سومین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران
3rd Iranian Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE2011)
دانشگاه آزاد اسلامی گناباد- 22 و 23 تیر ماه 1390

# مدّت زمان گام‌برداری ربات شش‌پا، پنج‌پا و چهارپا با آرایش منتظم

[1]سجاد مرادیان، [2]کریم محمدی، [3]فاطمه پورخدایار
[1] دانشگاه علم و صنعت ایران، sajadmoradian@yahoo.com
[2] دانشگاه علم و صنعت ایران، mohammadi@iust.ac.ir
[2] موسسه مدرسان شریف، asal.pu@gmail.com

## چکیده

در این مقاله الگوریتم نوین تعدیل نقص در ربات شش‌پا با استفاده از افزودن یک مفصل اضافی در پاهای ربات پیشنهاد می‌شود. پس از وقوع نقص، ربات می‌تواند از حالت شش‌پایی به حالت پنج‌پایی و چهارپایی برود. در هر کدام از این حالات دوره‌ی گام‌برداری ربات متفاوت است و به تناسب آن، مراحل گام‌برداری نیز تغییر خواهد کرد. در این مقاله نشان داده می‌شود که با کاهش تعداد پاهای ربات تعداد این مراحل و همچنین مدّت زمان گام‌برداری ربات افزایش می‌یابد.

**واژه های کلیدی :** نقص پذیری، افزونگی سخت افزاری، مدل نقص- تعدیل، چینش منتظم.

## 1- مقدمه

تا کنون مدل‌های متفاوت حرکتی برای ربات‌ها پیشنهاد شده است که از این جمله استفاده از ربات‌های چرخدار و ربات‌های پادار بسیار مرسوم است. ربات‌های پادار دارای مزیّت‌های زیر نسبت به ربات‌های چرخدار هستند:

1) توانایی حرکت بر روی سطوح متفاوت
2) تحرک‌پذیری بیشتر
3) اتصال مکانیکی کمتر بین بار و زمین
4) تخریب کمتر نسبت به زمین

طراحی و ساخت پاهای ربات از نظر مکانیکی چنان است که احتمال وقوع نقص در آنها بسیار کم است امّا به دلیل استفاده از ربات‌ها در محیط‌های ناشناخته دسترسی به ربات برای تعویض قطعه‌ی معیوب پس از وقوع نقص ممکن نیست بدین دلیل بحث نقص‌پذیری در ربات‌های پادار در منابع بسیاری مورد بررسی قرار گرفته شده است.

عیب به عنوان یک نقص در دو حالت زیر تعریف می‌شود:[5]

1) نقص در بخش سینماتیک یک پا
2) نقص ارتباطی بین کنترلر و پا

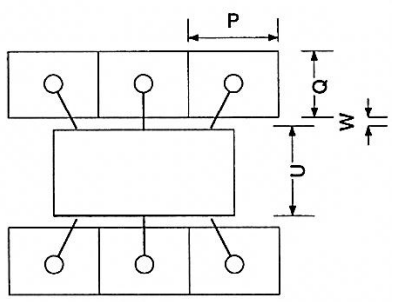
شروط رخداد عیب دو مورد زیر هستند:[10]

1) تنها یک عیب در طول حرکت کامل رخ می‌دهد.
2) عیب در طول حرکت بر طرف نمی‌شود.

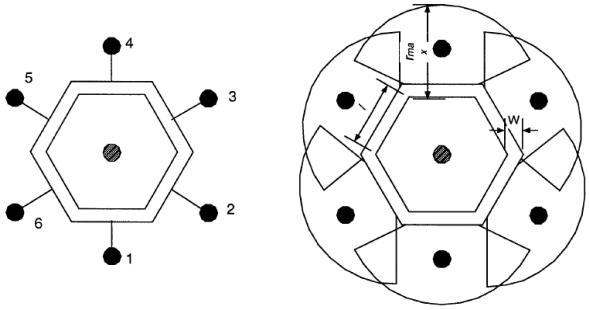
در میان ربات‌های پادار استفاده از ربات‌هایی با تعداد پاهای متفاوت تا به حال دیده شده است." لی" و " هیروس" [2] موضوع از دست دادن یکی از پاهای ربات و بررسی نقص‌پذیری حرکت و ایستایش سه‌پایی را برای ربات چهار پای "تیتان VIII" مطرح می‌کنند. به منظور بررسی الگوریتم پیشنهادی خود از مدل ساده‌ی دینامیکی استفاده کرده‌اند. "آسوکا" و "کیریهارا" [3] مدل هشت‌پایی "کوارتت II" را ارائه کرده‌اند. مدل‌های چهارپایی و شش‌پایی از میان این مدل‌ها بسیار کاربردی‌تر است امّا به دلیل تحمّل نقص بیشتر ربات شش‌پا نسبت به ربات چهارپا مدل شش‌پایی الگوی مناسب‌تری برای بررسی است.

