

## بررسی قابلیت تحمل پذیری خطا در شبکه‌های حسگر بی سیم

### با استفاده از گره‌های یدک در چگالی‌های پایین

سلیمان گلی بیدگلی<sup>۱</sup>، فاطمه یحیی‌آبادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> مربی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان

salmangoli@kashanu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان

fatemeh\_yahyaabadi@yahoo.com

**چکیده:** برای بالا بردن اعتمادپذیری و تحمل‌پذیری خطا در شبکه حسگر بی سیم، به کارگیری گره‌های یدک، راه‌کار سودمندی می‌باشد. در این مقاله، به بررسی اثر افزودن گره‌های یدک تک‌نوعی و چندنوعی، بر روی قابلیت تحمل‌پذیری خطا در چگالی‌های پایین پرداخته شده است. برای این منظور، برای چگالی‌های یک، دو و سه از نودها، یدک‌های تک‌نوعی و چندنوعی در نظر گرفته شده و گراف شبکه برای آن‌ها رسم شده است. سپس با استفاده از مدل مارکوف برای تمامی چگالی‌های فوق، یدک‌ها از حالت بدون یدک تا سه یدک در نظر گرفته و مدل مارکوف برای گراف‌ها رسم گردیده است. در ادامه با حل معادلات مارکوف، تابع اعتمادپذیری و در نتیجه متوسط میزان خرابی به دست آمده و پس از آن، MTTF کل شبکه محاسبه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که در چگالی‌های بالا، استفاده از گره‌های یدک اشتراکی باعث بهبود MTTF می‌شود و همچنین، برای هر چگالی مشخص، عددی وجود دارد که از آن مقدار به بعد، افزایش تعداد گره‌های یدک، تأثیری در بهبود MTTF ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه حسگر بی سیم، قابلیت اطمینان، گره یدک، تحمل‌پذیری خطا، میانگین زمان کارکرد بدون خطا، مدل مارکوف.

## ۱. مقدمه

شبکه حسگر بی‌سیم، متشکل از تعداد بسیار زیادی گره است که هر کدام محدودیت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری متعددی دارند و بسیار آسیب‌پذیر و مستعد خرابی‌اند. حسگرها ممکن است در هر زمان، کارایی خود را به دلایل متعددی از قبیل کاهش انرژی، ناهنجاری‌های محیطی و یا حمله‌های خصمانه دشمن از دست بدهند؛ بنابراین، نیازمند برنامه و بررسی‌های سودمندی در زمینه اعتمادپذیری و تحمل‌پذیری خطا هستیم تا بتوانیم اطمینان نسبی از عملکرد شبکه داشته باشیم.

میزان قابل توجهی از روش‌های ارائه‌شده بهبود کیفیت شبکه در اعتمادپذیری، در زمینه تبادل اطلاعات و چالش‌های مرتبط با این موضوع نظیر اعتمادپذیری در تراکم داده‌ها، کنترل ترافیک ناشی از آن‌ها و تجمع اطلاعات است [۱].

در شبکه حسگر، یک رصد معتبر از یک حادثه در گره چاهک یا سرکلستر<sup>۱</sup> بر اساس اطلاعات جمع‌شده در کلستر است و نیازمند حداقل میزان داده رسیده از نودهای حسگر مختلف است. در [۱] معیار و مقیاس جدیدی برای سنجش اعتمادپذیری در شبکه حسگر ارائه شده که بیانگر همین خصیصه در شبکه است. اعتمادپذیری شبکه حسگر، احتمال رسیدن کمترین نرخ تراکم داده به سرکلستر یا نود چاهک است. سپس نودهای هر شبکه را با گرافی مدل کرده و متوسط زمان خرابی شبکه را مجموع متوسط زمان لازم برای تعمیر و متوسط زمان خرابی در نظر می‌گیرد:

$$MTTF = MTTF + MTTR \quad (1)$$

در [۲]، الگوریتم دقیق و تعمیم‌یافته‌ای برای اعتمادپذیری مدل سه حالت، با اختصاص وزنی که بیانگر اهمیت داده‌های ایجاد شده توسط نود است، ارائه شده و سپس اعتمادپذیری را به گونه‌ای فرمول کرده که بیانگر قابلیت شبکه برای انباشته‌سازی و تحمل تراکم داده‌ها از نودهای حسگر است؛ البته با در نظر گرفتن اینکه نباید مجموع وزن آن‌ها از یک وزن مشخص ( $W_{req}$ ) تجاوز کند.

## ۲. اعتمادپذیری و تحمل‌پذیری خطا

در تعدادی از بررسی‌ها، خطاهایی را که در طول انتقال داده درگیرند، به دو دسته خطاهای تحمل‌پذیر<sup>۲</sup> و خطاهای تحمل‌ناپذیر<sup>۳</sup> دسته‌بندی می‌کنند [۳].

خطاهای تحمل‌ناپذیر، آن دسته از خطاهایی هستند که تأثیر آن‌ها توسط پروتکل‌های انتقال داده نمی‌تواند مدیریت شود؛ مانند وارد شدن شبکه یا مقیاس وسیعی از آن در محیط‌هایی مثل آتش که منجر به از بین رفتن کلی آن‌ها می‌شود. خطاهایی که منجر به از بین رفتن نود چاهک یا سرکلستر می‌شود، یا جزءبندی شبکه، به گونه‌ای که تکه‌های شبکه کاملاً از هم دور افتاده باشند.

خطاهای تحمل‌پذیر، خطاهایی هستند که پروتکل‌های انتقال داده، قابلیت مدیریت کردن آن‌ها را دارند؛ مانند فرستادن داده‌های حاوی نویز<sup>۴</sup> یا پارازیت، فرستادن هشدار اشتباه، تأخیر داده، برخی از خرابی‌های سخت‌افزاری و... .

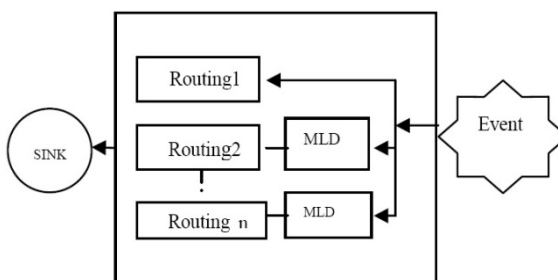
در [۳ و ۴] ابتدا یک معنی کلی از اعتمادپذیری را ارائه می‌دهند، سپس یک مدل اعتمادپذیری برای انتقال داده به کمک آن بیان می‌کنند. در انتقال داده  $e2e^5$ ، اعتمادپذیری، احتمال اینکه یک واحد پیام ایجاد شده از پدیده به نود چاهک برسد، تعریف می‌شود و در انتقال داده از یک رخداد به گره چاهک، اعتمادپذیری نرخ بسته‌های رسیده به چاهک، به مجموع بسته‌های ایجاد شده برای آن رخداد است.

