

ZIGBEE PROTOCOL

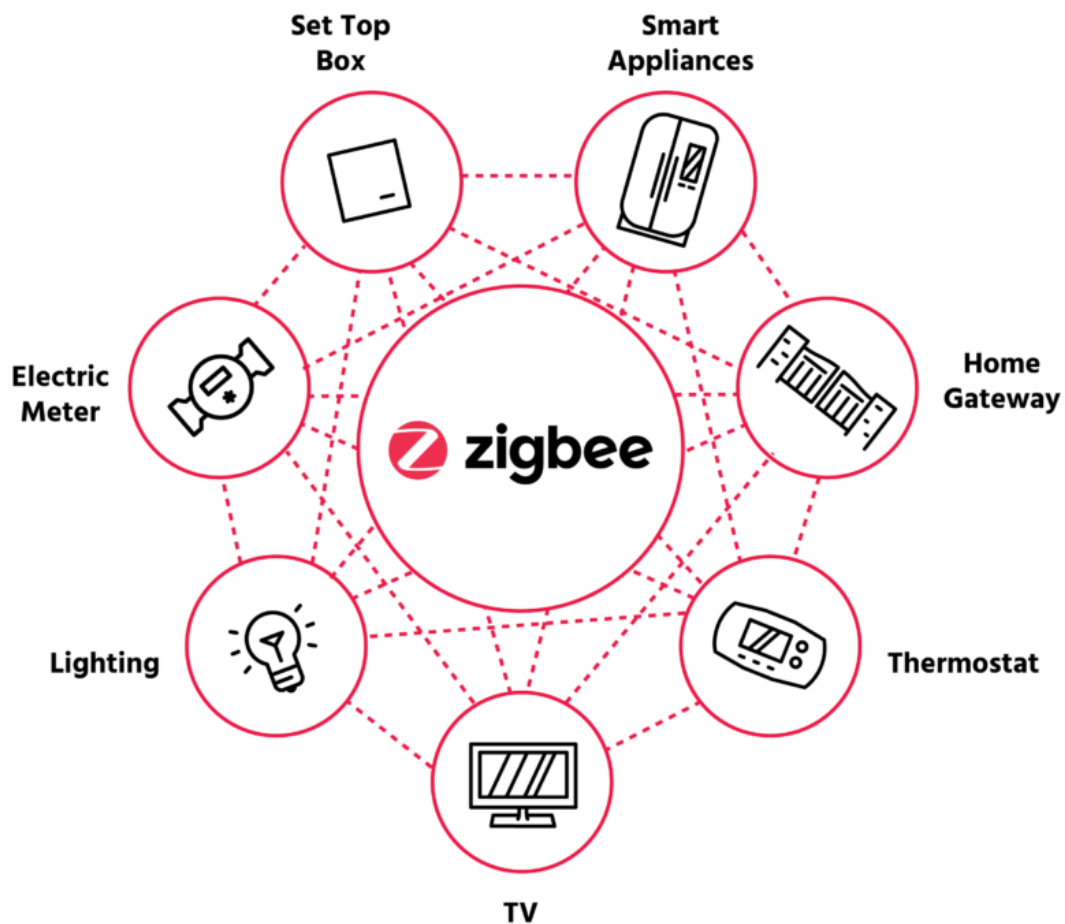
Raya Rezaie
ICD PRESENTATION

فهرست مطالب

۲	پروتکل Zigbee چیست؟
۴	ویژگی‌های کلیدی Zigbee
۵	معماری لایه‌ای پروتکل Zigbee:
۸	اتصالات در Zigbee
۸	انواع دستگاه‌ها در شبکه Zigbee
۹	ساختارهای ارتباطی (Network topologies) در Zigbee
۱۰	نحوه اتصال و ارسال داده
۱۱	مدیریت ازدحام و تداخل در Zigbee
۱۱	نحوه آدرس‌دهی
۱۲	روش‌های آدرس‌دهی
۱۳	روش مسیریابی
۱۵	مدیریت جریان داده
۱۷	تشخیص و بازیابی خطا

پروتکل Zigbee چیست؟

پروتکل Zigbee یک پروتکل بی‌سیم و کم مصرف با data rate پایین براساس استاندارد IEEE 802.15.4 است. این پروتکل برای ارتباط کم‌مصرف در فواصل کم طراحی شده و در IOT، اتوماسیون‌های خانگی و سیستم‌های صنعتی و دستگاه‌های هوشمند استفاده می‌شود.



