

# اعمال هم‌زمان اکتساب انرژی و انتقال داده در سیستم مخابرات مشارکتی بر پایه استفاده از چندین رله چندآنتنه با در نظر گرفتن جایابی رله‌ها

عبدالحمید زاهدی<sup>۱</sup>، استادیار

۱- گروه برق - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - zahedi@kut.ac.ir

**چکیده:** یکی از مشکلات اساسی شبکه‌های بی‌سیم کمبود انرژی لازم به‌خصوص در شبکه‌های مشارکتی مبتنی بر رله است که در آن رله‌ها نقش اساسی در انتقال اطلاعات دارند اما انرژی محدودی وجود دارد. برای غلبه بر این مشکل، اکتساب انرژی از سیگنال‌های رادیویی مورد توجه قرار گرفته است. با این کار گره‌های واسط توانایی کسب انرژی از سیگنال‌های رادیویی مبدأ را دارند و با این انرژی حاصل شده می‌توانند اطلاعات را به سمت مقصد هدایت کنند. بنابراین گره‌های واسط که همان رله‌ها هستند، بایستی دو کار مهم اکتساب انرژی از سیگنال‌های رادیویی و انتقال اطلاعات از مبدأ به مقصد را انجام دهند. دو راهبرد مهم برای این هدف وجود دارد که پروتکل رله تقسیم‌زمانی و پروتکل رله تقسیم‌توانی نامیده می‌شوند. این دو پروتکل می‌توانند در سیستم‌های حساس به تأخیر و غیرحساس به تأخیر بکار گرفته شوند. کارهای قبلی انجام گرفته در این زمینه یک رله را به‌عنوان واسط استفاده کرده‌اند و یا از یک آنتن برای اکتساب انرژی استفاده شده است. اما در این بررسی برای بهبود گذردهی اطلاعات و احتمال قطع از چندین رله واسط با چندین آنتن در هر رله استفاده شده است. هم‌چنین جایابی مناسب رله‌ها بر اساس فاصله از مبدأ یا مقصد و نوع چینش آن‌ها و تأثیر این جایابی بر نرخ گذردهی اطلاعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، هنگام استفاده از چندین رله و چندین آنتن در هر رله، قابلیت اکتساب انرژی سیستم بیشتر شده و کارایی سیستم به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** اکتساب انرژی از سیگنال رادیویی، چندرله‌ای و چندآنتنی، پروتکل رله تقسیم‌زمانی، پروتکل رله تقسیم‌توانی، انتقال حساس به تأخیر، انتقال غیرحساس به تأخیر، جایابی رله.

## Simultaneous Energy Harvesting and Information Processing in Wireless Communications Using Multiple Relays with Multiple Antennas Considering Various Locations of Relays

A. Zahedi<sup>1</sup>, Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: zahedi@kut.ac.ir

**Abstract:** Wireless networks suffer from battery discharging specially in cooperative communications, where multiple energy constrained relays are used. To overcome this problem, energy harvesting from RF signals is used to charge the node battery. These intermediate nodes have the ability to harvest energy from the source signal and use the harvested energy to transmit information to the destination. In fact, the node tries to harvest energy and then transmit the data to destination. Division of energy harvesting and data transmission periods can be done in two different protocols, namely time switching based relaying protocol (TSR) and power splitting based relaying protocol (PSR). These two protocols can also be applied in delay-limited and delay-tolerant transmission systems. The previous works have assumed a single relay for energy harvesting; However, in this paper, the proposed method is concentrated on improving the outage probability and throughput using multiple antennas in each relay node instead of using single antenna. Also the optimum location of multiple relays is discussed and its effect on throughput of the system is mainly considered. According to our simulation results, when multi-antenna relays are used, ability of energy harvesting is increased and thus system performance will be improved to a great extent. MRC selection relay scheme is used when the destination chooses a group of relays and antennas satisfying the required SNR.

**Keywords:** Delay-limited transmission, delay-tolerant transmission, energy harvesting, multiple antennas, multiple relays, TSR and PSR protocols, relay optimum location.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۹

نام نویسنده مسئول: عبدالحمید زاهدی

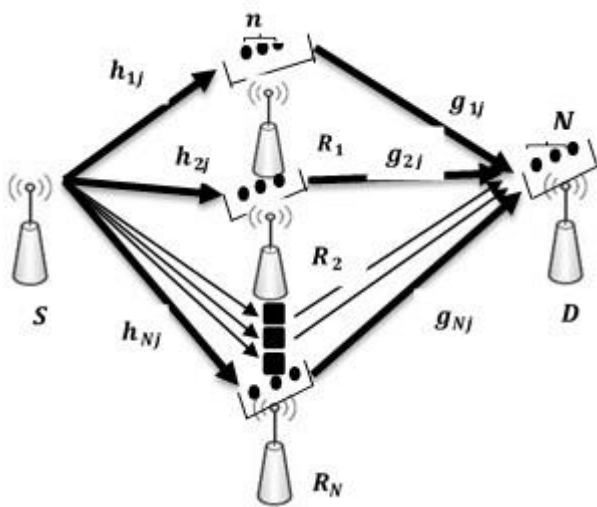
نشانی نویسنده مسئول: کرمانشاه - بزرگراه امام خمینی - بعد از میدان شهدا - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - دانشکده انرژی - گروه برق.

## ۱- مقدمه

در این مقاله، اکتساب انرژی و ارسال داده به‌صورت هم‌زمان در چندین رله که هر کدام مجهز به چندین آنتن هستند انجام گرفته که مزیت اصلی آن عدم نیاز به اکتساب انرژی در سمت مبدأ یا مقصد است. راهبرد انتخاب‌شده برای رله‌ها تقویت و ارسال<sup>۱۰</sup> است و مبدأ یک آنتن و مقصد شامل چندین آنتن است. دو پروتکل رله تقسیم‌زمانی و رله تقسیم‌توانی برای انجام هم‌زمان اکتساب انرژی و ارسال داده در رله‌ها بررسی شده است. روش پیشنهادی با استفاده از این دو پروتکل در سیستم حساس به تأخیر و غیرحساس به تأخیر تحت ارزیابی قرار گرفته است. مطالب این مقاله در ادامه به‌صورت زیر ارائه شده است. در بخش دوم مدل سیستم مخابراتی مشارکتی<sup>۱۱</sup> بیان شده و در بخش سوم روش پیشنهادی بحث خواهد شد. در بخش چهارم نتایج اعمال روش پیشنهادی بر مدل سیستم ارائه شده و در بخش آخر که بخش پنجم است نتیجه‌گیری مقاله بیان خواهد شد.

## ۲- مدل سیستم

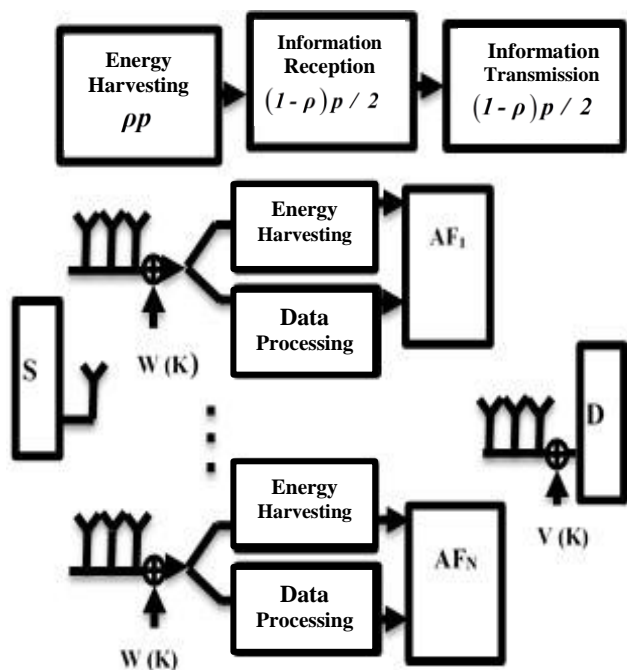
مدل سیستم مخابراتی رله‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است. مبدأ و مقصد هر کدام با یک رله مشخص شده‌اند. رله‌های واسط شامل چندین آنتن هستند که داده را از سمت مبدأ به سمت مقصد هدایت می‌کنند. در اینجا فرض شده است که مسیر مستقیم بین مبدأ و مقصد با توجه به موانع و کانال محو‌شوندگی وجود ندارد. روش انتقال داده تقویت و ارسال است.



شکل ۱: مدل سیستم مخابراتی مشارکتی چندرله چندآنتنه پیشنهادی.