در [۳]، اعتمادپذیری انتقال داده تابعی از اعتمادپذیری تمامی عملیاتی است که داده پردازش‌نشده را منتقل می‌کنند. بر این اساس در [۳]، یک قالب اعتمادپذیری برای انتقال داده که بر اساس فازهای مختلف پروتکل‌های شبکه حسگر می‌باشد، ارائه شده است. برای این کار، یک مدل خطا را برای دربرداشتن کلیه خطاها در حین تجمع داده و انتقال آن در نظر گرفته، سپس بلوک دیگرام اعتمادپذیری را برای چند پروتکل رسم کرده و از این قالب برای مطالعه و مقایسه پروتکل‌های انتقال داده موجود

2. Tolerable Faults  
3. Intolerable Faults  
4. noise  
5. End to end

1. Cluster head

استفاده کرده است. پروتکل‌هایی که در [۳] مورد بررسی قرار گرفته‌اند، RMST و ESRT می‌باشند.



شکل (۱): بلوک دیاگرام اعتمادپذیری برای پروتکل RMST [۳]

تعداد ارسال‌های مجدد، نقش مهمی در اعتمادپذیری انتقال داده دارد. با استفاده از شکل (۱)، اعتمادپذیری برای این پروتکل به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$R_{RMST} = 1 - \{(1 - R_R) * (1 - (R_R * R_{MLD}))^r\} \quad (2)$$

که در آن،  $R_R$  اعتمادپذیری مسیریابی و  $R_{MLD}$  اعتمادپذیری پیغام‌های گم شده است [۳].

و اعتمادپذیری برای پروتکل ESRT به صورت فرمول زیر است [۳]:

$$R_{ESRT} = 1 - (1 - R_R)^n \quad (3)$$

در پروتکل ESRT به دلیل نبودن مرحله MLD با ارسال مجدد‌های بیشتر، اعتمادپذیری به یک نزدیک می‌شود.

### ۳. تأثیر افزونگی در متوسط زمان خرابی<sup>۱</sup>

برای بررسی تأثیر افزونگی در متوسط زمان خرابی، معمولاً زمینه‌های مختلفی در نظر گرفته می‌شود؛ مانند افزونگی سخت‌افزاری، افزونگی داده و افزونگی زمان.

در [۵]، تأثیر افزونگی مسیر بر متوسط زمان خرابی (MTTF) بررسی می‌شود و خرابی‌ها را بر حسب تعداد درخواست‌هایی که سیستم قبل از Fail شدن توسط خطاهای انتقالی یا کاهش انرژی، قادر به پاسخ‌دهی آن‌هاست، در نظر گرفته و در ادامه، فرمولی را به کمک احتمالات برای اعتمادپذیری و تحمل‌پذیری خطا ارائه می‌دهد:

$$E_q = \sum_{k=1}^{np} E_q(k) P_q(k) \quad (4)$$

$E_q$  متوسط میزان انرژی مصرف‌شده برای درخواست  $q$ ،  $E_q(K)$  انرژی مصرف‌شده از سیستم برای جواب‌دهی به یک درخواست که  $K$  کلاستر برای پاسخ‌دهی نیاز دارد و  $P_q(K)$  احتمال اینکه یک درخواست به  $k$  کلاستر برای پاسخ‌گویی نیاز داشته باشد، می‌باشد.

$$R_q = \sum_{k=1}^{np} R_q(k) P_q(k) \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $R_q$  متوسط اعتمادپذیری یک درخواست است. فرمول زیر نیز برای MTTF ارائه شده که در آن،  $N_q$  تعداد درخواست‌ها می‌باشد.

$$MTTF = \sum_{i=1}^{N_q-1} i R_q^i (1 - R_q) + N_q R_q^{N_q} \quad (6)$$

$n$  بیانگر تعداد مسیرهای جداگانه بین نود مبدأ<sup>۲</sup> و چاهک یا سرکلاستر است. برای افزونگی مبدأ به جای استفاده از یک حسگر، چندین حسگر را در نظر گرفته و آن را با  $ms$  نشان می‌دهد.

یک دیدگاه دیگر برای بالا بردن اعتمادپذیری شبکه حسگر، استفاده از افزونگی گره یا به کارگیری گره‌های یدک<sup>۳</sup> برای نودهاست. معمولاً یدک‌ها را به دو دسته تک‌نوعی و چندنوعی تقسیم می‌کنند. یدک تک‌نوع در صورت خرابی نوع خاصی از حسگرها، می‌تواند جایگزین شود، اما یدک چندنوع در صورت خرابی چند نوع از حسگرها می‌تواند جایگزین شود. در [۶]، تأثیر به کارگیری گره‌های یدک را برای سه شکل خاص از شبکه بررسی می‌کند؛ این سه شکل خاص عبارت‌اند از:

۱. حالتی که در شبکه، دو نود  $A$  موازی و با دو نود  $B$  موازی، سری باشند. برای این مدل دو یدک تک‌نوع (به این معنی که فقط با نوع مخصوص به خودشان جایگزین می‌شوند) در نظر می‌گیرد.

2. Source node  
3. Spare nodes

1. Mean Time To Failure

$S_B$ : گره یدک تک‌نوعی برای  $B$  (یدکی که فقط می‌تواند در صورت خرابی گره نوع  $B$  به جای آن بنشیند).

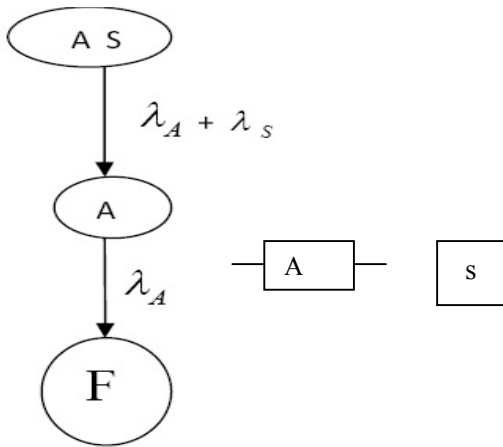
$S$ : گره یدک چندنوعی (در صورت خرابی هم گره نوع  $A$  و هم گره نوع  $B$  می‌تواند جایگزین شود).