Smart Home

شکل پروتکل Zigbee

کاربردهای Zigbee

زیگبی به دلیل مصرف انرژی کم، شبکه‌بندی انعطاف‌پذیر و قابلیت اطمینان بالا در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱. اتوماسیون خانگی (خانه‌های هوشمند)

- کنترل لامپ‌های هوشمند
- قفل‌های هوشمند و امنیت خانگی
- ترموستات‌های هوشمند
- کنترل از راه دور پرده‌ها و پنجره‌ها

۲. اینترنت اشیا (IoT) و تجهیزات هوشمند

- حسگرهای دما، رطوبت و حرکت
- دستگاه‌های پایش محیطی و کشاورزی هوشمند
- کنترل مصرف انرژی و بهینه‌سازی تجهیزات برقی

۳. کاربردهای صنعتی و پزشکی

- مانیتورینگ سلامت از راه دور
- اتوماسیون صنعتی و ساختمان‌های هوشمند
- مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع برق (Smart Grid)
- سیستم‌های هشدار و امنیت صنعتی

۴. تجهیزات هوشمند پوشیدنی و سلامت

- دستگاه‌های سنجش ضربان قلب و کنترل سلامت
- ساعت‌های هوشمند و ردیاب‌های تناسب اندام

ویژگی‌های کلیدی Zigbee

۱. مصرف انرژی بسیار کم

زیگی برای دستگاه‌های کم‌مصرف مانند حسگرها و تجهیزات اینترنت اشیا طراحی شده است. برخی دستگاه‌های زیگی می‌توانند سال‌ها با یک باتری کوچک کار کنند.

۲. پشتیبانی از Mesh network

زیگبی از یک ساختار شبکه مش استفاده می‌کند، به این معنی که دستگاه‌ها می‌توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و اطلاعات را از طریق چندین مسیر مختلف ارسال کنند. این ویژگی باعث افزایش پایداری و برد شبکه می‌شود.

۳. برد مناسب (تا ۱۰۰ متر در فضای باز)

زیگبی می‌تواند داده‌ها را تا فاصله ۱۰ تا ۱۰۰ متر در محیط‌های مختلف ارسال کند. در شبکه‌های مش، این برد می‌تواند با استفاده از گره‌های میانی (روترها) افزایش یابد.

۴. پشتیبانی از تعداد بالای دستگاه

زیگبی می‌تواند بیش از ۶۵,۰۰۰ دستگاه را در یک شبکه مدیریت کند. این ویژگی برای سیستم‌های اتوماسیون گسترده و ساختمان‌های هوشمند بسیار مفید است.

۵. امنیت بالا

زیگبی از رمزگذاری AES-128-bit استفاده می‌کند، که امنیت بالایی در ارتباطات بی‌سیم فراهم می‌کند. این ویژگی از دسترسی غیرمجاز و حملات سایبری جلوگیری می‌کند.

۶. سرعت انتقال داده مناسب برای IoT

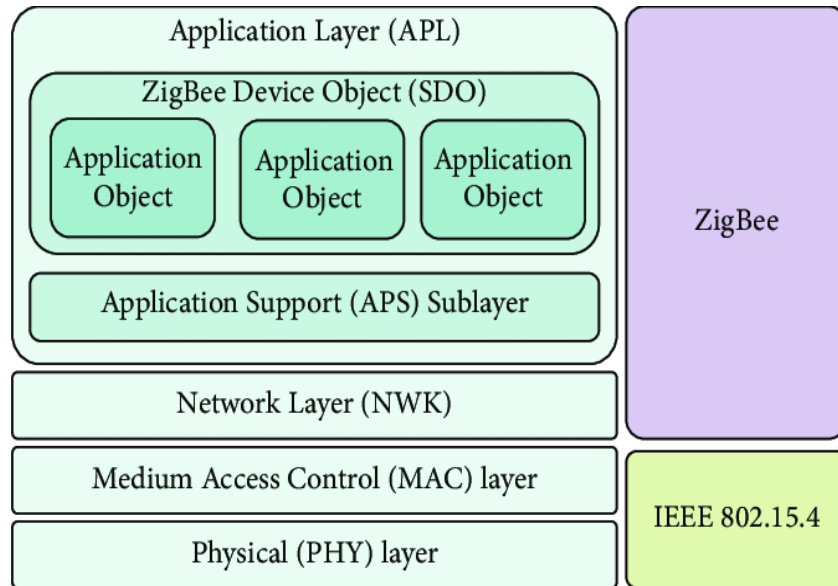
زیگبی از نرخ داده ۲۵۰ کیلوبیت بر ثانیه پشتیبانی می‌کند که برای دستگاه‌های اینترنت اشیا و حسگرها کافی است. این سرعت برای ارسال اطلاعات مانند وضعیت حسگرها، کنترل روشنایی و امنیت ایده‌آل است.

۷. فرکانس کاری در باندهای بدون مجوز

زیگبی در فرکانس‌های ۲.۴ گیگاهرتز، ۹۱۵ مگاهرتز و ۸۶۸ مگاهرتز کار می‌کند. این باعث می‌شود که در بیشتر کشورها بدون نیاز به مجوز خاصی استفاده شود.