همان‌طور که اشاره شد روش ترکیب با نسبت حداکثر برای دریافت بهترین سیگنال در گیرنده تحت کانال محو‌شدگی و نویز گوسی بکار می‌رود. در این مقاله دو روش پروتکل رله تقسیم‌زمانی و رله تقسیم‌توانی بررسی و ارزیابی شده است. شکل ۲ بلوک دیاگرام روش پیشنهادی چندرله چندآنتنه را برای انجام هم‌زمان اکتساب انرژی و ارسال داده در پروتکل رله تقسیم‌زمانی نشان می‌دهد. رله‌ها در این پروتکل، عملکرد خود را به دو بازه زمانی یکی برای اکتساب انرژی و دیگری برای ارسال داده تقسیم می‌کنند. با فرض اینکه زمان  $T$  زمان کل

راه‌حل اکتساب انرژی از سیگنال‌های رادیویی برای افزایش طول عمر گره‌های انرژی-محدود در شبکه‌های بی‌سیم در سال‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. شارژ یا تعویض باتری علاوه بر این که مشکلات فراوانی از جمله هزینه بالا دارد، در برخی موارد نیز سخت و خطرناک است (زمانی که حسگرها در جای خاصی از یک ساختمان و یا در بدن انسان قرار گرفته باشند) [۱]. از راه‌حل‌های مرسوم تأمین انرژی می‌توان به انرژی خورشیدی، انرژی بادی و یا حرارتی اشاره کرد [۲-۶]. راه‌حل جدیدی که مطرح شده است تأمین انرژی از سیگنال‌های رادیویی محیط است [۷]. سیگنال‌های فرستنده‌های مختلف در محیط می‌توانند منابع مناسبی برای تأمین انرژی رله‌های مخابراتی در شبکه‌های مشارکتی باشند. در واقع در این فناوری، انرژی سیگنال رادیویی به انرژی الکتریکی DC تبدیل شده و از این انرژی برای ارسال داده می‌توان استفاده کرد. این روش مورد توجه بسیاری از شبکه‌های بی‌سیم مانند شبکه‌های حسگر قرار گرفته است [۸-۹]. از طرف دیگر در شبکه‌های بی‌سیم، استفاده از رله‌ها و مشارکت آن‌ها در انتقال داده باعث افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت ارتباط می‌شود. اما در اکثر این نوع شبکه‌ها، مشکل تأمین انرژی رله‌ها وجود دارد و طول عمر این نوع شبکه‌ها محدود است [۱۰]. بنابراین اکتساب انرژی از سیگنال‌های رادیویی به‌عنوان راه‌حلی برای شبکه‌های نسل آینده ارتباطات مطرح است و پیاده‌سازی عملی آن مورد بحث دانشمندان این حوزه است [۱۱]. روش انجام هم‌زمان تأمین انرژی رله‌ها و پردازش اطلاعات و ارسال آن‌ها روش بسیار مفیدی در شبکه‌های ارتباطی مبتنی بر رله است [۱۲-۱۴]. اولین ایده مطرح در این زمینه در [۷] بیان شد که در آن مقاله نویسنده به مصالحه انرژی و اطلاعات که به‌صورت هم‌زمان ارسال می‌شوند پرداخته است. نحوه تعامل اطلاعات و انرژی که به صورت هم‌زمان ارسال می‌شوند در [۱۳] مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در واقع بررسی و نتایج مطرح شده در [۷] توسط محققین دیگر بررسی و پیگیری شده و کانال محو‌شدگی فرکانس-گزینه علاوه بر نویز گوسی در نظر گرفته شده است [۹]. در یک بررسی بحث ارسال هم‌زمان انرژی و اطلاعات با فرض اطلاع از شرایط کانال بررسی شده است [۱]. اما در [۱۵] همین بحث بدون داشتن اطلاعات کانال در مبدأ ارائه شده است. با توجه به تداخل هم‌کانالی، مدل‌های بهینه برای دستیابی به مصالحه بین انرژی و نرخ داده<sup>۲</sup> و همچنین انرژی و احتمال قطع<sup>۳</sup> در سیستم حساس به تأخیر<sup>۴</sup> و غیرحساس به تأخیر<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶]. کاربرد روش اکتساب انرژی و ارسال داده به‌طور هم‌زمان در شبکه‌های رادیو شناختی در نظر گرفته شده که نرخ گذردهی شبکه ثانویه با توجه به حداقل کردن نرخ از دست رفتن داده در شبکه اولیه، بیشینه شود [۱۷]. روش رمزگشایی و ارسال<sup>۶</sup> (DF) بر اساس پروتکل رله تقسیم‌زمانی<sup>۷</sup> و پروتکل رله تقسیم‌توانی<sup>۸</sup> ارائه شده [۱۸] و همین روش با استفاده از روش ترکیب با نسبت حداکثر<sup>۹</sup> (MRC) بررسی شده است [۱۹].



شکل ۳: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی چندرله چندآنتنه در پروتکل رله تقسیم توانی.

سیگنال دریافتی در هر رله به صورت رابطه زیر است:

$$r(k) = \sqrt{p_s} d_{sr}^{-\alpha} h_i^* s(k) + w(k) \quad (1)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{Nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

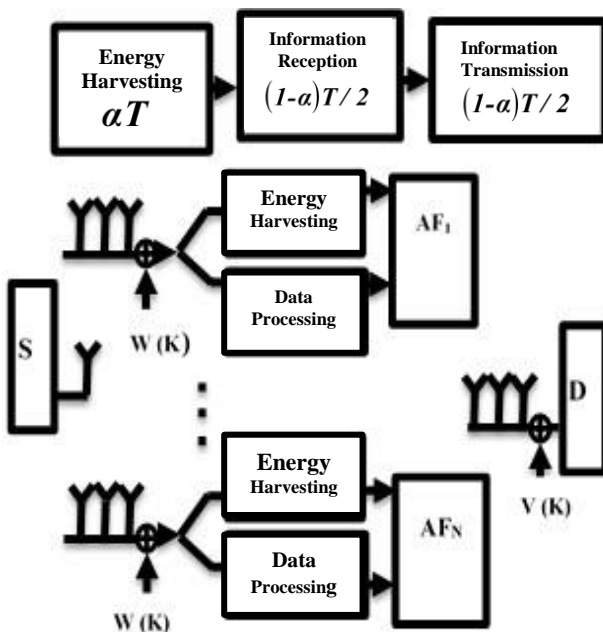
که توان سیگنال مبدأ و  $H$  پاسخ فرکانسی بین مبدأ و  $N$  رله است و هر رله شامل  $n$  آنتن می‌باشد (ابعاد ماتریس  $H$  برابر  $N \times n$  است). همچنین،  $h_i^*$  هرمیتین سطر  $i$ ام ماتریس  $H$  و مرتبط با رله  $i$ ام است. تلفات مسیر با  $d_{sr}^{-\alpha}$  مدل شده است که  $d$  فاصله رله از مبدأ و  $\alpha$  نمای تلفات مسیر است. همچنین  $w(k)$  نویز گوسی آنتن هر رله است. در مقصد سیگنال دریافتی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d_i(k) = \sqrt{p_i} d_{rd}^{-\alpha} \frac{\|g_i\|_F^2}{\sqrt{\|g_i\|_F^2}} t_i(k) + v_i(k) \quad (3)$$

در رابطه فوق  $d_i(k)$  سیگنال دریافتی هر آنتن مقصد و  $t_i(k)$  سیگنال ارسالی از هر رله به مقصد است.  $AF$  ضریب تقویت رله‌هاست.  $p_i$  توان اکتسابی برای ارسال داده‌ها و  $v_i(k)$  نویز گوسی مقصد است. هم‌چنین  $G$  پاسخ فرکانسی کانال بین رله‌ها و مقصد است که به صورت زیر بیان می‌شود:

بلوک داده باشد، بازه زمانی اکتساب انرژی  $\alpha T$  در نظر گرفته می‌شود که  $0 < \alpha < 1$  و بازه زمانی باقیمانده نیمی برای دریافت داده از مبدأ و نیمه دیگر برای ارسال آن به مقصد است که سهم هر کدام برابر است با  $(1-\alpha)T/2$ . در واقع  $\alpha$  نمایانگر ضریب تقسیم بازه زمانی بین اکتساب انرژی و ارسال داده است. رله‌ها انرژی رادیویی را برای شارژ باتری‌ها به انرژی DC تبدیل می‌کنند [۱۱، ۱۷].