در میان ربات‌های شش‌پا نیز الگوهای متفاوت چینش پاهای ربات مطرح شده است. در گذشته "یانگ" و "کیم" [4 ، 8] از مدل مستطیلی برای ربات شش‌پا(شکل (1)) و "چو" و "پنگ" [9] از مدل شش گوشه‌ای منظم متساوی‌الاضلاع(شکل (2)) به عنوان بدنه‌ی ربات استفاده کردند. با الهام از کار آنان و با توجه به این که نوع انتخاب منظّم چینش پاها مزیّت‌هایی را نسبت به حالت مستطیلی در طرح شش پا قائل می‌شد نوع چینش پای شش گوشه‌ای منظّم را به عنوان مدل مورد بررسی در این مقاله انتخاب نموده‌ایم.

به علّت محدودیّت‌های کنترلر و انرژی، پاهای با دو درجه‌ی آزادی عموماً در زمان قدیم مورد استفاده بودند. در نتیجه ربات پادار می‌تواند به یک سمت و در یک جهت حرکت کند. مثلاً: "جقیس" [10] می‌تواند صرفاً به جلو برود، "آریل"[11] فقط می‌تواند به صورت جانبی حرکت کند. به مرور زمان ربات بهبود یافته است که پا با سه درجه‌ی آزادی، حداقل انتخاب جهت تحقق راه رفتن همه جانبه‌ی ربات است [12، 13]. بدین منظور برای تحلیل ربات شش‌پا از پای با سه درجه آزادی استفاده کرده‌ایم.




**شکل (1): مدل ساده شده‌ی مستطیلی ربات شش‌پا [4]-[8]**




**شکل (2): مدل ساده شده‌ی شش گوشه‌ای منظّم ربات شش‌پا [9]**

"جاکیموسکی" و دوستانش[1] به موضوع وجود نقص در ربات شش-پای "اَسکار" پرداخته‌اند. تفکّر آنها برای بررسی نقص در پای ربات و چینش مجدد پاهای ربات استفاده از الگوریتم‌های دسته‌بندی گروهی و جمعی در میان پاهای ربات است.

هر مکمل گروهی دارای سه قانون است:

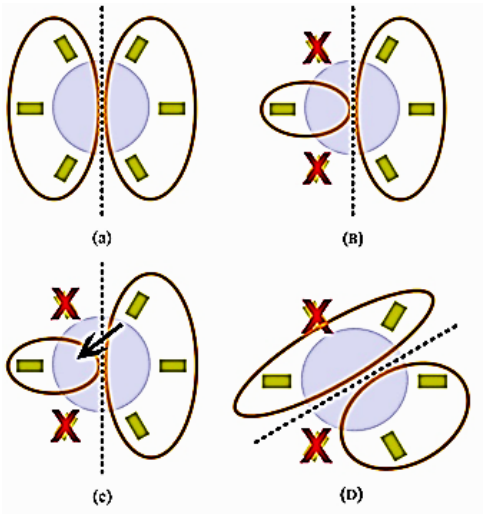
1- **قانون مجزا:** گروه سعی می‌کند از تصادف با دیگر گروه‌های محلی اجتناب کند.

2- **قوانین هشدار:** گروه به سمت نقطه میانگین و حد وسط گروه‌های محلی حرکت می‌کند.

3- **قانون چسبندگی:** گروه به سمت نقطه میانی محلی دیگر گروه-های محلی حرکت می‌کند.

این سه قانون در شکل (3) بیان شده‌اند:

با استفاده از این الگوریتم استفاده شده می‌توان پاهای ربات را در دو دسته‌ی سه تایی مجزا از هم در نظر گرفت که پس از وقوع نقص با استفاده از سه قانون تعریف شده ربات "اَسکار" در چینش جدید تعدیل نقص قرار می‌گیرد. شکل (4) نحوه‌ی دسته‌بندی سه‌پایی و همچنین یکی از حالات وقوع نقص در دو پای ربات را نشان می‌دهد.