معماری لایه‌ای پروتکل Zigbee:

پشته (Stack) پروتکل Zigbee از چندین لایه تشکیل شده است که هر کدام وظایف خاصی را بر عهده دارند. این پروتکل بر اساس استاندارد IEEE.802.15.4 ساخته شده است، که لایه‌های پایین را تعریف می‌کند، در حالی که Zigbee لایه‌های بالاتر را برای مسیریابی، امنیت و کاربردها مشخص می‌کند.



شکل ۲ معماری لایه‌ای Zigbee

۱. لایه فیزیکی (PHY):

عملکرد:

- این لایه مسئول انتقال داده‌ها از طریق امواج رادیویی است.
- شامل مدولاسیون، دمدولاسیون، تشخیص سیگنال و ارزیابی کیفیت کانال می‌شود.

ویژگی‌های اصلی:

- کار در باندهای فرکانسی ۸۶۸ مگاهرتز، ۹۱۵ مگاهرتز و ۲.۴ گیگاهرتز.

- بررسی قدرت سیگنال و کنترل توان انتقال داده.
- تشخیص نویز و جلوگیری از تداخل با سایر شبکه‌های بی‌سیم.

۲. لایه کنترل دسترسی به رسانه (MAC):

عملکرد:

- مدیریت دسترسی به کانال رادیویی برای جلوگیری از تداخل و برخورد بسته‌های داده.
- استفاده از روش (CSMA-CA) دسترسی چندگانه با حس کردن حامل و اجتناب از برخورد برای ارسال داده‌ها.
- ارائه مکانیسم تأیید دریافت (ACK) برای اطمینان از ارسال موفقیت‌آمیز داده‌ها.

ویژگی‌های اصلی:

- دو حالت ارتباطی:
 ۱. حالت مبتنی بر بیکن (Beacon-enabled): برای شبکه‌های هماهنگ‌شده.
 ۲. حالت بدون بیکن (Non-beacon-enabled): برای ارتباطات غیرهمزمان.
- کنترل ازدحام و مدیریت توان برای افزایش بهره‌وری انرژی.

۳. لایه شبکه (NWK):

عملکرد:

- ایجاد، نگهداری و مدیریت توپولوژی شبکه.
- پشتیبانی از توپولوژی‌های ستاره‌ای، درختی و مش (Mesh).
- اختصاص آدرس‌های شبکه و مدیریت ارتباطات بین دستگاه‌ها.
- استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی پویا برای ارسال داده‌ها.

ویژگی‌های اصلی:

- امکان تشخیص و حل تعارض آدرس.
- مدیریت مسیر و جدول‌های مسیریابی برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین گره‌ها.
- امکان اتصال مجدد (Rejoin) دستگاه‌ها در صورت قطع ارتباط با شبکه.

۴. زیرلایه پشتیبانی کاربردی (APS):

عملکرد:

- مدیریت مبادله داده‌ها بین لایه شبکه و برنامه‌های کاربردی.
- ارائه خدمات برای ایجاد ارتباطات منطقی (Binding)، قطعه‌بندی داده‌ها و انتقال مطمئن اطلاعات.

ویژگی‌های اصلی:

- مدیریت قطعه‌بندی و کنارهم قرار دادن داده‌ها برای بسته‌های بزرگ‌تر.
- بررسی اعتبار پیام‌ها و جلوگیری از دریافت داده‌های تکراری.
- ارائه مکانیسم‌های امنیت در سطح کاربردی برای رمزنگاری داده‌ها.

۵. لایه کاربردی (API):

عملکرد:

- شامل اشیای دستگاه Zigbee (Zigbee Device Objects - ZDO) و اشیای کاربردی سفارشی برای ارتباطات سطح بالا.
- مدیریت پیکربندی دستگاه، کشف دستگاه‌های دیگر در شبکه و تأمین امنیت.
- اجرای قابلیت‌های مورد نیاز برای کاربردهای خاص مانند خانه‌های هوشمند، سیستم‌های صنعتی و حسگرهای بی‌سیم.

ویژگی‌های اصلی:

- امکان تعریف پروفایل‌های سفارشی برای کاربردهای مختلف.
- ارائه سرویس‌های مدیریتی مانند احراز هویت و تنظیمات امنیتی.
- پشتیبانی از مکانیسم‌های تعامل بین دستگاه‌ها در شبکه.

اتصالات در Zigbee

اتصالات در زیگبی به دلیل ساختار شبکه مش (Mesh Network) و پشتیبانی از چندین نوع دستگاه، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ارتباطات پایدار، انعطاف‌پذیر و گسترده را فراهم کنند. در یک شبکه Zigbee، ارتباط بین دستگاه‌ها به صورت Multi-hop و self-healing انجام می‌شود.