شکل ۳ بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی چندرله چندآنتنه در پروتکل رله تقسیم توانی را نشان می‌دهد. این پروتکل زمان را به نسبت مساوی بین فاز اکتساب انرژی و فاز ارسال داده تقسیم می‌کند طوری که زمان کل بلوک داده  $T$  به  $T/2$  برای فاز اول ارتباط بین مبدأ و رله‌ها و  $T/2$  باقیمانده به ارتباط بین رله‌ها و مقصد تقسیم می‌شود. در فاز اول، توان دریافتی سیگنال به اندازه  $pp$  به بخش اکتساب انرژی و مقدار  $(1-p)p$  برای ارسال داده اختصاص می‌یابد. ضریب  $p$  که این نسبت تقسیم توان را کنترل می‌کند بین صفر و یک است که البته این ضریب بر نرخ گذردهی تأثیرگذار است [۱۷]. روابط سیگنال ارسالی مبدأ و سیگنال دریافتی مقصد به صورت کلی در این بخش ذکر می‌شود و جزئیات آن‌ها در بخش بعد به تفصیل بیان می‌شود.



شکل ۴: بلوک دیاگرام ارسال و دریافت داده به روش پیشنهادی در پروتکل رله تقسیم زمانی.

$$C = E_{h,g}(\log_2(1 + \gamma_D)) \quad (10)$$

که  $E$  نمایانگر امید ریاضی است.

در حالت انتقال حساس به تأخیر در پروتکل رله تقسیم توانی، نرخ گذردهی به  $P_{out}$  بستگی دارد و داریم:

$$\tau = \frac{(1 - P_{out})R}{2} \quad (11)$$

و در سیستم غیرحساس به تأخیر، نرخ گذردهی به صورت رابطه زیر مطرح می‌شود [۱۷]:

$$\tau = \frac{C}{2} \quad (12)$$

که نشان می‌دهد در پروتکل تقسیم توانی، نرخ گذردهی فقط به ظرفیت ارگادیک بستگی دارد.

### ۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی برای غلبه بر مشکل کمبود انرژی رله‌ها و افزایش طول عمر آن‌ها ارائه می‌شود که از چندین آنتن در سیستم چندرله‌ای استفاده می‌کند و هر دو پروتکل رله تقسیم‌زمانی و رله تقسیم‌توانی در دو سیستم حساس به تأخیر و غیرحساس به تأخیر مورد ارزیابی قرار گرفته و عملکرد آن‌ها مقایسه شده است. هدف ارائه روش پیشنهادی افزایش نرخ گذردهی و کاهش احتمال قطع است.

#### ۳-۱- پروتکل رله تقسیم زمانی

با توجه به [۱۷]، سیگنال دریافتی رله  $\tilde{m}$  در ساختار پیشنهادی چندرله چندآنتنه (شکل ۲) به صورت زیر است:

$$r_i(k) = \sqrt{p_s d_{st_i}^{-\nu}} h_i s(k) + w_i(k) \quad (13)$$

بعد از استفاده از ترکیب نسبت حداکثر داریم:

$$r_i(k) = \sqrt{p_s d_{st_i}^{-\nu}} \|h_i\|_F^2 s(k) + h_i^* w_i(k) \quad (14)$$

بنابراین انرژی اکتسابی در هر رله به صورت زیر است:

$$E_i = E\{r_i(k) r_i^*(k)\} \alpha T \eta \quad (15)$$

که بخش اول رابطه بالا که مربوط به توان سیگنال دریافتی رله  $i$  ام است از جای‌گذاری رابطه (۱۴) به صورت بدست می‌آید:

$$E\{r_i(k) r_i^*(k)\} = p_s d_{st_i}^{-\nu} \|h_i\|_F^4 + \|h_i\|_F^2 \sigma_w^2 \quad (16)$$

و  $0 < \eta < 1$  بازدهی اکتساب انرژی و  $\sigma_w^2$  واریانس نویز آنتن رله است. توان ارسالی هر رله از تقسیم انرژی بر مدت‌زمان ارسال با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i = \frac{E_i}{(1-\alpha) \frac{T}{2}} = \frac{2\alpha}{(1-\alpha)} \eta (p_s d_{st_i}^{-\nu} \|h_i\|_F^2 + \sigma_w^2) \|h_i\|_F^2 \quad (17)$$

$$= \frac{2\alpha}{(1-\alpha)} \eta A \|h_i\|_F^2$$

که  $A$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ g_{N1} & g_{N2} & \dots & g_{Nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

در نهایت با استفاده از ترکیب با نسبت حداکثر در گیرنده داریم (بحث گسترده‌تر روابط در بخش بعد آورده شده است):

$$d_r(k) = MRC(d(k)) \quad (5)$$

#### ۲-۱- انتقال حساس به تأخیر و غیرحساس به تأخیر

در این مقاله علاوه بر در نظر گرفتن دو پروتکل رله تقسیم توانی و زمانی، سیستم مخابراتی مشارکتی در دو حالت حساس به تأخیر و غیرحساس به تأخیر نیز تحلیل می‌شود. به عبارت دیگر برای هر پروتکل رله‌ای، پارامترهای هر دو سیستم حساس به تأخیر و غیرحساس به تأخیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در سیستم حساس به تأخیر که بایستی تأخیر محدود و دارای حد بالایی باشد، نرخ گذردهی با در نظر گرفتن احتمال قطع در مقصد بررسی می‌شود. در صورتی که در سیستم غیرحساس به تأخیر، محدودیتی روی زمان تأخیر نداریم و نرخ گذردهی بر اساس ظرفیت ارگادیک مقصد به دست می‌آید. در حالت حساس به تأخیر مبدأ با سرعت ثابتی داده را می‌فرستد که شرایط حدی احتمال قطع را برآورده کند. در صورتی که در حالت غیرحساس به تأخیر، مبدأ با هر سرعتی کمتر یا مساوی میزان ظرفیت ارگادیک می‌تواند داده را ارسال کند. در حالت ارسال غیرحساس به تأخیر برای پروتکل رله تقسیم زمانی، نرخ گذردهی به احتمال قطع ( $P_{out}$ ) بستگی دارد و داریم [۱۷]:

$$\tau = \frac{(1 - P_{out})R(1 - \alpha)}{2} \quad (6)$$

که  $\tau$  نرخ گذردهی است و داریم:

$$P_{out} = P(\gamma_D < \gamma_0) \quad (7)$$

$$R = \log_2(1 + \gamma_0) \quad (8)$$

که  $R$  نرخ داده،  $\gamma_0$  مقدار آستانه SNR برای آشکار سازی در ست داده ( $\gamma_0 = 2^R - 1$ ) در مقصد،  $\gamma_D$  مقدار SNR در مقصد و  $p_{out}$  احتمال قطع است و  $\alpha$  نیز نسبت زمانی برای اکتساب انرژی است. این رابطه بیان می‌کند که احتمال قطع در سیستم غیرحساس به تأخیر به احتمال کمتر شدن مقدار SNR در مقصد از SNR آستانه بستگی دارد و نرخ گذردهی به این احتمال قطع و نرخ ارسال داده و نیز  $\alpha$  وابسته است. رابطه بالا نشان می‌دهد که با کاهش  $P_{out}$ ،  $\tau$  افزایش می‌یابد. در حالت دوم که انتقال غیرحساس به تأخیر است نرخ گذردهی با توجه به رابطه زیر مطرح می‌شود:

$$\tau = \frac{(1 - \alpha)C}{2} \quad (9)$$

که  $C$  ظرفیت ارگادیک کانال است و داریم:

که  $\mathbf{H}$  مانند رابطه (۲) است  $\mathbf{w}(k)$  نویز گوسی آنتن است. انرژی اکتسابی رله‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E\{r_i(k)r_i^*(k)\} = p_s d_{sr}^{-\nu} \|\mathbf{h}_i\|_F^4 + \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \sigma_w^2 \quad (25)$$

$$E_r = E\{r(k)r^*(k)\} \rho \eta \frac{T}{2} \quad (26)$$

بنابراین توان ارسالی رله‌ها برابر است با:

$$p_r = \frac{E_r}{T} = \rho \eta \left( p_s d_{sr}^{-\nu} \|\mathbf{h}_i\|_F^2 + \sigma_w^2 \right) \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \quad (27)$$

$$= \rho \eta A \|\mathbf{h}_i\|_F^2$$

شبهه به پروتکل رله تقسیم زمانی، سیگنال ارسالی بعد از تقویت و نرمال‌سازی به صورت زیر است:

$$t_i(k) = \frac{r_i(k)}{\sqrt{E\{r(k)r^*(k)\}}} = \frac{r_i(k)}{\sqrt{A \|\mathbf{h}_i\|_F^2}} \quad (28)$$