$\lambda_A$ : نرخ خرابی گره نوع  $A$

$\lambda_{SA}$ : نرخ خرابی یدک تک‌نوعی  $A$

$F$ : state مربوط به Fail شدن سیستم.

شکل (۲) مربوط به چگالی یک و حالتی است که در آن یک گره (از نوع  $A$ ) و یک یدک چندنوعی داشته باشیم.



شکل (۲): گراف چگالی یک با یک یدک

همان‌گونه که در شکل مشخص است، در اولین state یک گره نوع  $A$  و یک یدک چندنوعی برای آن داخل کلاستر وجود دارد. در صورتی که گره  $A$  با نرخ  $\lambda_A$  و یا یدک با نرخ  $\lambda_S$  خراب شود، وارد حالت بعدی که فقط یک گره از نوع  $A$  داریم، می‌شویم.

ما در بررسی خود، یدک‌ها را داغ<sup>۲</sup> فرض می‌کنیم، به این معنی که اگر گره‌ای خراب شود، یدک بلافاصله با حسگر معیوب جایگزین می‌شود و هیچ فاصله زمانی در جایگزینی آن‌ها وجود ندارد. پس اگر گره  $A$  در اولین state خراب شود، یدک  $S$  بلافاصله جایگزین گره  $A$  می‌شود.

۲. مانند حالت بالا با این تفاوت که برای این حالت یدک چندنوع (می‌تواند به جای هر نوع گرهی بنشیند) در نظر می‌گیرد.

۳. مانند حالت اول که با دو نود  $C$  موازی نیز سری باشد همراه با ۳ یدک تک‌نوع.

در [۶] با استفاده از مدل مارکوف و در نظر گرفتن یک نرخ خرابی<sup>۱</sup> برای حسگرها، تابع اعتمادپذیری را فقط برای این سه حالت خاص و با کمک فرمول زیر، MTTF را برای آن‌ها به دست آورده است:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (7)$$

بنا بر تعریف ارائه‌شده، نرخ خرابی هر حسگر، بیانگر تعداد متوسط خرابی‌ها در واحد زمان است.

#### ۴. تحمل‌پذیری خطا با استفاده از گره‌های یدک در

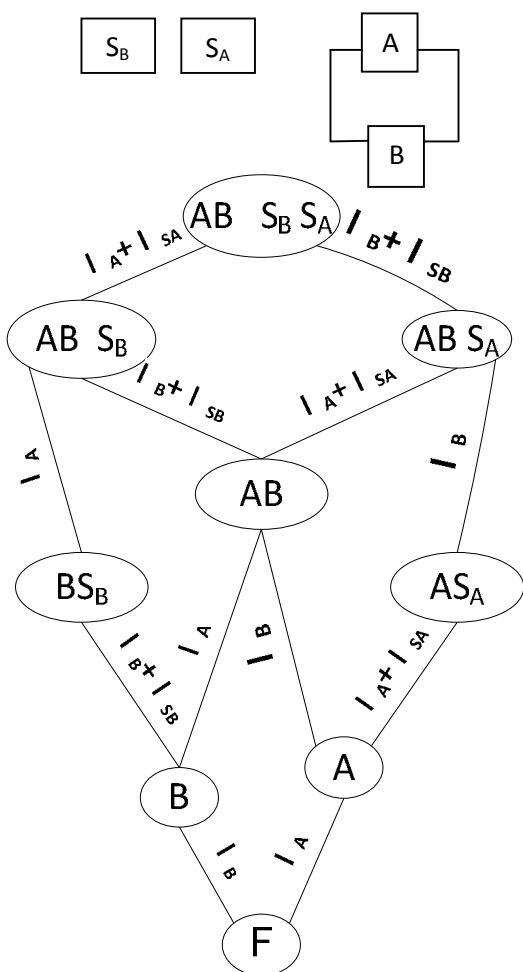
##### چگالی‌های پایین

روندی که در این بررسی دنبال کردیم، به این صورت است که برای مدل کردن شبکه، ابتدا چگالی گره‌ها را در شبکه یا کلاستر، ثابت فرض می‌کنیم؛ برای مثال، وقتی می‌گوییم چگالی ۲ می‌باشد، به این معنی است که متوسط گره‌های موجود در شبکه یا کلاستر مورد نظر برابر عدد ۲ است. با توجه به اینکه هر دسته از گره‌ها در شبکه حسگر، کار مخصوص به خود را دارند، به نوع‌های متفاوتی تقسیم می‌شوند. برای سهولت کار، نوع‌ها را با  $A, B, C, \dots$  نام‌گذاری می‌کنیم.

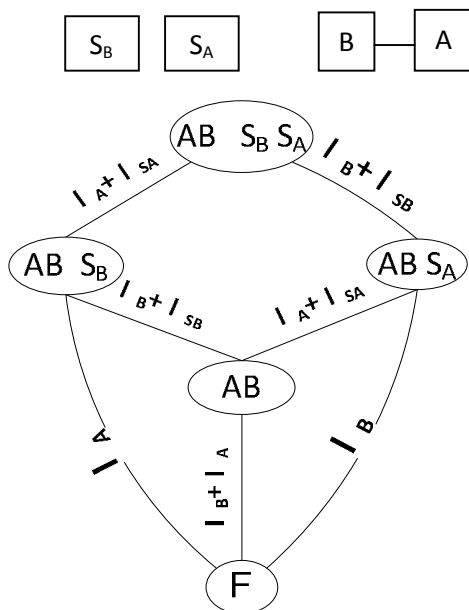
گره‌های یدک به دو دسته یدک‌های تک‌نوع و یدک‌های چندنوع تقسیم می‌شوند. یدک تک‌نوع، فقط در صورت خرابی گره نوع خاصی، می‌تواند جایگزین آن شود، ولی یدک چندنوع می‌تواند جایگزین چند نوع از گره‌ها شود [۶].

با فرض علائم زیر، مدل‌های خود را رسم می‌کنیم:

$S_A$ : گره یدک تک‌نوعی برای  $A$  (یدکی که فقط می‌تواند در صورت خرابی گره نوع  $A$  به جای آن بنشیند).