انواع دستگاه‌ها در شبکه Zigbee

۶. هماهنگ‌کننده (coordinator)

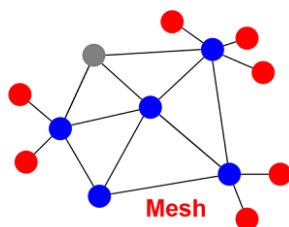
هر شبکه باید یک coordinator داشته باشد که وظیفه‌ی ایجاد مدیریت شبکه را برعهده دارد. به دستگاه‌ها آدرس اختصاص می‌دهد و اطلاعات شبکه را نگهداری می‌کند.

۷. مسیریاب (router)

مسیریاب‌ها وظیفه انتقال داده و گسترش سیگنال را برعهده دارند. همچنین می‌توانند پیام‌ها را از یک دستگاه به دستگاه دیگر ارسال کنند.

۸. دستگاه پایانی (end device)

دستگاه‌های پایانی معمولاً حسگرها، کلیدها و ریموت کنترلرها هستند. این دستگاه‌ها فقط با یک مسیریاب ارتباط دارند و مستقیماً پیام‌ها را ارسال نمی‌کنند.

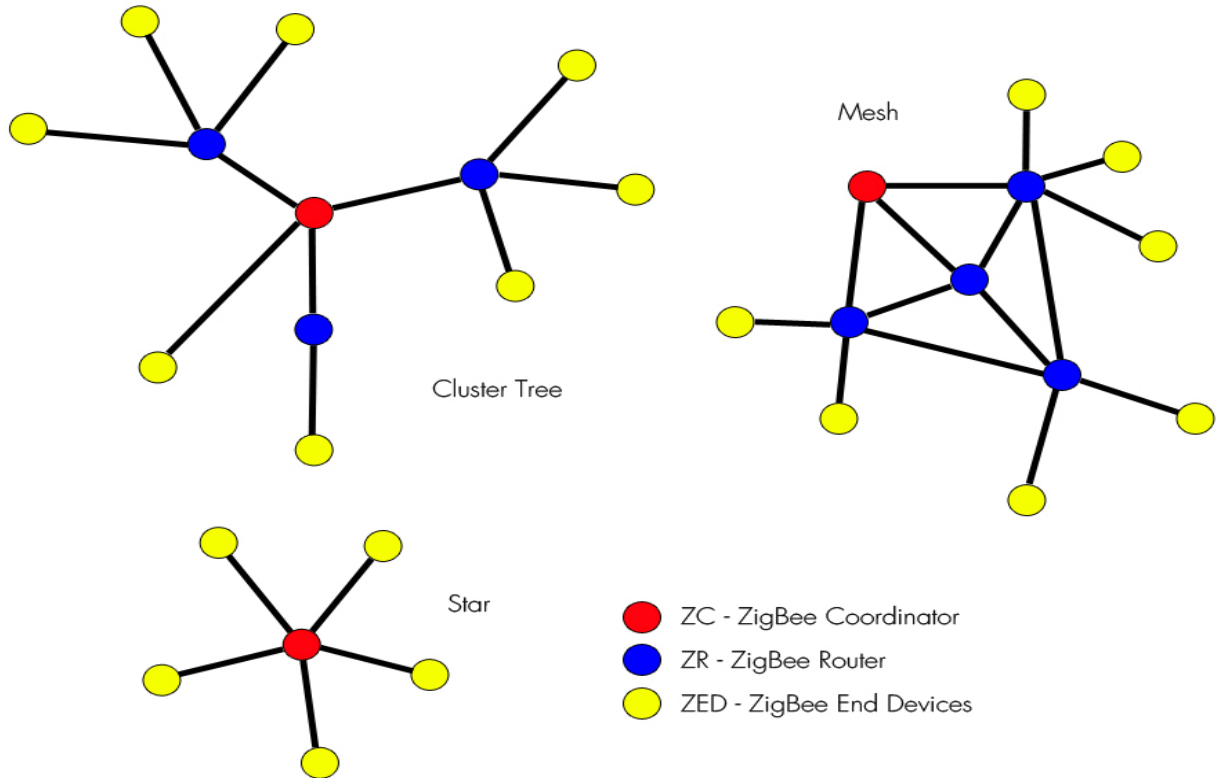


- Zigbee coordinator
- Zigbee router
- Zigbee end device

شکل ۳ انواع دستگاه‌ها در Zigbee

ساختارهای ارتباطی (Network topologies) در Zigbee

ZigBee Topologies



شکل ۱: انواع شبکه در Zigbee

این پروتکل از سه نوع معماری شبکه پشتیبانی می‌کند:

- شبکه ستاره‌ای (star network)
- در این مدل، همه دستگاه‌ها مستقیماً به coordinator متصل‌اند.
- مناسب برای شبکه‌های کوچک که نیاز به برد بالا ندارند.
- نقطه ضعف: اگر هماهنگ‌کننده از کار بیفتد، کل شبکه قطع می‌شود.
- کاربردها: سیستم‌های ساده مانند کنترل از راه دور لامپ‌های هوشمند.