سیگنال مقصد در هر آنتن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d_i(k) = \sqrt{p_r d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{g}_i\|_F^2}{\sqrt{\|\mathbf{g}_i\|_F^2}} t_i(k) + v_i(k)$$

$$= \sqrt{p_r d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{g}_i\|_F^2}{\sqrt{A \|\mathbf{g}_i\|_F^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2}} r_i(k) + v_i(k) \quad (29)$$

$$= \sqrt{p_s p_r d_{sr}^{-\nu} d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{g}_i\|_F^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2}{\sqrt{A \|\mathbf{g}_i\|_F^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2}} s(k)$$

$$+ \sqrt{p_r d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{g}_i\|_F^2 \mathbf{h}_i^\dagger}{\sqrt{A \|\mathbf{g}_i\|_F^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2}} \mathbf{w}_i(k) + v_i(k)$$

و بالاخره در مقصد نیز با استفاده از ترکیب نسبت حداکثر برای سیگنال‌های دریافتی  $N$  رله داریم:

$$d_f(k) = \mathbf{g}_f^\dagger \mathbf{d}(k) \quad (30)$$

$\mathbf{d}$  بردار سیگنال هر رله دریافت شده توسط  $N$  آنتن مقصد است و  $d_f(k)$  سیگنال نهایی مقصد است. بنابراین در مرحله نهایی می‌توان چنین نوشت:

$$d_f(k) = \sqrt{p_s p_r d_{sr}^{-\nu} d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{G}\|_F^4 \|\mathbf{H}\|_F^2}{\sqrt{A \|\mathbf{G}\|_F^2 \|\mathbf{H}\|_F^2}} s(k)$$

$$+ \sqrt{p_r d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{G}\|_F^4 \mathbf{h}_i^\dagger}{\sqrt{A \|\mathbf{G}\|_F^2 \|\mathbf{H}\|_F^2}} \mathbf{w}_i(k) \quad (31)$$

$$+ \mathbf{g}_f^\dagger v_i(k)$$

بنابراین برای محاسبه SNR داریم:

$$SNR = \frac{p_s p_r d_{sr}^{-\nu} d_{rd}^{-\nu} \frac{\|\mathbf{G}\|_F^4 \|\mathbf{H}\|_F^2}{A \|\mathbf{G}\|_F^2 \|\mathbf{H}\|_F^2}}{p_r d_{rd}^{-\nu} \frac{\|\mathbf{G}\|_F^4 \|\mathbf{H}\|_F^2}{A \|\mathbf{G}\|_F^2 \|\mathbf{H}\|_F^2} \sigma_w^2 + \|\mathbf{G}\|_F^2 \sigma_v^2} = \frac{p_s p_r d_{sr}^{-\nu} d_{rd}^{-\nu} \|\mathbf{G}\|_F^4 \|\mathbf{H}\|_F^2}{p_r d_{rd}^{-\nu} \|\mathbf{G}\|_F^4 \sigma_w^2 + A \sigma_v^2} \quad (32)$$

$$A = p_s d_{sr}^{-\nu} \|\mathbf{h}_i\|_F^2 + \sigma_w^2 \quad (18)$$

با توجه به نرمال‌سازی سیگنال ارسالی هر رله در نهایت به فرم زیر است:

$$t_i(k) = \frac{r_i(k)}{\sqrt{E\{r_i(k)r_i^*(k)\}}} = \frac{r_i(k)}{\sqrt{A \|\mathbf{h}_i\|_F^2}} \quad (19)$$

سیگنال هر آنتن در مقصد با استفاده از ارسال نسبت حداکثر سیگنال رله‌ها به صورت زیر است:

$$d_i(k) = \sqrt{p_r d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{g}_i\|_F^2}{\sqrt{\|\mathbf{g}_i\|_F^2}} t_i(k) + v_i(k)$$

$$= \sqrt{p_r d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{g}_i\|_F^2}{\sqrt{A \|\mathbf{g}_i\|_F^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2}} r_i(k) + v_i(k) \quad (20)$$

$$= \sqrt{p_s p_r d_{sr}^{-\nu} d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{g}_i\|_F^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2}{\sqrt{A \|\mathbf{g}_i\|_F^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2}} s(k)$$

$$+ \sqrt{p_r d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{g}_i\|_F^2 \mathbf{h}_i^\dagger}{\sqrt{A \|\mathbf{g}_i\|_F^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2}} \mathbf{w}_i(k) + v_i(k)$$

که  $\mathbf{g}_i$  شبهه  $\mathbf{h}_i$  و کانال ارتباطی هر رله با مقصد تعریف شده است.  $p_s$  توان سیگنال مبدأ و  $p_r$  توان دریافتی هر آنتن مقصد است. در مقصد، ترکیب نسبت حداکثر برای  $N$  سیگنال رله‌ها سیگنال نهایی را به دست می‌دهد:

$$d_f(k) = \mathbf{g}_f^\dagger \mathbf{d}(k) \quad (21)$$

$\mathbf{d}$  بردار سیگنال دریافتی از رله‌ها توسط  $N$  آنتن مقصد است. در آخرین مرحله سیگنال نهایی مقصد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$d_f(k) = \sqrt{p_s p_r d_{sr}^{-\nu} d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{G}\|_F^4 \|\mathbf{H}\|_F^2}{\sqrt{A \|\mathbf{G}\|_F^2 \|\mathbf{H}\|_F^2}} s(k)$$

$$+ \sqrt{p_r d_{rd}^{-\nu}} \frac{\|\mathbf{G}\|_F^4 \mathbf{h}_i^\dagger}{\sqrt{A \|\mathbf{G}\|_F^2 \|\mathbf{H}\|_F^2}} \mathbf{w}_i(k) + \mathbf{g}_f^\dagger v_i(k) \quad (22)$$

$d_f(k)$  سیگنال نهایی منتج شده از ترکیب نسبت حداکثر است. بنابراین SNR را داریم:

$$SNR = \frac{p_s p_r d_{sr}^{-\nu} d_{rd}^{-\nu} \frac{\|\mathbf{G}\|_F^4 \|\mathbf{H}\|_F^2}{A \|\mathbf{G}\|_F^2 \|\mathbf{H}\|_F^2}}{p_r d_{rd}^{-\nu} \frac{\|\mathbf{G}\|_F^4 \|\mathbf{H}\|_F^2}{A \|\mathbf{G}\|_F^2 \|\mathbf{H}\|_F^2} \sigma_w^2 + \|\mathbf{G}\|_F^2 \sigma_v^2} \quad (23)$$

$$= \frac{p_s p_r d_{sr}^{-\nu} d_{rd}^{-\nu} \|\mathbf{G}\|_F^4 \|\mathbf{H}\|_F^2}{p_r d_{rd}^{-\nu} \|\mathbf{G}\|_F^4 \sigma_w^2 + A \sigma_v^2}$$

### ۳-۲- پروتکل رله تقسیم توانی

به روش مشابه، روابط پروتکل رله تقسیم توانی به مانند پروتکل رله تقسیم زمانی در این بخش ذکر می‌شود. سیگنال دریافتی رله در این حالت به صورت زیر است [۱۷]:

$$r_i(k) = \sqrt{p_s d_{sr}^{-\nu}} \|\mathbf{h}_i\|_F^2 s(k) + \mathbf{h}_i^\dagger \mathbf{w}_i(k) \quad (24)$$

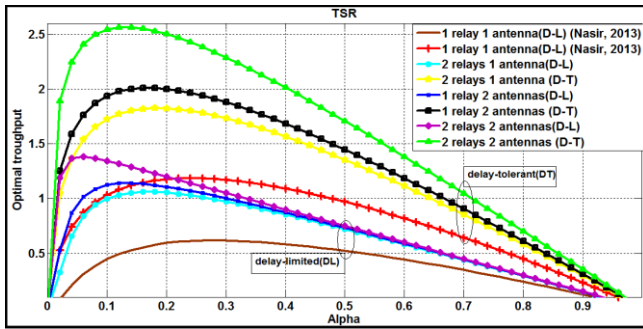
#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

نرخ گذردهی کاهش می‌یابد، چون تعداد بسته داده گم‌شده و ازدست‌رفته زیاد می‌شود.