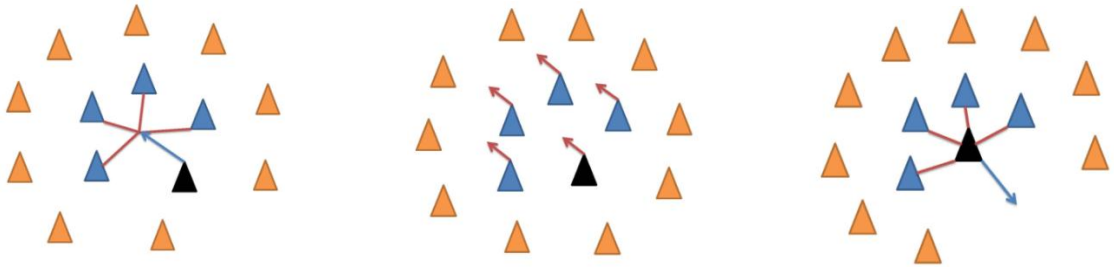

**شکل (4): نحوه‌ی دسته‌بندی پس از خطا [1]**

فرضیه‌های زیر برای سادگی آنالیز در نظر گرفته می‌شوند:[5]

1) ربات دارای یک ساختار متقارن است.
2) تماس بین پا و زمین در یک نقطه است.
3) هیچ‌گونه لغزشی میان پا و زمین وجود ندارد.
4) کل حجم پاها بر روی بدنه‌ی ربات قرار گرفته است و تصوّر می‌شود که مرکز ثقل همان مرکز بدنه‌ی ربات است.
5) محل جای پاهای اولیّه قبل از شروع حرکت مشخص است.
6) سرعت بدنه‌ی ربات در زمان حرکت و متوسط سرعت هر پا در طول مرحله‌ی انتقال ثابت هستند.

بخش‌های این مقاله مانند زیر مرتب می‌شوند:

در بخش 2- مبانی اولیه و تعاریف مربوطه را مطرح می‌کنیم. در بخش



(الف) قانون مجزا (ب) قانون هشدار (ج) قانون چسبندگی

**شکل (3): قوانین مکمل گروهی در تفکرات حرکت دسته جمعی [1]**

3- مراحل گام برداری ربات توضیح داده می‌شود. بخش 4- نتیجه-گیری این مقاله است.

## 2- مبانی اولیه و تعاریف مربوطه

در کارهای پیشین نشان داده شد که از مدل‌ها متقارن چینش شش پایی برای پاهای ربات استفاده می‌شود[9]. بدین منظور می‌توان به دلیل توانایی ربات در تصمیمات آنی برای چرخش و ادامه‌ی حرکت از مدل‌های منظم و متقارن برای حرکت چهار پایی، پنج پایی و شش پایی استفاده نمود(شکل (5)). در این مدل چینش ربات برای چرخش و تغییر جهت خود ربات با باز تعریفی خط تقارن حرکتی خود باعث می‌شود که چرخش به صورت آنی و سریع‌تر انجام شود و ماکزیمم زاویه چرخش ربات در حالت چهار پایی برابر 45 درجه، در حالت پنج پایی برابر 36 درجه و در حالت شش پایی برابر 30 درجه شود. جهت فلش نشان داده شده در شکل (5)، جهت حرکت انتخابی ربات را به منظور چرخش نشان می‌دهد.

در یک ربات شش‌پا با توجه به تعداد پاها می‌توان شاهد 0 تا 6 پای خراب در ربات بود، که پس از رخ دادن نقص در پاهای ربات می‌توان با استفاده از روش خود بازسازی و تغییر در نوع چینش پاهای ربات یا تغییر در الگوریتم حرکتی معایب ناشی از ایجاد نقص را تا حدّ ممکن تعدیل کرد. به تناسب تعداد مفاصل انتخابی برای هر پای ربات نوع الگوریتم چینش پاهای ربات به منظور تعدیل نقص قابل تغییر است.

### 2-1- افزونگی

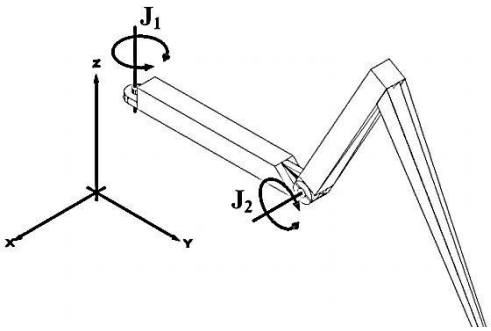
برای تعدیل نقص در پاهای دارای نقصِ ربات بایستی از روش افزونگی استفاده کرد که خود شامل چهار نوع متفاوت است: افزونگی نرم‌افزاری، افزونگی سخت‌افزاری، افزونگی اطلاعات و افزونگی زمان.