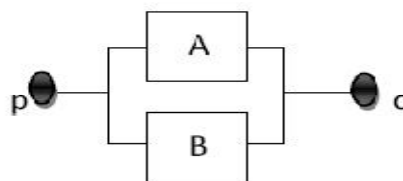
شکل (۵): - چگالی ۲، آرایش موازی،  
نوع گره‌های A و B همراه با دو یدک تک‌نوع



شکل (۶): چگالی ۲، آرایش سری نوع گره‌ها: A و B با دو یدک تک‌نوع

نرخ عبور از اولین state به دومین state برابر  $\lambda_S + \lambda_A$  است، زیرا یا گره A خراب می‌شود و یا یدک S از کار می‌افتد. در آخر، از state که در آن فقط یک گره A داریم، با نرخ خرابی  $\lambda_A$  به حالت fail می‌رسیم.

مدل بالا مربوط به چگالی یک بود که در آن، یک یدک داشتیم. برای چگالی ۲ مدل‌ها کمی پیچیده‌تر می‌شود: هر دو گره می‌توانند از نوع A و یا از انواع متفاوت مثلاً یکی A و دیگری B باشد.



شکل (۳): آرایش موازی برای چگالی ۲

\*حالات مختلفی را که این دو گره در شبکه می‌توانند در همسایگی هم قرار گیرند، در هر گراف باید لحاظ کنیم؛ مثلاً در شکل (۳) نقاط p و q بیانگر clusterهای مجاورند. این شکل بیان می‌کند که گره نوع A و گره نوع B در همسایگی یکدیگر قرار دارند و هر دو گره هم‌زمان هم در همسایگی کلاستر p و هم در شعاع همسایگی q قرار دارند.

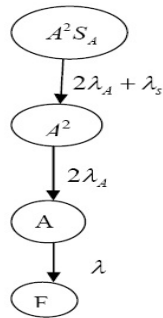


شکل (۴): آرایش سری برای چگالی ۲

اما در شکل (۴)، قرارگیری گره‌های A و B به گونه‌ای است که هر کدام در شعاع همسایگی یکدیگر قرار دارند، اما فقط گره B در شعاع همسایگی کلاستر q است. پس هر کدام از شکل‌های (۳) و (۴) حالات متفاوتی را تشکیل می‌دهند که در نحوه رسیدن به حالت Fail از یکدیگر متمایزند.

برای روشن شدن مطلب، مدل‌های شکل‌های (۳) و (۴) را برای یدک‌های تک‌نوع رسم می‌کنیم.

با فرض مساوی بودن نرخ خرابی گره‌ها، برای شبکه‌ای با دو گره یکسان موازی گراف اعتمادپذیری به صورت شکل (۷) می‌شود:



شکل (۷): گراف ۲ گره یکسان موازی با یک یدک

معادله کولمگروف برای مدل‌سازی زنجیره مارکوف به صورت زیر است:

$$P^T(t) = P^T(0) \cdot Q \quad (۸)$$

در این فرمول،  $Q$  ماتریسی از نرخ‌ها (نرخ رفتن از هر state به state دیگر) و  $P$  ماتریسی از احتمال بودن در هر یک از حالت‌هاست.  $P^T$  ماتریس ترانواده احتمال بودن در هر state و  $P^T$  ماتریس ترانواده مشتق احتمال بودن در هر یک از حالت‌ها می‌باشد. برای گراف بالا ماتریس  $Q$  و  $p$  و  $P^T$  به شکل زیر است:

$$Q = \begin{bmatrix} -3\lambda & 3\lambda & 0 & 0 \\ 0 & -2\lambda & 2\lambda & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad P(t) = \begin{bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix}$$

شکل (۸): مدل مارکوف برای گراف با ۲ گره یکسان موازی و یک یدک

$$p'^T(t) = [p'_0(t)p'_1(t)p'_2(t)p'_3(t)] \quad (۹)$$

$$p_0(t) = e^{-3\lambda t} \quad (۱۰)$$

$$p_1(t) = 3e^{-2\lambda t} - 3e^{-3\lambda t} \quad (۱۱)$$

$$p_2(t) = 3e^{-\lambda t} - 6e^{-2\lambda t} + 3e^{-3\lambda t} \quad (۱۲)$$

بنابراین تابع اعتمادپذیری برای مدل بالا به دست می‌آید:

$$R(t) = 3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t} \quad (۱۳)$$

همان‌طور که از دو شکل (۵) و (۶) پیداست، آرایش گره‌ها از نظر قرارگیری موازی و سری، در شکل گراف آن‌ها مؤثر است و آن‌ها را از یکدیگر متمایز می‌کند.

در شکل اول، حتی اگر یکی از نودهای  $A$  و  $B$  سالم باشند، باز شبکه به فعالیت خود ادامه می‌دهد، اما در شکل دوم با از بین رفتن یکی از آن‌ها، حتی اگر حسگر دیگری با یدک تک‌نوعش هنوز سالم باشد، شبکه fail می‌شود.

ما در بررسی خود می‌خواهیم تأثیر افزایش یدک‌ها (تک‌نوع و چندنوع) را بر تحمل‌پذیری خطا بسنجیم؛ از این رو، تمام حالات چگالی ۱، ۲ و ۳ را با روشی که گفتیم، مدل کرده و در هر حالت، یدک‌های مختلفی را در نظر می‌گیریم. چگالی‌های بالاتر دارای حالات بسیار بیشتری است؛ برای مثال، در چگالی ۴ حدود ۲۱۶ حالت مختلف پیش می‌آید که خود به اندازه یک بررسی جداگانه حجیم است.

## ۵. محاسبه اعتمادپذیری با استفاده از مدل مارکوف

برای اینکه بتوانیم تابع اعتمادپذیری و  $MTTF$  را به دست آوریم، شکل‌های به دست آمده در بخش ۴ را با زنجیره مارکوف مدل می‌کنیم. با استفاده از مدل زنجیره مارکوف در یک گراف می‌توانیم احتمال بودن در هر state از گراف را به دست آوریم و بعد با کمک چند قانون ساده آمار و احتمالات،  $MTTF$  را برای هر گراف به دست بیاوریم [۶].

تعریف: اعتمادپذیری سیستم به صورت احتمال اینکه سیستم در هر یک از حالت‌ها به جز حالت fail باشد، تعریف می‌شود و آن جمع احتمال هر یک از حالت‌هاست. یا یک منهای احتمال اینکه در حالت fail باشیم [۶].