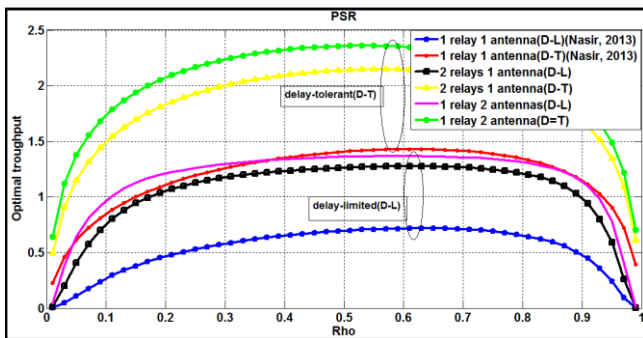
در این بخش نتایج عددی شبیه‌سازی برای تأیید روش پیشنهادی و عملکرد آن در مقایسه با روش‌های دیگر بیان می‌شود. این نتایج بر اساس روش آنالیز مونت-کارلو به‌دست آمده است. پارامترهای روش پیشنهادی در جدول ۱ آورده است.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی.

مقدار	پارامتر
۱	بازدهی اکتساب انرژی ( $\eta$ )
۲/۷	نمای تلفات مسیر
۱	توان ارسالی مبدأ
۰/۰۱	واریانس نویز آنتن ( $\sigma_{n_{r1}}^2$ )
۰/۰۱	واریانس نویز آنتن مقصد ( $\sigma_{n_{r2}}^2$ )



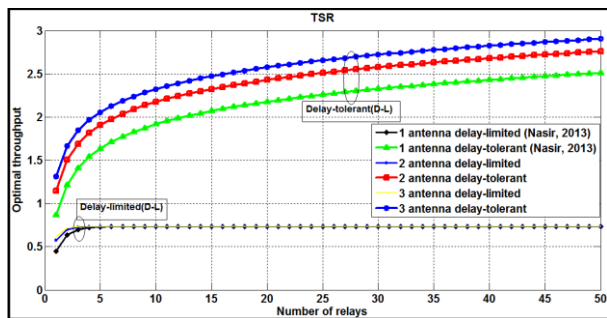
(الف)



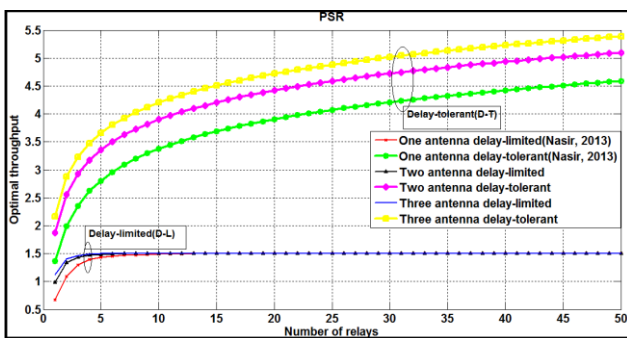
(ب)

شکل ۴: نرخ گذردهی با حالت‌های مختلف تعداد رله و تعداد آنتن (الف) پروتکل رله تقسیم زمانی (ب) پروتکل رله تقسیم توانی.

در شکل ۴-الف نرخ گذردهی پروتکل رله تقسیم زمانی در دو حالت حساس به تأخیر و غیر حساس به تأخیر با حالت‌های مختلف تعداد رله و آنتن نشان داده شده است. این گذردهی بر حسب  $\alpha$  رسم شده و در حالت کلی عملکرد سیستم غیر حساس به تأخیر از حالت حساس به تأخیر بهتر است. در حالت دو رله با تک آنتن، نرخ گذردهی از حالت یک رله با یک آنتن بیشتر است و این مورد اثر مثبت استفاده از چند آنتن را به‌وضوح نشان می‌دهد. روش پیشنهادی در اینجا با دو آنتن و دو رله بهترین عملکرد را نسبت به سایر حالات و مقاله [۱۷] دارد و در واقع روش پیشنهادی با افزایش قابلیت اکتساب انرژی باعث بهبود گذردهی سیستم شده است. قابل توجه است که عملکرد روش پیشنهادی به ازای یک  $\alpha$  خاص بهترین است که می‌توان از آن در طراحی سیستم استفاده کرد. شکل ۴-ب نتایج مشابه شکل ۴-الف را برای پروتکل رله تقسیم توانی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با استفاده از چندین رله مجهز به چند آنتن، عملکرد سیستم در هر دو حالت حساس به تأخیر و غیر حساس به تأخیر بهبود می‌یابد و در واقع با بهره‌گرفتن از چندگانگی ناشی از چند رله و چند آنتن، اکتساب انرژی در روش پیشنهادی پر بارده‌تر می‌شود و قابلیت سیستم افزایش می‌یابد.



(الف)

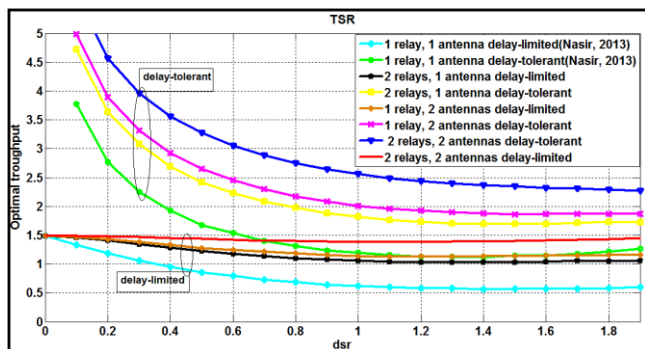


(ب)

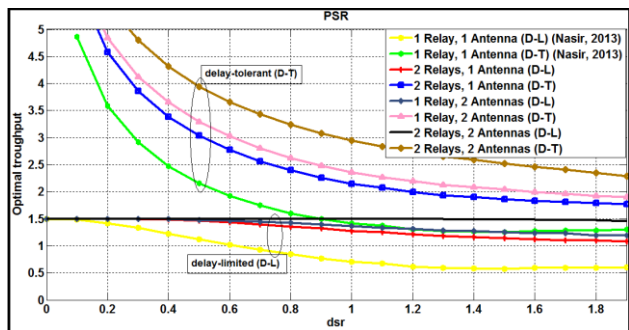
شکل ۵: نرخ گذردهی روش پیشنهادی با تعداد رله مختلف (الف) پروتکل رله تقسیم زمانی (ب) پروتکل رله تقسیم توانی.

عملکرد سیستم مخابراتی بر حسب تعداد رله مختلف و حالت‌های تعداد آنتن متفاوت برای دو پروتکل رله تقسیم زمانی و تقسیم توانی به ترتیب در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده است. با استفاده از روش پیشنهادی و نیز بهره‌گرفتن از ترکیب نسبت حداکثر در گیرنده، نرخ گذردهی به‌طور قابل توجهی بهبود یافته و بیشتر شده است و مخصوصاً روش پیشنهادی از روش [۱۷] نتایج بهتری دارد.

تأثیر سرعت انتقال داده ( $R$ ) بر نرخ گذردهی در روش پیشنهادی و سایر حالات در دو پروتکل رله تقسیم زمانی و توانی به ترتیب در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب نشان داده شده است. نرخ گذردهی با افزایش سرعت انتقال داده افزایش می‌یابد اما این امر تا حد یک آستانه بسته به شرایط سیستم اتفاق می‌افتد و بعد از آن با افزایش سرعت انتقال داده،



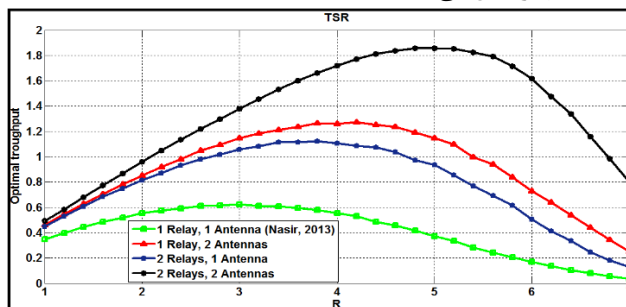
(الف)



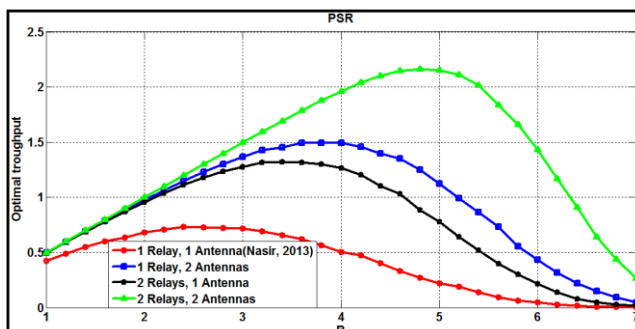
(ب)

شکل ۷: اثر فاصله مبدأ تا رله‌ها بر نرخ گذردهی (الف) پروتکل رله تقسیم زمانی (ب) پروتکل رله تقسیم توانی.