• شبکه درختی (tree network)

- در این مدل، دستگاه‌های پایانی از طریق روترها به coordinator متصل‌اند.

- هر روتر می‌تواند به چندین دستگاه پایانی متصل باشد، ولی داده‌ها باید از مسیر مشخصی عبور کنند.
- برد بیشتری نسبت به شبکه ستاره‌ای دارد اما اگر یک مسیر از کار بیفتد، پیام به مقصد نمی‌رسد.
- کاربردها: ساختمان‌های هوشمند و شبکه‌های متوسط که نیاز به سازمان‌دهی مشخصی دارند.
- شبکه مش (mesh network)

۱. در این مدل که قوی‌ترین مدل می‌باشد تمام دستگاه‌ها (به جز دستگاه‌های پایانی) می‌توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند.

۲. پیام‌ها از طریق چندین مسیر مختلف ارسال می‌شوند، به همین دلیل اگر یک مسیر خراب شود، پیام از مسیر دیگری ارسال می‌شود. (Self-Healing)

۳. برد بسیار بالایی دارد و می‌تواند مناطق بزرگ را پوشش دهد.

۴. کاربردها: خانه‌های هوشمند، صنایع، و شهرهای هوشمند که نیاز به یک شبکه پایدار و وسیع دارند.

نحوه اتصال و ارسال داده

زیگبی از روش چندجهتی (Multi-hop Communication) برای ارسال داده‌ها استفاده می‌کند.

۱. فرآیند اتصال دستگاه جدید به شبکه

- ۱) دستگاه جدید درخواست پیوستن (Join Request) را به coordinator ارسال می‌کند
- ۲) coordinator بررسی می‌کند که آیا ظرفیت شبکه کافی است.
- ۳) اگر اتصال مجاز باشد، هماهنگ‌کننده یک آدرس ۱۶ بیتی یکتا به دستگاه جدید اختصاص می‌دهد.
- ۴) پس از اتصال، دستگاه می‌تواند داده‌ها را به هماهنگ‌کننده یا دیگر دستگاه‌ها ارسال کند.

۲. نحوه ارسال پیام در شبکه مش

- فرض کنید یک حسگر دما می‌خواهد اطلاعات خود را به یک دروازه (Gateway) ارسال کند.
- اگر حسگر در محدوده مستقیم دروازه نباشد، پیام به نزدیک‌ترین روتر ارسال می‌شود.
- روتر پیام را دریافت کرده و آن را به روتر بعدی یا مستقیماً به coordinator ارسال می‌کند.
- این فرآیند ادامه پیدا می‌کند تا پیام به مقصد برسد.

مدیریت ازدحام و تداخل در Zigbee

زیگبی برای جلوگیری از تصادم سیگنال‌ها و از دست رفتن داده‌ها از روش‌های زیر استفاده می‌کند:

۳. CSMA/CA (دسترسی چندگانه با حس کردن حامل و اجتناب از تصادم)

- قبل از ارسال داده، دستگاه بررسی می‌کند که آیا کانال رادیویی آزاد است.
- اگر کانال اشغال باشد، دستگاه منتظر می‌ماند و دوباره تلاش می‌کند.

۴. تغییر مسیر در صورت از کار افتادن یک دستگاه

- اگر یک روتر یا مسیر خاصی دچار مشکل شود، زیگبی خودکار مسیر جدیدی پیدا می‌کند.
- این ویژگی شبکه مش را پایدارتر از بلوتوث یا وای‌فای می‌کند.

۵. کار در فرکانس‌های مختلف برای کاهش تداخل

- زیگبی بیشتر در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز فعالیت می‌کند، اما می‌تواند از باندهای ۸۶۸ مگاهرتز و ۹۱۵ مگاهرتز نیز استفاده کند.
- برخی دستگاه‌ها می‌توانند کانال را تغییر دهند تا از تداخل با وای‌فای و بلوتوث جلوگیری کنند.

نحوه آدرس‌دهی

این پروتکل دارای دو نوع آدرس‌دهی است:

۱. آدرس ۶۴ بیتی جهانی (Extended Address)

- هر دستگاه زیگبی یک آدرس ۶۴ بیتی یکتا دارد.
- این آدرس هنگام تولید دستگاه در کارخانه تنظیم شده و تغییر نمی‌کند.
- معمولاً برای شناسایی یکتای دستگاه‌ها در سطح جهانی استفاده می‌شود.
- این آدرس شبیه به آدرس MAC در شبکه‌های اینترنتی عمل می‌کند.
- در مواقعی که دستگاه‌ها هنوز آدرس ۱۶ بیتی دریافت نکرده‌اند، از این آدرس برای برقراری ارتباط استفاده می‌شود.