## ۶. محاسبه تابع اعتمادپذیری برای انواع مدل‌ها

در بخش ۴، طریقه رسم گراف‌ها را برای هر مدل از چگالی‌ها بیان کردیم. در این بخش، روش به دست آوردن احتمالات هر state از مدل‌ها را با استفاده از فرآیند مارکوف بیان می‌کنیم.

که با انتگرال گرفتن از آن طبق فرمول ۷ داریم:

$$MTTF = \frac{11}{6\lambda} \quad (14)$$

### ۷. به دست آوردن MTTF برای کل شبکه

توابع اعتمادپذیری محاسبه شده در بخش قبل، هر کدام مربوط به یک کلاستر است، به این معنی که فرض کردیم در یک کلاستر دو یا سه حسگر داریم و توابع اعتمادپذیری را برای کلاستر به دست آوردیم. حال در ادامه می‌خواهیم با روشی، MTTF را برای کل شبکه با استفاده از چگالی‌های پایین محاسبه کنیم. در [۷]، دو فرمول کلی برای محاسبه MTTF در سیستم‌های موازی و سری ارائه و خطاهای ممکن و فرمولی کلی برای MTTF ارائه شده است:

برای حالت سری اگر نرخ خرابی هر جزء  $\lambda$  باشد، داریم:

$$R_{total}(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t) \quad (15)$$

و برای سیستم‌های موازی با نرخ خرابی هر جزء  $\lambda$  داریم:

$$R_{total}(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i(t)) \quad (16)$$

این دو فرمول در [۴ و ۸] نیز آمده که هر کدام استفاده مختلفی از آن کرده‌اند. برای اینکه بتوانیم از این دو فرمول برای محاسبه اعتمادپذیری کل شبکه استفاده کنیم، شبکه را کلاستربندی می‌کنیم. روش کلاستربندی که در بررسی خود در بخش پیاده‌سازی از آن استفاده کردیم، روش تایمر معکوس [۹] است. در این روش ابتدا به هر نود یک عدد timer اختصاص می‌یابد، هر نودی که زودتر به صفر برسد، به عنوان سرکلاستر با توجه به شروط قرارگیری آیتم‌ها در کلاستر به تعداد مشخص شده از قبل شروع به عضوگیری می‌کند. در فاصله‌ای که یک نود عضوگیری می‌کند، از عدد تایمر بقیه یک واحد کم می‌شود و این عملیات آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا همه آیتم‌ها کلاستربندی شوند.

بعد از اینکه به روش تایمر معکوس، کل شبکه را به کلاسترهایی تقسیم کردیم، باید تشخیص دهیم که این کلاسترها با یکدیگر چه نوع آرایشی از نظر موازی و سری بودن دارند. با این

تشخیص می‌توانیم برای ادامه کار از فرمول‌های (۱۵) و (۱۶) استفاده کنیم و چون تابع اعتمادپذیری کلیه کلاسترهای چگالی ۱، ۲ و ۳ را داریم، تابع اعتمادپذیری را برای کل شبکه به دست می‌آوریم و با انتگرال گرفتن از آن می‌توانیم MTTF را برای کل شبکه به دست آوریم.

### ۸. تحلیل خروجی‌های برنامه

برای شبیه‌سازی این الگوریتم، برنامه‌ای به زبان C نوشته شده که در هر حالت، n گره را در یک محیط  $L * L$  با شعاع R به صورت یکنواخت توزیع می‌کند. مراحل الگوریتم شبیه‌سازی به شکل زیر است:

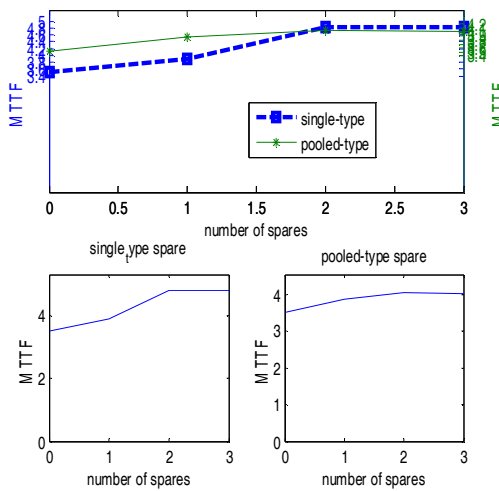
1. *Dispersing nodes random.*
2. *Making clusters using inverse timer algorithm.*
3. *Recognition of series and parallel order of nodes in clusters.*
4. *Recognition of series or parallel order between clusters.*
5. *Calculating reliability function and MTTF for the network.*

در مرحله ۲، شرط قرارگیری نودها در یک کلاستر، بودن در شعاع همسایگی یکدیگر است. در مرحله ۳، اگر دو یا سه نود موجود در یک کلاستر به طور مشترک با دو کلاستر همسایه بودند، آن‌ها را موازی و در غیر این صورت، سری در نظر می‌گیریم و سرانجام مطابق فرمول (۷)، MTTF را محاسبه می‌کنیم.

مشخصات هر نمودار در بالای آن ذکر شده است. شکل‌های (۹) و (۱۰)، شبکه‌هایی با ۵۰ و ۷۰ گره در فضای  $6 * 6$  و شعاع همسایگی ۳ را نشان می‌دهند که تعداد نود موجود در هر کلاستر، ۳ است. همان‌طور که در این خروجی مشخص است، صرف‌نظر از نوع یدک‌ها، هرچه تعداد یدک‌ها بیشتر می‌شود، مقدار MTTF نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۹) به کارگیری سه یدک نسبت به دو یدک در بالا بردن MTTF تأثیر ناچیزی دارد. چون ما نرخ خرابی را پارامتری فرض کردیم، واحد MTTF را یک بر روی واحد نرخ خرابی فرض می‌کنیم.

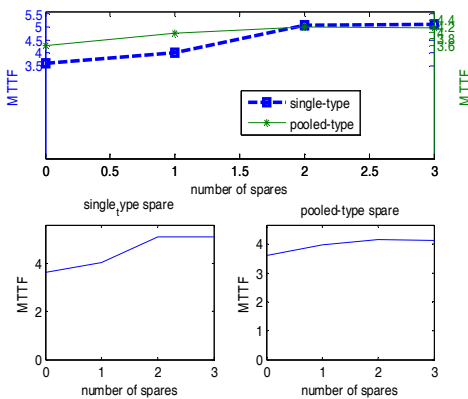
پرداخته می‌شود.