دید می‌شود که روش پیشنهادی در این مورد نیز از سایر روش‌ها و حالات بهتر عمل می‌کند.



(الف)

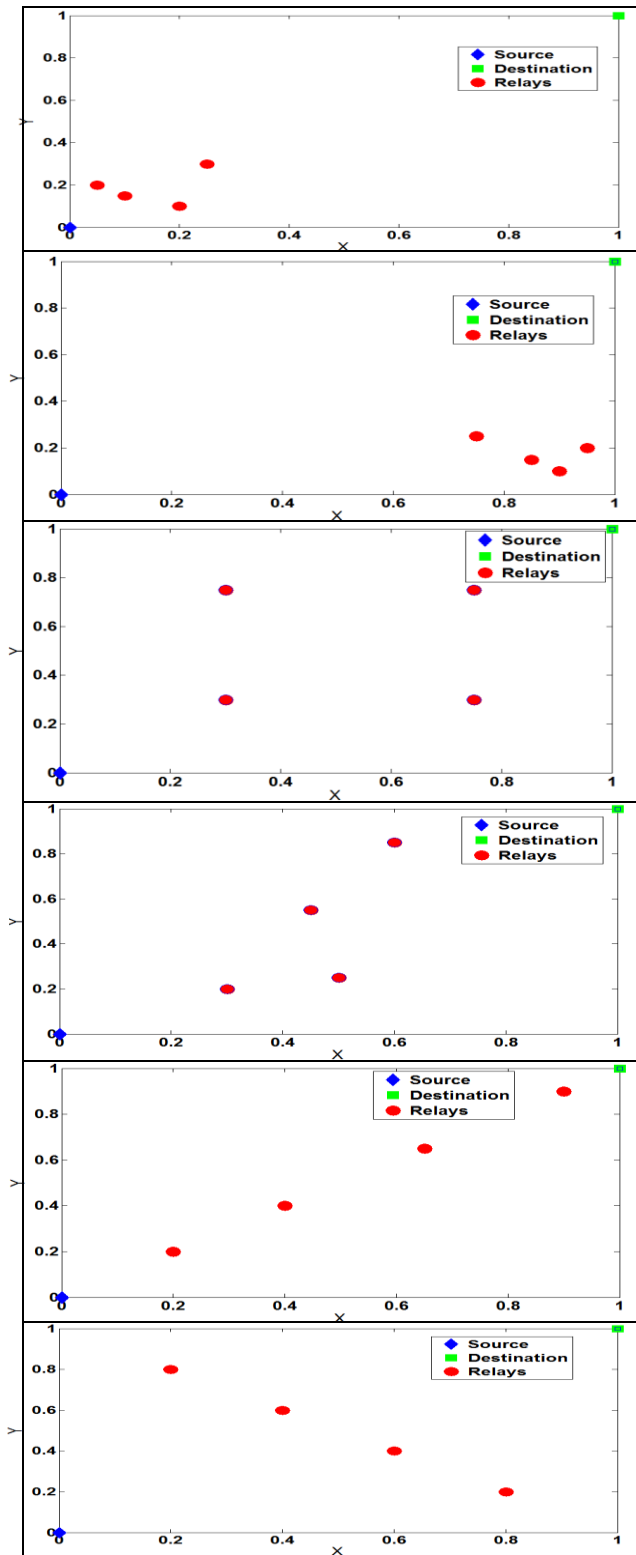


(ب)

شکل ۸: نرخ گذردهی برحسب سرعت انتقال داده (الف) پروتکل رله تقسیم زمانی (ب) پروتکل رله تقسیم توانی.

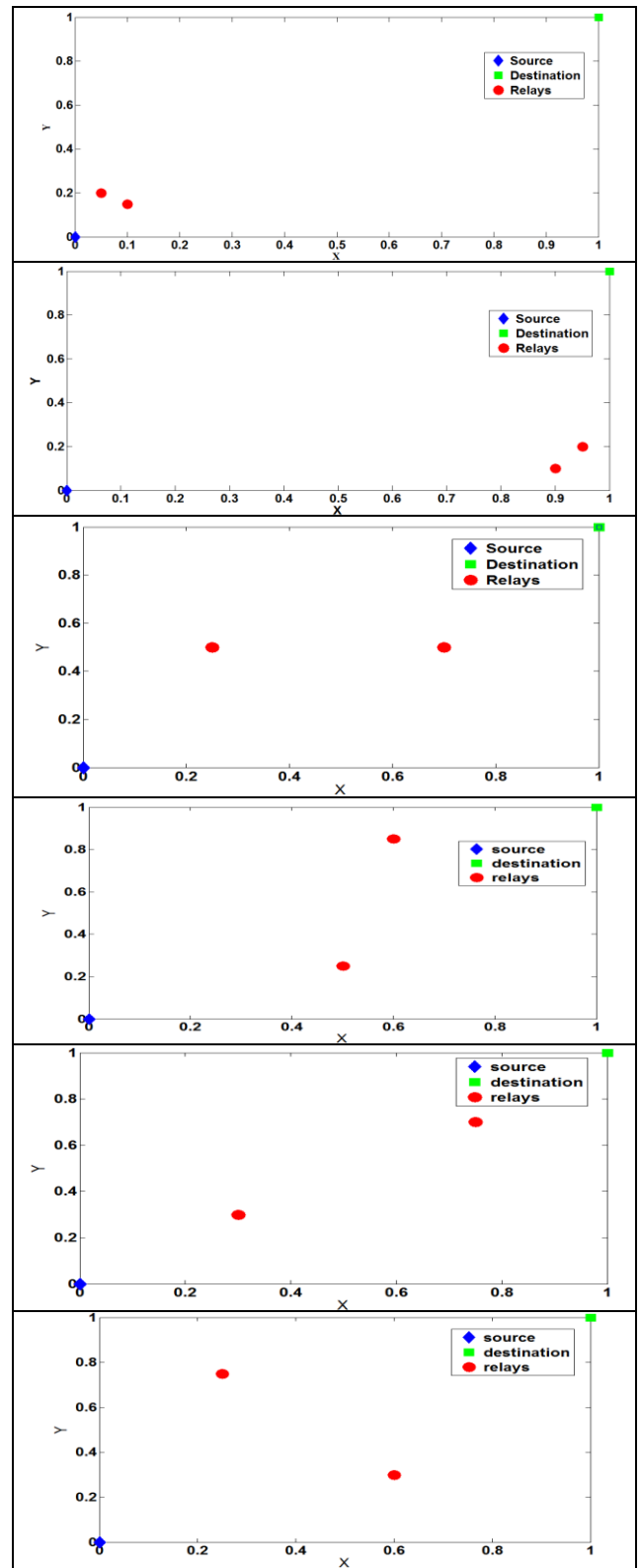
با توجه به اهمیت موقعیت رله در مدل پیشنهادی، حالت‌های مختلف جایگذاری رله‌ها نسبت به مبدأ برای دو رله و چهار رله به ترتیب در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب در نظر گرفته شده است. حالت‌های آزمون به ترتیب نزدیک به مبدأ، نزدیک به مقصد، موقعیت با فواصل مساوی، خطی با شیب مثبت و منفی و یا توزیع تصادفی بین مبدأ و مقصد می‌باشد. نتایج نرخ گذردهی روش پیشنهادی در این موقعیت‌های مختلف رله‌ها در شکل‌های ۹-الف تا ۹-ب برای پروتکل رله تقسیم زمانی و در شکل‌های ۱۰-الف تا ۱۰-ب برای پروتکل تقسیم توانی نشان داده شده است. قابل توجه است که این نتایج برای سیستم غیر ح‌ساس به تأخیر بحث شده است چون در سیستم ح‌ساس به تأخیر همان‌طور که از شکل‌های ۷-الف و ۷-ب پیدا است نرخ گذردهی تغییر چندانی برحسب فاصله مبدأ-رله ندارد. همان‌طور که از نتایج شکل‌های ۹ و ۱۰ برمی‌آید رله‌ها اگر نزدیک به مبدأ باشند بهترین عملکرد را در هر دو پروتکل رله تقسیم زمانی و توانی دارند چون همان‌طور که گفته شد اکتساب انرژی در این حالت بیشینه شده و انرژی بیشتری صرف انتقال مطمئن داده می‌شود.