۲. آدرس ۱۶ بیتی کوتاه (Network Short Address)

- هر دستگاه هنگام پیوستن به شبکه، از coordinator آدرس ۱۶ بیتی دریافت می‌کند.
- این آدرس فقط در همان شبکه خاص معتبر است و در صورت ترک شبکه یا ریست شدن دستگاه تغییر می‌کند.
- ارتباطات در شبکه بیشتر از طریق آدرس ۱۶ بیتی انجام می‌شوند زیرا این آدرس کوتاه‌تر است و باعث کاهش مصرف پهنای باند می‌شود.

❖ نکته: استفاده از هر دو نوع آدرس برای ارسال و دریافت داده ممکن است.

روش‌های آدرس‌دهی

در زیرگی، دستگاه‌ها می‌توانند از روش‌های مختلفی برای ارسال پیام استفاده کنند:

۱. آدرس‌دهی مستقیم (Unicast Addressing)

- پیام مستقیماً به یک دستگاه خاص ارسال می‌شود.
- از آدرس ۱۶ بیتی کوتاه برای مسیریابی سریع‌تر استفاده می‌شود.
- در صورتی که فرستنده آدرس ۱۶ بیتی گیرنده را نداند، می‌تواند از آدرس ۶۴ بیتی برای جستجو استفاده کند.

۲. آدرس‌دهی گروهی (Multicast Addressing)

- پیام به چندین دستگاه همزمان ارسال می‌شود.
- از آدرس‌های گروهی استفاده می‌شود تا دستگاه‌هایی که در یک گروه مشخص عضو هستند، پیام را دریافت کنند.
- معمولاً برای روشن/خاموش کردن همزمان چند دستگاه هوشمند استفاده می‌شود.

۳. آدرس‌دهی پخش (Broadcast Addressing)

- پیام به همه دستگاه‌های شبکه ارسال می‌شود.
- معمولاً برای ارسال دستورات عمومی مانند خاموش کردن کل سیستم یا ارسال درخواست‌های عضویت در شبکه استفاده می‌شود.

- این روش بیشترین مصرف انرژی را دارد و باید با احتیاط استفاده شود.

روش مسیریابی

۱. مسیریابی AODV:

این روش یک روش مسیریابی مبتنی بر درخواست است که به صورت پویا مسیرها را ایجاد می‌کند:

۱. هنگامی که یک دستگاه نیاز به ارسال داده دارد اما مسیر را نمی‌داند، یک درخواست مسیر (Route request- RREQ) را در شبکه پخش می‌کند.
۲. روترهای موجود در مسیر این پیام را دریافت کرده و در صورتی که مسیر به مقصد را بشناسند، یک پاسخ مسیر (Route Reply - RREP) ارسال می‌کنند.
۳. مسیر انتخاب شده در جدول مسیریابی دستگاه‌های شبکه ذخیره شده و داده‌ها از طریق این مسیر ارسال می‌شوند.
۴. اگر مسیر قطع شود، دستگاه فرستنده درخواست جدیدی ارسال کرده و مسیر جدیدی کشف می‌شود.

۲. مسیریابی درختی (Cluster-tree routing)

در این روش، شبکه زیگبی به ساختاری شبیه به درخت تقسیم می‌شود که در آن هماهنگ‌کننده در رأس درخت قرار دارد و دستگاه‌ها به صورت سلسله‌مراتبی به آن متصل می‌شوند:

۱. Coordinator شبکه را راه‌اندازی کرده و دستگاه‌های جدید به نزدیک‌ترین روتر متصل می‌شوند.
۲. هر روتر مسئولیت کنترل و ارسال داده‌های دستگاه‌های زیرمجموعه خود را بر عهده دارد.
۳. داده‌ها از پایین‌ترین سطح درخت به سمت بالا ارسال شده و در نهایت به هماهنگ‌کننده یا مقصد نهایی می‌رسند.

۳. مسیریابی (Mesh network)