$N=600, L=8, R=4$



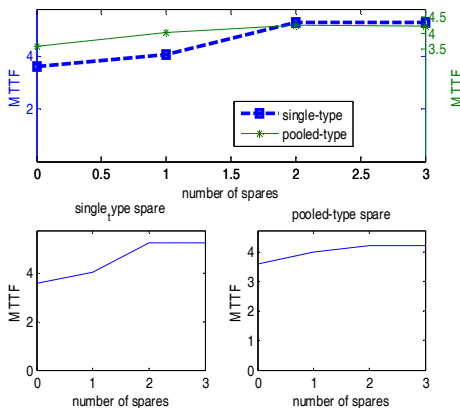
شکل (۱۱): MTTF بر حسب تعداد یدک برای ۶۰۰ نود

$N=800, L=10, R=5$



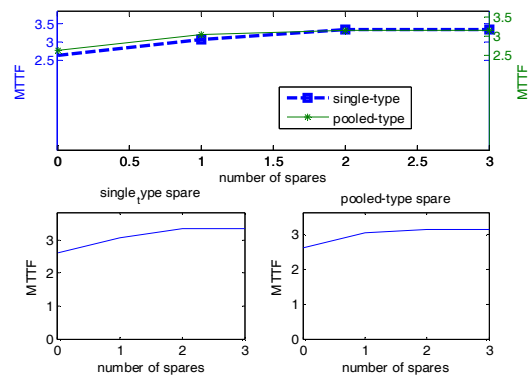
شکل (۱۲): MTTF بر حسب تعداد یدک برای ۸۰۰ نود

$N=1000, L=10, R=5$



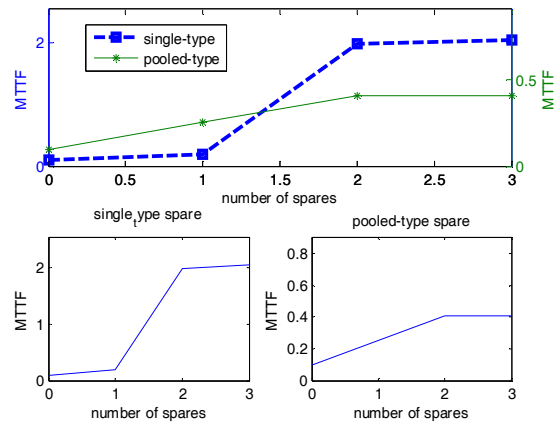
شکل (۱۳): MTTF بر حسب تعداد یدک برای ۱۰۰۰ نود

$N=50, L=6, R=3$



شکل (۹): MTTF بر حسب تعداد یدک برای ۵۰ نود

$N=70, L=10, R=2$



شکل (۱۰): MTTF بر حسب تعداد یدک برای ۷۰ نود

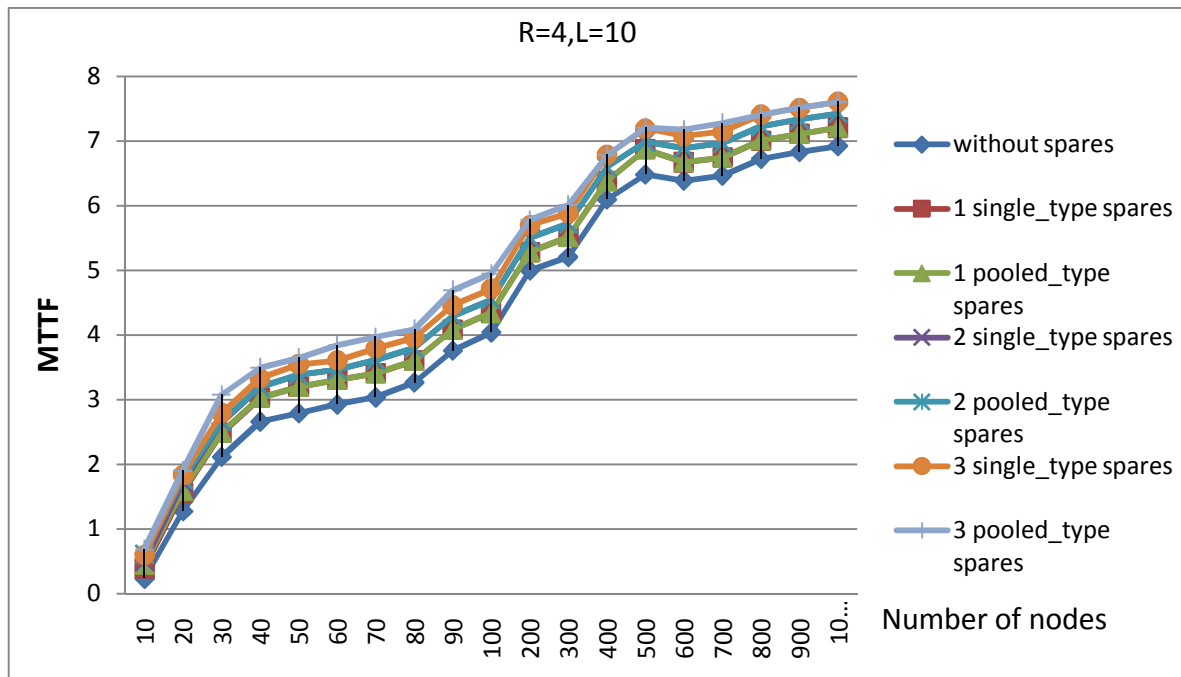
در شکل (۱۰)، به کارگیری یک یدک چندنوع نسبت به یک یدک تک‌نوع، MTTF را به مقدار بیشتری افزایش داده و بهتر عمل کرده است. این در حالی است که اگر از دو یدک استفاده کنیم، یدک‌های تک‌نوع بهتر از چندنوع عمل می‌کنند. به هر حال، با افزایش یدک‌ها MTTF نیز افزایش می‌یابد.

شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به ترتیب، شبکه‌هایی را با تعداد نودهای ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ را نشان می‌دهند. ابعاد شبکه در هر حالت، بالای نمودار ذکر شده است. به طور کلی، صرف‌نظر از نوع یدک، با افزایش یدک‌ها، مقادیر MTTF بیشتری را شاهدیم. در این خروجی‌ها، یدک چندنوعی بهتر از یدک‌های تک‌نوعی عمل می‌کنند و با رسیدن تعداد یدک‌ها به دو، MTTF روند تقریباً ثابتی را به خود می‌گیرد. چگالی شبکه در هر سه نمودار، ثابت و برابر ۳ در نظر گرفته شده است.