در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب، نرخ گذردهی نسبت به فاصله مبدأ تا رله‌ها (نشان داده شده با  $d_{SR}$  در شکل‌ها) بیان شده است. در این شکل‌ها دیده می‌شود که عملکرد هر دو پروتکل رله تقسیم زمانی و تقسیم توانی برحسب فاصله مشابه یکدیگر است. به‌وضوح هنگام افزایش فاصله مبدأ تا رله‌ها نرخ گذردهی کم می‌شود چون انرژی اکتسابی توسط رله‌ها با افزایش فاصله مبدأ و رله‌ها و تلفات زیاد سیگنال، کم می‌شود. بنابراین به خاطر کم شدن انرژی اکتسابی، سیگنال گیرنده ضعیف و در نتیجه نرخ گذردهی کمتر می‌شود. در حالت عادی انتقال سیگنال بدون بحث اکتساب انرژی، بهترین حالت برای جایگذاری رله‌ها وسط مسیر بین مبدأ و مقصد است، اما در حالت انجام هم‌زمان انتقال داده و اکتساب انرژی، رله‌ها بهتر است نزدیک به مبدأ انتخاب شوند چون انرژی اکتسابی وابستگی بیشتری به سیگنال مبدأ نسبت به سیگنال مقصد دارد. این نکته را شکل‌های ۷-الف و ۷-ب تأیید می‌کند. در این اشکال فرض شده است که کل فاصله ۲ واحد باشد و بعد از  $d_{SR} = 1/2$  نرخ گذردهی بهینه کم می‌شود و تقریباً ثابت می‌ماند چون رله‌ها به مقصد نزدیک می‌شوند. توجه شود که واریانس نویزها ثابت و برابر  $\sigma_{n_1}^2 = 0.01$  و  $\sigma_{n_2}^2 = 0.01$  در نظر گرفته شده است. روش پیشنهادی در این حالت نیز باعث بهبود قابل توجه نرخ گذردهی می‌شود و عملکرد آن نسبت به حالت تکرار تک‌آنتنه [۱۷] بهتر است.



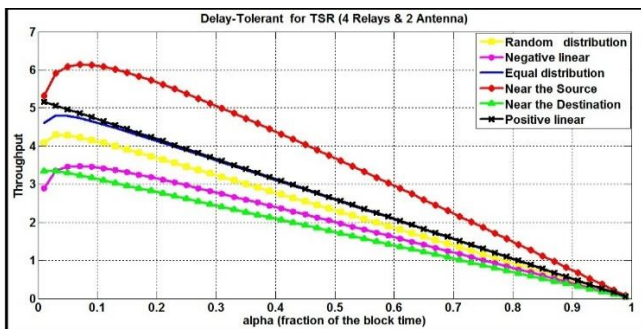
(ب)

شکل ۸: حالت‌های مختلف جایابی رله‌ها (الف) دو رله (ب) چهار رله

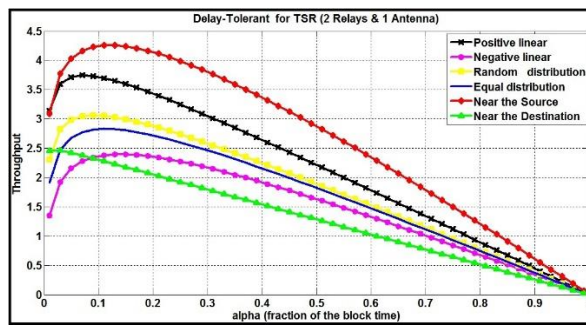


(الف)

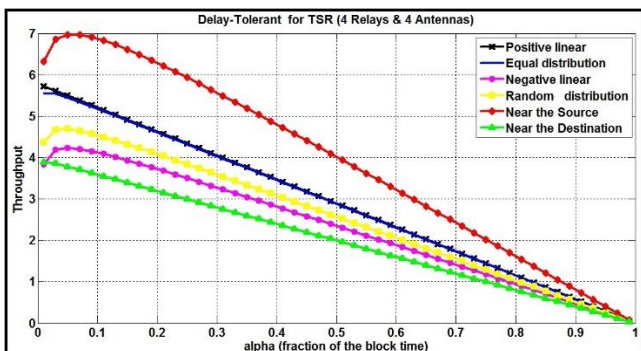




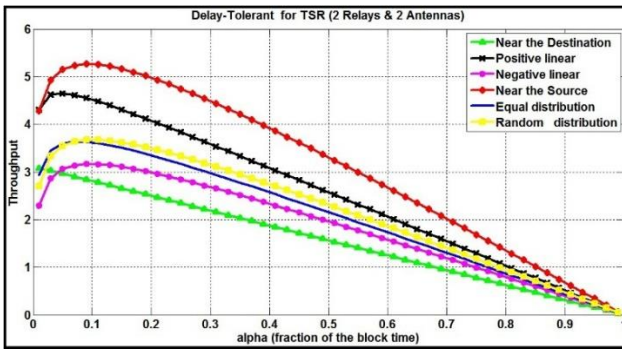
(ه)



(ف)

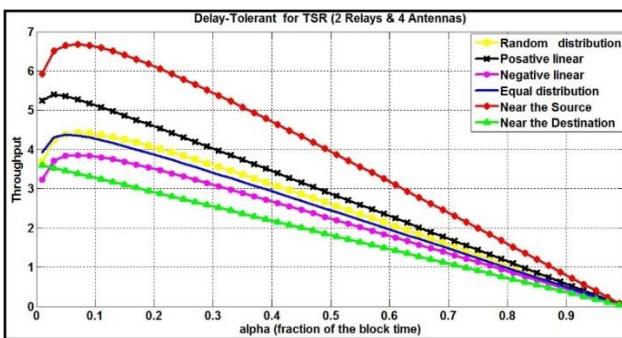


(و)

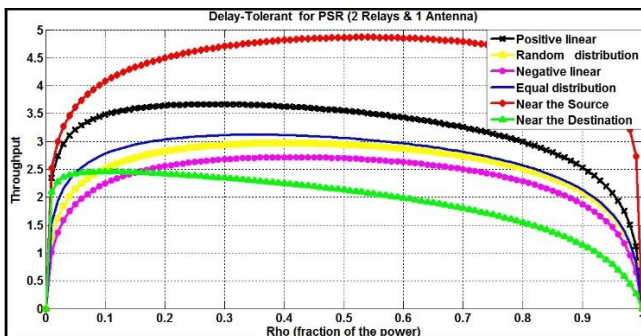


(ب)

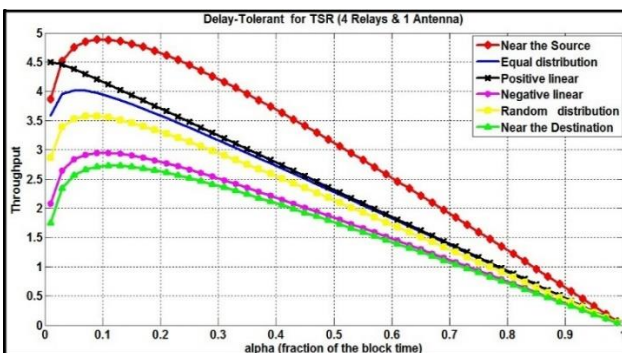
شکل ۹: نرخ گذردهی در حالت‌های مختلف جایابی رله‌ها در پروتکل تقسیم زمانی الف) دو رله یک آنتن ب) دو رله دو آنتن ج) دو رله چهار آنتن د) چهار رله یک آنتن ه) چهار رله دو آنتن و) چهار آنتن.