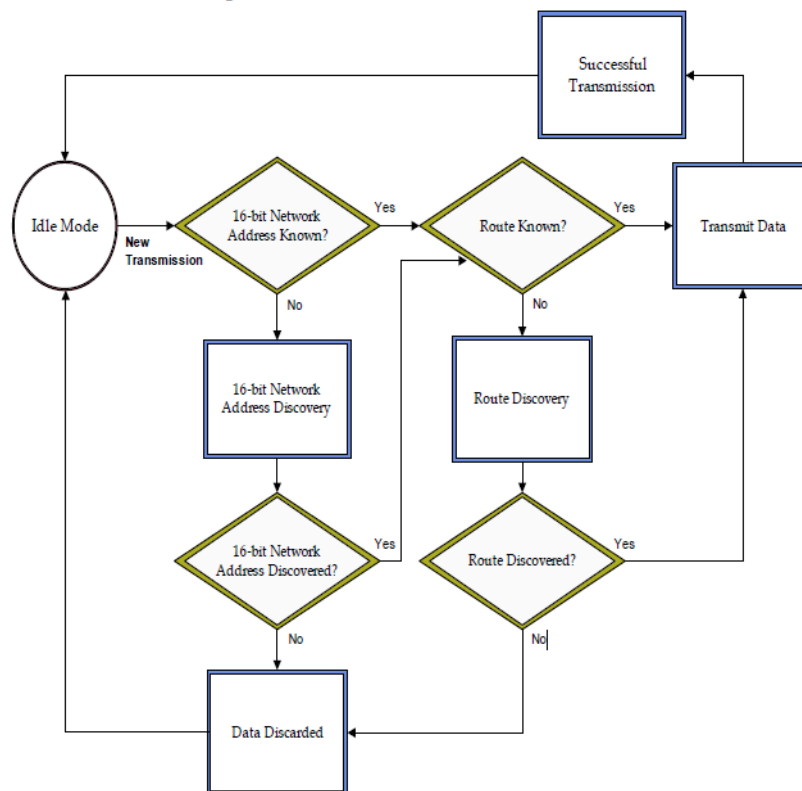
در توپولوژی مش، هر دستگاه می‌تواند داده‌ها را به دستگاه‌های دیگر ارسال کند، حتی اگر مسیر مستقیمی به مقصد نداشته باشد:

۱. هر دستگاه جدولی از مسیرهای شناخته شده را ذخیره می‌کند.
۲. اگر مسیر مستقیمی به مقصد وجود نداشته باشد، دستگاه‌ها از یکدیگر برای ارسال داده استفاده می‌کنند.

۳. اگر یک مسیر از کار بیفتد، داده‌ها به طور خودکار از مسیرهای جایگزین ارسال می‌شوند

۴. به دلیل قابلیت خودترمیمی (Self-healing)، شبکه زیگیبی حتی در صورت خرابی برخی دستگاه‌ها پایدار باقی می‌ماند.

این روش در سیستم‌های خانه‌های هوشمند و صنایع بسیار مفید است زیرا نیازی به زیرساخت ثابت ندارد.



شکل ۴: مسیریابی و آدرس‌دهی

مدیریت جریان داده

در این پروتکل برای مدیریت داده در لایه‌های مختلف مکانیزم‌های مختلفی اجرا می‌شود:

۱. لایه MAC: در این لایه از روش‌های زیر برای مدیریت جریان داده استفاده می‌شود.

❖ Carrier Sense Multiple Access with Collision (CSMA/CA)

Avoidance:

- قبل از ارسال داده، دستگاه بررسی می‌کند که آیا کانال ارتباطی مشغول است یا آزاد.
- اگر کانال مشغول باشد، دستگاه منتظر می‌ماند و بعد از یک تاخیر تصادفی دوباره بررسی می‌کند.
- این روش از تصادف (Collision) داده‌ها در شبکه جلوگیری می‌کند.

❖ Acknowledgment and Retransmission

- گیرنده پس از دریافت داده یک بسته تأیید (ACK) ارسال می‌کند.
- اگر فرستنده ACK را دریافت نکند، دوباره داده را ارسال می‌کند.
- در صورتی که ارسال بسته چند بار با خطا مواجه شود، داده حذف می‌شود تا از ازدحام شبکه جلوگیری شود.

❖ Buffer based

- هر مسیرباف زیگبی یک بافر داخلی برای ذخیره داده‌های ورودی دارد.
- اگر بافر پر باشد، دستگاه گیرنده یک سیگنال busy به فرستنده ارسال می‌شود تا انتقال متوقف شود.
- زمانی که فضای بافر آزاد شد، گیرنده سیگنال ready ارسال می‌شود. تا انتقال ادامه یابد.

۲. لایه شبکه:

- مدیریت مسیربافی و جلوگیری از ازدحام:
- زیگبی از AODV و Mesh Routing برای هدایت بسته‌ها استفاده می‌کند.
- اگر یک مسیر بیش از حد اشغال باشد، زیگبی مسیر جایگزین پیدا می‌کند تا ازدحام کاهش یابد.
- زمان‌بندی ارسال پیام‌ها

- زیگی پیام‌های غیرضروری را اولویت‌بندی می‌کند و ارسال برخی از آن‌ها را به تأخیر می‌اندازد.
- برای جلوگیری از ایجاد بار اضافی روی یک روتر، بسته‌ها می‌توانند در زمان‌های مختلف ارسال شوند.