نکته مهم دیگری که باید مشخص شود، نحوه رفتار MTTF با افزایش تعداد نودهاست که در نمودارهای بعدی به این مورد



در نمودار شکل (۱۴)، تغییرات MTTF بر حسب افزایش دلیل پوشش بهتر و بالا رفتن چگالی نودها، میزان MTTF بیشتر تعداد نودها رسم شده است. هرچه تعداد نودها بیشتر می‌شود، به می‌شود.



شکل (۱۴): MTTF بر حسب تعداد نود (۱۰ تا ۱۰۰۰ نود)

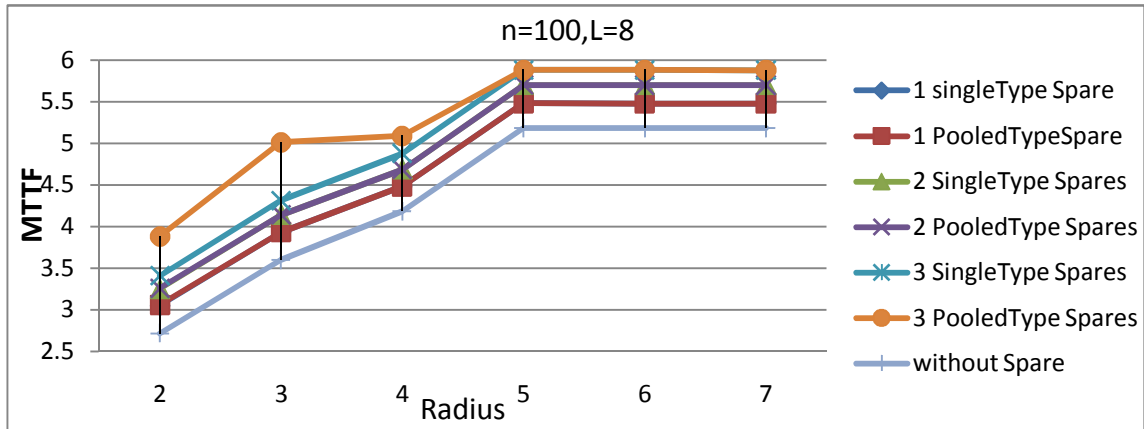
است که در دورترین فاصله از یکدیگر قرار گیرند. دورترین فاصله در واقع بر وی اضلاع و قطر محیط مربعی است که در آن پخش می‌شوند. در این حالت، زمانی که شعاع همسایگی به ۵ می‌رسد، حتی دورترین نودها هم در شعاع همسایگی یکدیگر قرار می‌گیرند و همگی نودها در شعاع همسایگی یکدیگر و با هم موازی می‌شوند. از شعاع ۵ به بعد، هرچه مقدار شعاع بیشتر شود، باز هم همه نودها با هم موازی می‌مانند و تأثیری در آرایش آنها به وجود نمی‌آید و تابع اعتمادپذیری برای همه آن‌ها یکسان است و MTTF ثابت می‌ماند.

در نمودارهای (۱۶) و (۱۷)، تغییرات MTTF بر حسب شعاع برای تعداد نودهای ۱۰ تا ۱۰۰ نشان داده شده است. نمودار (۱۶) برای دو یدک و نمودار (۱۷) برای یک یدک است. در هر دو نمودار با افزایش شعاع، MTTF بیشتر شده و زمانی که شعاع تقریباً به اندازه نصف فضایی که نودها در آن

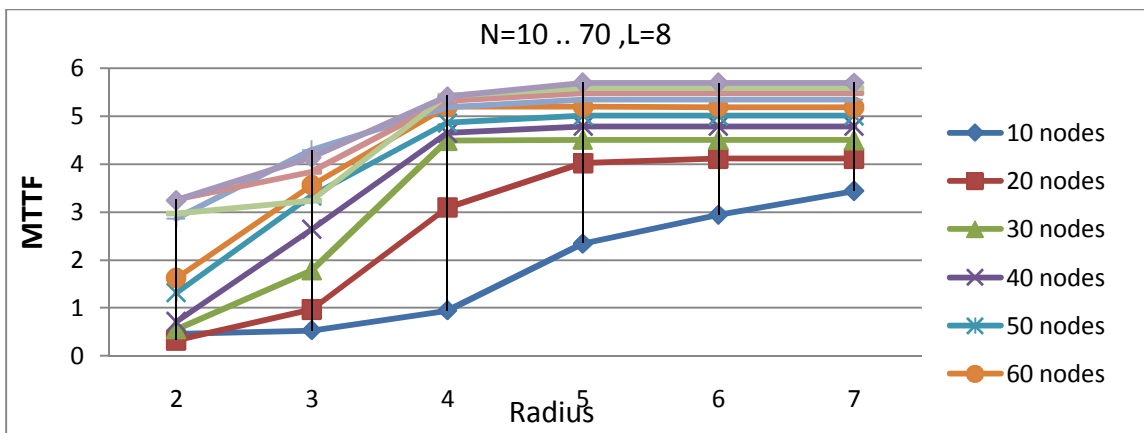
برای تعداد گره‌های کمتر از ۴۰۰، سه گره یدک تک‌نوع بهتر از سه گره یدک اشتراکی عمل می‌کند، ولی در بازه ۴۰۰ تا ۸۰۰ سه گره یدک اشتراکی بهتر عمل می‌کند. برای تعداد گره‌های بیشتر از ۸۰۰ رفتار هر دو حالت یکسان است. MTTF برای تمامی حالت‌ها، در بازه ۴۰۰ تا ۸۰۰ ثابت است، ولی برای تعداد گره‌های خیلی زیاد، این مقدار نیز افزایش پیدا می‌کند.