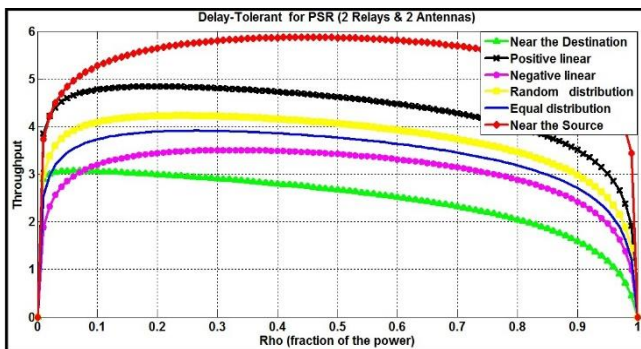
(ج)



(الف)



(د)



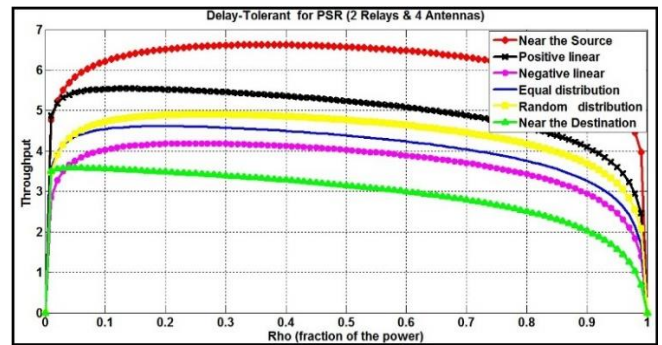
(ب)

## ۵- نتیجه‌گیری

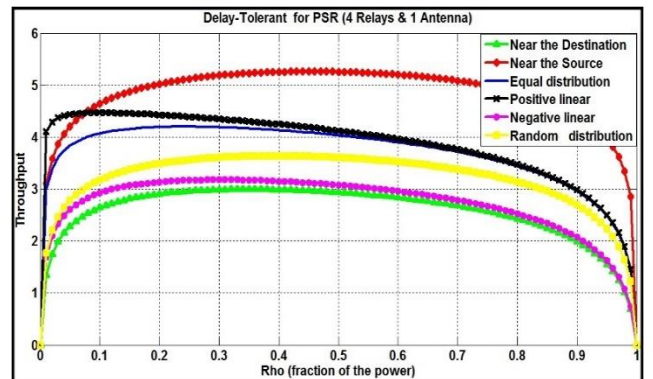
در این مقاله طرح چندرله چندآنتنه برای بهبود اکتساب انرژی و ارسال هم‌زمان داده و در نتیجه بهبود نرخ گذردهی سیستم مخابراتی در هر دو مد حساس یا غیرحساس به تأخیر ارائه شد. این طرح همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد، بر عملکرد سیستم تأثیر مثبتی دارد و زمان و یا توان تخصیصی برای اکتساب انرژی کاهش یافته است. بنابراین بیشتر زمان یا توان موجود برای ارسال داده استفاده می‌شود و از طرفی طول عمر رله‌ها افزایش می‌یابد. هم‌چنین با مقایسه دو پروتکل رله تقسیم زمانی و تقسیم توانی نتایج شد که روش رله تقسیم عملی نیز این نتیجه منطقی است چون در پروتکل تقسیم زمانی تأخیر ارسال داده زیاده‌تر است و روی عملکرد سیستم تأثیر منفی دارد اما در تقسیم توانی، اکتساب انرژی و ارسال داده هم‌زمان صورت می‌گیرد و تأخیر ارسال داده وجود ندارد. بنابراین سرعت انتقال داده و نرخ گذردهی بهبود می‌یابد. هم‌چنین مکان مناسب برای انتخاب رله در چنین سیستم‌هایی بررسی شد که بهترین مکان، موقعیت نزدیک به مبدأ می‌باشد چون اکتساب انرژی به سیگنال مبدأ وابستگی بیشتری نسبت به سیگنال مقصد دارد. هم‌چنین عملکرد مناسب سیستم پیشنهادی به صورت خطی متناسب با تعداد رله‌ها و آنتن‌های آن‌ها بهبود می‌یابد.

## مراجع

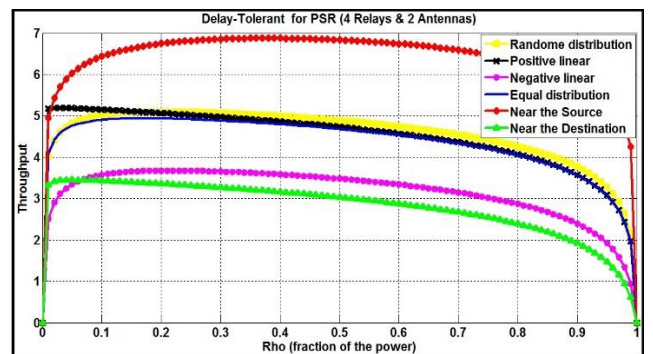
- [1] R. Zhang, and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, 2013.
- [2] C. K. Ho and R. Zhang, "Optimal energy allocation for wireless communications with energy harvesting constraints," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 9, pp. 4808-4818, 2012.
- [3] B. Medepally, and N. B. Mehta, "Voluntary energy harvesting relays and selection in cooperative wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3543-3553, 2010.
- [4] V. Raghunathan, S. Ganeriwal, and M. Srivastava, "Emerging techniques for long lived wireless sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 4, pp. 108-114, 2006.
- [5] E. J. Yoon and C. G. Yu, "Power management circuits for self-powered systems based on micro-scale solar energy harvesting," *International Journal of Electronics*, vol. 103, no. 3, pp. 516-529, 2016.
- [6] R. Aloulou, P. O. L. Peslouan, H. Mnif, F. Alicalapa, L. S. Luk and M. Loulou, "A power management system for energy harvesting and wireless sensor networks application based on a novel charge pump circuit," *International Journal of Electronics*, vol. 103, no. 3, pp. 841-852, 2016.
- [7] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," *IEEE International Symposium on Information Theory*, Toronto, pp. 1612-1616, 2008.
- [8] H. Nishimoto, Y. Kawahara, and T. Asami, "Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks," *IEEE Sensors*, Kona, HI, pp. 1282-1287, 2010.
- [9] Z. Wang, X. Zhang, X. Chen, L. Zhang, and H. Jiang, "An energy-efficient ASIC with real-time work-on-demand for wireless body sensor network," *IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits*, Hong Kong, pp. 1-6, 2008.



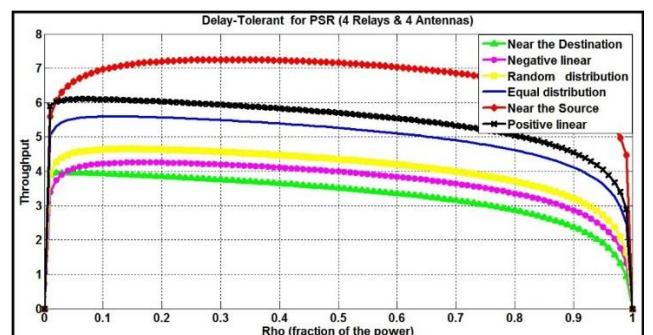
(ج)



(د)



(ه)



(و)

شکل ۱۰: نرخ گذردهی در حالات مختلف جایابی رله با تعداد مختلف رله و آنتن الف) دو رله یک آنتن ب) دو رله دو آنتن ج) دو رله چهار آنتن د) چهار رله یک آنتن ه) چهار رله دو آنتن و) چهار رله چهار آنتن.

- [15] Y. Chen, and Q. Zhao, "On the lifetime of wireless sensor networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 976-978, 2005.
- [16] Z. Xiang, M. Tao, "Robust beamforming for wireless information and power transmission," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 1, no. 4, pp. 372-375, 2012.
- [17] A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, 2013.
- [18] L. Liu, R. Zhang, and K.-C. Chua, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 288-300, 2013.
- [19] A. El Shafie, and T. Khattab, "Throughput of a cooperative energy harvesting secondary user in cognitive radio networks," *Transactions Emerging Telecommunications Technology*, vol. 27, no. 10, pp. 1365-1379, 2016.
- [10] U. Alvarado, A. Juanicorena, I. Adin, B. Sedano, I. Gutierrez, and J. No, "Energy harvesting technologies for low-power electronics," *Transactions Emerging Telecommunications Technology*, vol. 23, no. 8, pp. 728-741, 2012.
- [11] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, 2013.
- [12] A. M. Fouladgar, and O. Simeone, "On the transfer of information and energy in multi-user systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 11, pp. 1733-1736, 2012.
- [13] P. Grover, and A. Sahai, "Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer," *IEEE International Symposium on Information Theory*, Austin, TX, pp. 2363-2367, 2010.
- [14] P. Popovski, A. M. Fouladgar, and O. Simeone, "Interactive joint transfer of energy and information," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no.5, pp. 2086-2097, 2013.

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> Energy Harvesting

<sup>2</sup> Throughput

<sup>3</sup> Outage Probability

<sup>4</sup> Delay-Limited (D-L)

<sup>5</sup> Delay-Tolerant (D-T)

<sup>6</sup> Decode and Forward

<sup>7</sup> Time Switching based Relaying Protocol

<sup>8</sup> Power Switching based Relaying Protocol

<sup>9</sup> Maximum Ratio Combining

<sup>10</sup> Amplify and Forward

<sup>11</sup> Cooperative Communication System