منفی بر کارایی خواهد گذاشت. قابلیت استفاده انتخابی، این امکان را فراهم می‌کند که پشته شبکه و طول سرآیندها را بر حسب کاربرد تنظیم کرد.

اگر لایه کاربرد پیچیده باشد به طوری که چندین کارکرد مستقل در آن پیاده‌سازی شده باشد، نیاز است که سازوکاری برای جدا کردن پیام‌های هر یک از این کارکردها تدبیر کرد. در نتیجه پیاده‌سازی سازوکار درگاه در لایه انتقال می‌تواند در چنین مواردی کاربرد داشته و توانمندی‌های پشته را افزایش دهد.

## منابع و مراجع

- [1] J. M. R. Luigi Stammati. "The Economic Impact of IoT." [https://www.frontier-economics.com/media/1167/201803\\_the-economic-impact-of-iot\\_frontier.pdf](https://www.frontier-economics.com/media/1167/201803_the-economic-impact-of-iot_frontier.pdf) (accessed 18 Sep, 2022).
- [2] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks*, 4th ed. 2003. Prentice Hall.
- [3] R. Manikandan, "MINI TCP/IP FOR 8-BIT CONTROLLERS," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 109-112, 2011.
- [4] A. Dunkels, "Full {TCP/IP} for 8-Bit Architectures," in *First International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys2003)*, 2003.
- [5] N. Vlajic. "Analog Transmission Analog Transmission of Digital Data: of Digital Data: ASK, FSK, PSK, QAM." [https://www.eecs.yorku.ca/course\\_archive/2010-11/F/3213/CSE3213\\_07\\_ShiftKeying\\_F2010.pdf](https://www.eecs.yorku.ca/course_archive/2010-11/F/3213/CSE3213_07_ShiftKeying_F2010.pdf) (accessed 19 Sep, 2022).
- [6] Fixr.com. "How Much Does It Cost to Install a Hardwired Computer Network?" <https://www.fixr.com/costs/hardwired-computer-network> (accessed 19 Sep, 2022).
- [7] P. Pranzo. (2021) 8 Sectors benefit from IoT development in 2021. Available: <https://imagination.net/blog/8-sectors-benefit-from-iot-development-in-2021/>
- [8] C. Petrov, "49 Stunning Internet of Things Statistics 2022 [The Rise of IoT]," techjury.net, 2022. Accessed: 19 Sep 2022. [Online]. Available: <https://techjury.net/blog/internet-of-things-statistics/>
- [9] A. Pekar, J. Mocnej, W. K. Seah, and I. Zolotova, "Application domain-based overview of IoT network traffic characteristics," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 53, no. 4, pp. 1-33, 2020.
- [10] W. Shang, Y. Yu, R. Droms, and L. Zhang, "Challenges in IoT networking via TCP/IP architecture," *NDN Project*, 2016.
- [11] Y. Hao, J.-y. Liu, and A. Wu, "Research and Improvement of Ethernet Adapter Based on Power Line Communication," *2016 International Conference on Industrial Informatics - Computing*

- Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII)*, pp. 251-254, 2016.
- [12] H. C. Ferreira, H. Grove, O. Hooijen, and A. H. Vinck, "Power line communications: an overview," *Proceedings of IEEE. AFRICON'96*, vol. 2, pp. 558-563, 1996.
  - [13] Q. Yin and Z. Jianbo, "Design of Power Line Carrier Communication System based on FSK-KQ330 Module," *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 62, no. 3, 2014.
  - [14] S. B.-E. T. Co, "KQ100 Datasheet," ed, 2011.
  - [15] M. R. Amin, M. S. Hossain, and M. Atiquzzaman, "In-band full duplex wireless LANs: Medium access control protocols, design issues and their challenges," *Information*, vol. 11, no. 4, p. 216, 2020.
  - [16] T. Instruments, "LM7805 Datasheet," ed, 2003.
  - [17] STMicroelectronics, "LFxxC Datasheet," ed, 2012.
  - [18] STMicroelectronics, "STM32CubeIDE Reference Manual", ed, 2021.
  - [19] STMicroelectronics, "STM32F030xC Reference Manual", ed, 2017.



## Abstract

Nowadays networks of devices and things play crucial role in increasing efficiency and income of various industries in a way that postponing deployment of things network will put competitive future of companies at huge risk. One of the major problems with using TCP/IP stack is its high cost of infrastructure and supporting devices. If TCP/IP infrastructure had not been expected during design and construction of buildings then cost of afterward installations will skyrocket and grow more than twice. Another critical issue with TCP/IP is that electromagnetic waves can have negative impact on some devices (like patient monitoring devices). Because maintaining correct functionality of devices is fundamental, industries confront major difficulties in deploying TCP/IP in their applications. Powerline communication can help with these issues and provide more suitable solution in these industries. The transmission rate in powerline communication is relatively low so using light weight network stack is crucial in this case. In this project basic network requirements of industries recognized and with respect to these needs network card interface which uses FSK modulation and its light weight power-line network stack which has very low footprint than TCP/IP designed and deployed.

**Key Words:** Power-line Communication (PLM), Power-line Network Card Interface (plNIC), Power-line Network Stack, TCP/IP, FSK Modulation



**Amirkabir University of Technology  
(Tehran Polytechnic)**

**Department of Computer Engineering  
BSc Thesis**

**Design and Development of Powerline Network  
Interface Using FSK Modulation**

**By  
Alireza Salehy Dehnavi**

**Supervisor  
Dr. Hamidreza Zarandi**

**August 2022**