در این مقاله موضوع نقص‌پذیری با استفاده از افزونگی سخت افزاری صورت می‌گیرد. بایستی توجه داشت که افزونگی سخت افزاری خود موجب تغییرات نرم افزاری در برنامه‌ی کنترلی خواهد شد.

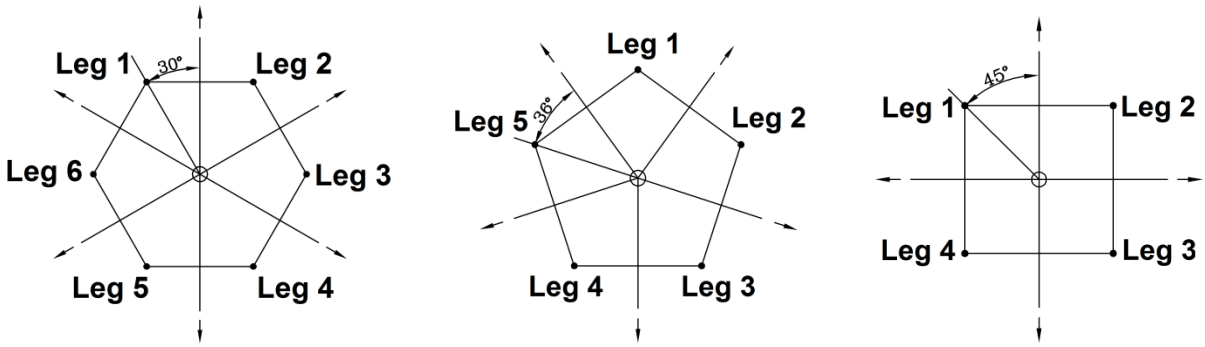
### 2-2- پای ربات با دو و سه مفصل حرکتی

برای اینکه پاهای ربات بتواند در یک محیط سه بعدی xyz هم بتواند به صورت افقی و هم عمودی جابجا شود حداقل تعداد انتخاب مفصل برای پاهای ربات دو مفصل است(شکل (6))، اما با این انتخاب کشیدگی گام ربات محقق نمی‌شود. بدین منظور ربات با پای دارای سه مفصل را به عنوان حداقل تعداد انتخاب مفصل در نظر می‌گیریم. شکل (7) یک نمونه‌ی پای ربات را با سه مفصل نمایش می‌دهد.

با انتخاب سه مفصل برای پای ربات در صورت قفل‌شدگی و یا معیوب شدن مفصل $J_2$ ادامه‌ی حرکت و گام‌برداری ربات بطور کامل مختل می‌شود امّا در صورت قفل‌شدگی مفصل $J_1$ می‌توان با تغییر الگوریتم حرکتی ادامه‌ی حرکت ربات را میّسر کرد.

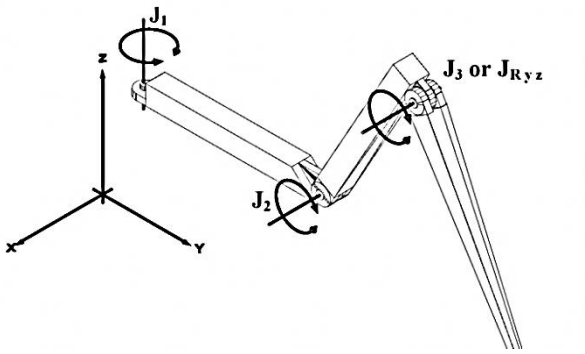



**شکل (6): یک نمونه پای ربات با دو مفصل حرکتی**




(ج) تقارن شش پایی (ب) تقارن پنج پایی (الف) تقارن چهار پایی

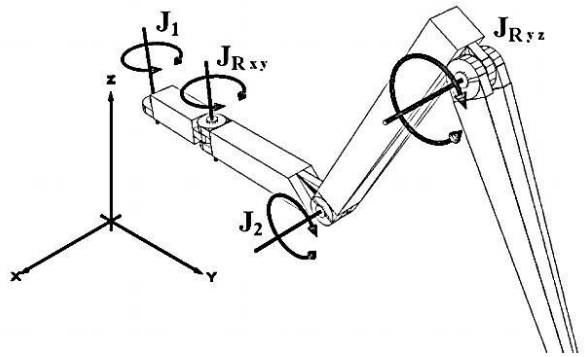
**شکل (5): حالت چینش متقارن چهار پایی، پنج پایی و شش پایی**




**شکل (7): یک نمونه پای ربات با سه مفصل حرکتی**

## 3-2- پای ربات با چهار مفصل حرکتی

در روش افزونگی سخت افزاری، بایستی همانند شکل (8) از یک مفصل اضافی (یک مفصل اضافی ($J_{R\,xy}$) در بعد x-y به منظور تحقق نقص‌پذیری در راستای افقی و مفصل $J_3$ به عنوان مفصل ($J_{R\,yz}$) در بعد y-z به منظور تحقق نقص‌پذیری در راستای عمودی) استفاده کنیم.