نمودار شکل (۱۵)، روند افزایش شعاع را برای ۱۰۰ نود نشان می‌دهد که در فضای ۸\*۸ پخش شده‌اند. با افزایش شعاع به دلیل قرار گرفتن تعداد نودهای بیشتر در شعاع همسایگی یکدیگر، تعداد کلاسترهای بیشتری با یکدیگر موازی شده و از آنجا که کلاسترهای موازی، MTTF بیشتری دارند، MTTF کل شبکه بیشتر می‌شود. از شعاع ۵، روند MTTF تقریباً ثابت می‌ماند، زیرا وقتی نودها در فضای مربعی ۸\*۸ پخش شده‌اند، بدترین حالت قرارگیری نودها در شعاع همسایگی یکدیگر این

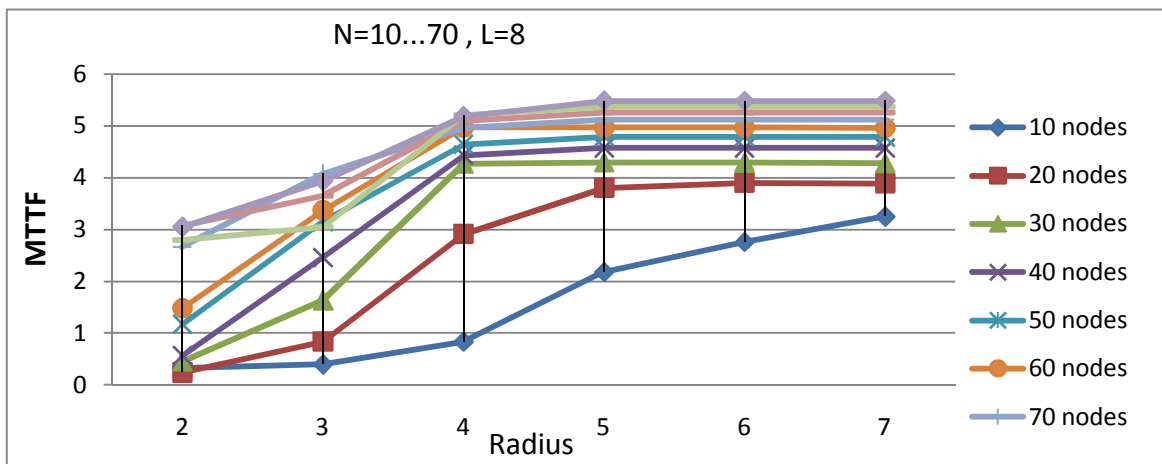
پخش می‌شوند می‌رسد، MTTF با شیب کمتری پیش می‌رود. این تفاوت که برای دو یدک، مقادیر MTTF اندکی برای همهٔ روند MTTF برای هر دو نمودار بسیار به هم نزدیک است با نودها بیشتر از حالت یک یدک است.



شکل (۱۵): MTTF بر حسب شعاع برای ۱۰۰ نود



شکل (۱۶): MTTF بر حسب شعاع با دو یدک تک نوع



شکل (۱۷): MTTF بر حسب شعاع با یک یدک تک نوع

## ۹. نتیجه گیری

## مراجع

- [1] H. AboElFotouh, E. Elmallah, and H. Hassnein, "On the Reliability of Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2006) Symposium on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, June, 2006.
- [2] M.H.Shazly, E.S.Elmallah, H.M.F.AboElFotouh, A Tree-State Node Reliability Model for Sensor Networks, *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, 2010 IEEE, Page(s): 1 - 5.
- [3] A.Ghafari, A.MRahmani, Fault Tolerant model for Data Dissemination in Wireless Sensor Networks, *Information Technology, 2008.ITSim2008, International Symposium on*, 26-28 Aug. 2008 Volume:4 Page(s): 1 - 8.
- [4] F.Karim Shaikh, A.Khelil and N.Suri., On Modeling the Reliability on Data Transport in Wireless Sensor Networks Parallel, Distributed and Network-Based Processing, 2007.PDP'07. 15th EUROMICRO International Conference: 7-9 Feb. 2007, Page(s): 395- 402.
- [5] A.PhanSpeer and I. Chan., Effect of redundancy on the mean time to failure, *Concurrency and Computation: Practice & Experience Journal*, Volume 19 Issue 8, June 2007 Pages: 1119 - 1128.
- [6] D.Bein, V.Jolly, B.Kumar, S.Latifi, Reliability Modeling in Wireless Sensor Networks, *international Journal of information technonoly*, Vol.11.No2.2005.
- [7] V.Faraci ,B.Systems, Caculating Failure Ratesof Series/Parallel Networks, *The journal of Alion's Science & Technology*, 2006.
- [8] S.Distefano , L.Xing .A New Approach to Modeling the System Reliability: Dynamic Reliability Block Diagrams, *Reliability and Maintainability Symposium*, 2006. RAMS '06. Annual 23-26 Jan. 2006 ,page(s): 189 - 195.
- یک دیدگاه عمومی برای بالا بردن تحمل پذیری خطا در WSN، استفاده از افزونگی گره با استفاده از گره های یدک است. در این بحث، تلاش در جهت بالا بردن کیفیت یدک ها یا به کارگیری تعداد بیشتری از گره های یدک چندنوعی و تکنوعی بود. در این مقاله، تحمل پذیری خطا با گره های یدک در چگالی های پایین بررسی شد و مشخص شد که در هر حالت، یدک های چندنوعی و تکنوعی در چگالی های پایین با یکدیگر مقایسه می شوند. روشی که دنبال شد به این صورت بود که ابتدا در cluster برای یک چگالی ثابت، گراف گره ها رسم شد و مشاهده شد که با توجه به نحوه قرارگیری گره ها در همسایگی های یکدیگر، در هر چگالی چندین گراف به دست می آید. برای هر کدام از این گراف ها یدک های تکنوع و سپس چندنوع در نظر گرفته شد و با فرض نرخ خرابی  $\lambda$  مدل مارکوف رسم گردید. با استفاده از مدل مارکوف احتمال بودن در هر حالت و در نتیجه تابع اعتماد پذیری و سپس متوسط میزان خرابی را به دست آمد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد کل گره های شبکه، تحمل پذیری خطا را نیز افزایش می دهد. همچنین افزایش تعداد یدک ها در یک چگالی ثابت، تحمل پذیری خطا را افزایش می دهد. در یک چگالی ثابت و شعاع و ابعاد مشخص، گره های یدک تکنوع، بهتر از گره های یدک اشتراکی عمل می کنند. همچنین بهترین حالت ها به ترتیب، سه گره یدک تکنوع، سه گره یدک اشتراکی، دو گره یدک تکنوع، دو گره یدک اشتراکی، یک یدک اشتراکی و بدون گره یدک است. برای کار بعدی می توان تأثیر ابعاد و شکل شبکه، روی MTTF و رفتار شبکه با کلاسترهای با چگالی زیاد را بررسی کرد.

- [9] *L.Wang, Q.Xu. GPS-FREE localization Algorithm for Wireless sensor network, Journal: Sensors 2010, Vol:10(6)pages: 5899-5926.*