۳. لایه کاربرد:

- Fragmentation and reassembly:
 - اگر داده بیش از حد بزرگ باشد، به چند بسته کوچک تقسیم می‌شود تا بار اضافی روی شبکه ایجاد نشود.
 - گیرنده پس از دریافت همه بسته‌های کوچک، داده اصلی را بازسازی می‌کند.
- مدیریت زمان sleep در دستگاه‌های کم‌مصرف
 - برخی از دستگاه‌های زیگی، مانند حسگرها، بیشتر اوقات در حالت خواب هستند.
 - فرستنده باید داده‌ها را زمانی باشد ارسال کند که دستگاه گیرنده بیدار، در غیر این صورت بسته‌ها هدر می‌روند.

تشخیص و بازیابی خطا

انواع مکانیزم تشخیص و بازیابی خطا را در لایه مختلف به شرح زیر است:

لایه فیزیکی :

تشخیص خطا

- تشخیص انرژی: (Energy Detection - ED)

میزان انرژی در کانال را قبل از ارسال داده بررسی می کند تا از تداخل جلوگیری شود.

- ارزیابی کانال آزاد: (Clear Channel Assessment - CCA)

- بررسی می کند که آیا کانال مخابراتی در لحظه ارسال داده مشغول است یا آزاد.
- شاخص قدرت سیگنال: (RSSI - Received Signal Strength Indicator)
- بررسی کیفیت سیگنال برای تشخیص تداخل ها و کاهش خطاهای انتقال.

- خطاهای مدولاسیون و دمدولاسیون:

- استفاده از تصحیح خطای رو به جلو (Forward Error Correction - FEC) برای شناسایی و اصلاح خطاهای بیت.

بازیابی خطا:

- کنترل خودکار بهره: (Automatic Gain Control - AGC)

- تقویت سیگنال برای بهبود کیفیت دریافت.

- تنظیم خودکار نرخ داده: (Adaptive Data Rate)

- تغییر سرعت انتقال داده بر اساس شرایط کانال برای کاهش خطاها.

لایه MAC:

تشخیص خطا:

- بررسی توالی فریم (Frame Check Sequence - FCS):

- استفاده از کد بررسی افزونگی چرخشی (CRC - Cyclic Redundancy Check) برای تشخیص فریم های خراب.

- (ACK – Acknowledgment) :

- هر فریم ارسالی نیاز به تأیید از گیرنده دارد.

- CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance):
 - از برخورد فریم‌های داده در شبکه جلوگیری می‌کند.
- (Beacon Loss Detection):
 - بررسی می‌کند که آیا دستگاه‌های متصل به شبکه، پیام‌های هماهنگ‌کننده (بیکن) را دریافت می‌کنند یا نه.

بازیابی خطا:

- ارسال مجدد داده‌ها: (Retransmissions)
- اگر فریم ارسال شده تأییدیه دریافت نکند، دوباره ارسال می‌شود.
- الگوریتم تأخیر تصادفی: (Backoff Algorithm)
- تأخیرهای تصادفی برای کاهش تداخل و جلوگیری از برخورد داده‌ها اعمال می‌شود.
- مکانیزم بازیابی یتیم: (Orphan Recovery)
- اگر دستگاهی ارتباط خود را با هماهنگ‌کننده از دست بدهد، دوباره فرآیند پیوستن را آغاز می‌کند.

لایه شبکه:

تشخیص خطا:

- تشخیص بسته‌های تکراری
 - بررسی شماره توالی هر بسته برای جلوگیری از دریافت داده‌های تکراری.
- تشخیص تعارض آدرس:
 - در صورت وجود چندین دستگاه با یک آدرس شبکه، تعارض شناسایی شده و اصلاح می‌شود.
- تشخیص خطاهای مسیریابی:
 - استفاده از پیام‌های بررسی لینک و کشف مسیر برای تشخیص گره‌های نامعتبر یا از دست رفته.

بازیابی خطا:

- مکانیزم کشف مسیر: (Route Discovery Mechanism)
- اگر یک مسیر خراب شود، یک مسیر جایگزین از طریق ارسال درخواست‌های مسیریابی پیدا می‌شود.
- دستورات وضعیت شبکه: (Network Status Commands)
- دستگاه‌ها یکدیگر را از خرابی مسیرها و لینک‌های قطع شده مطلع می‌کنند.

- مانیتورینگ لینک والد: (Parent Link Monitoring)

اگر یک دستگاه پایانی تشخیص دهد که والد خود را از دست داده، فرآیند پیوستن مجدد را آغاز می‌کند.

لایه کاربردی:

تشخیص خطا:

- خطاهای خدمات (ZDO (Zigbee Device Object Service Failures):

بررسی خطاها در فرآیندهای کشف دستگاه، تنظیمات و امنیت.

- بررسی سازگاری و پیکربندی:

اطمینان حاصل می‌کند که پیام‌های کاربردی با پروفایل‌های تعریف‌شده مطابقت دارند.