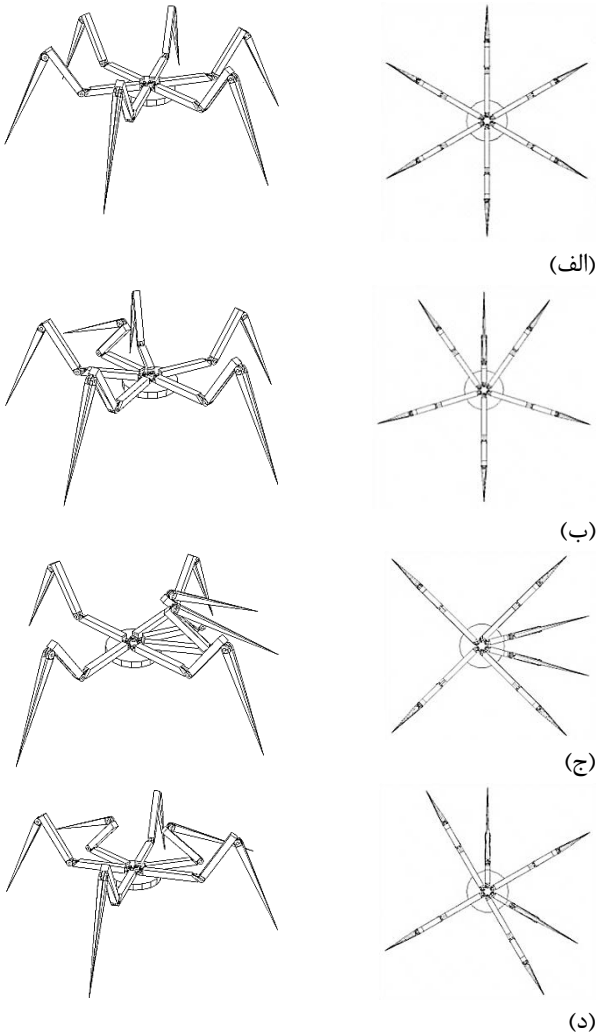



**شکل (8): یک نمونه پای ربات با چهار مفصل حرکتی**

به منظور تعدیل نقص با توجه به حالات متفاوت رخ دادن نقص و تعدیل آن می‌توان شکل (9) را برای پوشش حالات مختلف نقص و چینش جدید پاها در حالت استفاده از سه مفصل و شکل (10) را برای پوشش حالات مختلف نقص و چینش جدید پاها در حالت استفاده از چهار مفصل در نظر گرفت. با توجه به توضیحات مربوط به دو روش تعدیل نقص پیشنهادی، می‌توان شکل (9) را برای پاهای سه مفصله و شکل (10) را برای پاهای چهار مفصله در نظر گرفت.

در اشکال (9) و (10) در حالات مختلف داریم:

- در حالت (الف) ربات شش‌پا در حالت پایه قرار دارد و در هیچکدام از پاهای ربات نقصی رخ نداده است و ربات برای ایستایش خود از حالت شش ضلعی منظّم استفاده می‌کند.
- در حالت (ب) یک پای ربات معیوب شده است و ربات برای ایستایش خود از حالت پنج ضلعی منظم استفاده می‌کند، در این حالت پای معیوب می‌تواند هر کدام از شش پای ربات باشد که به دلیل تقارن تنها یک حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- در حالت (ج) تا (ه) دو پا از شش پای ربات معیوب شده است البته می‌دانیم برای این حالت می توان پانزده حالت در نظر گرفت که به دلیل تقارن دو حالت منطبق بر حالت (ج)، پنج حالت منطبق بر حالت (د) و پنج حالت دیگر نیز منطبق بر حالت (ه) خواهد بود که به دلیل تقارن تنها سه حالت بررسی می شود.
- در حالت (و) تا (ح) نیز سه پا از پاهای ربات معیوب شده است که در این حالت نیز می توان بیست حالت را متصور شد که به دلیل تقارن پنج حالت منطبق بر حالت (و) و یک حالت منطبق بر حالت (ز) و یازده حالت منطبق بر حالت (ح) است که به دلیل تقارن تنها سه حالت بررسی می‌شود.

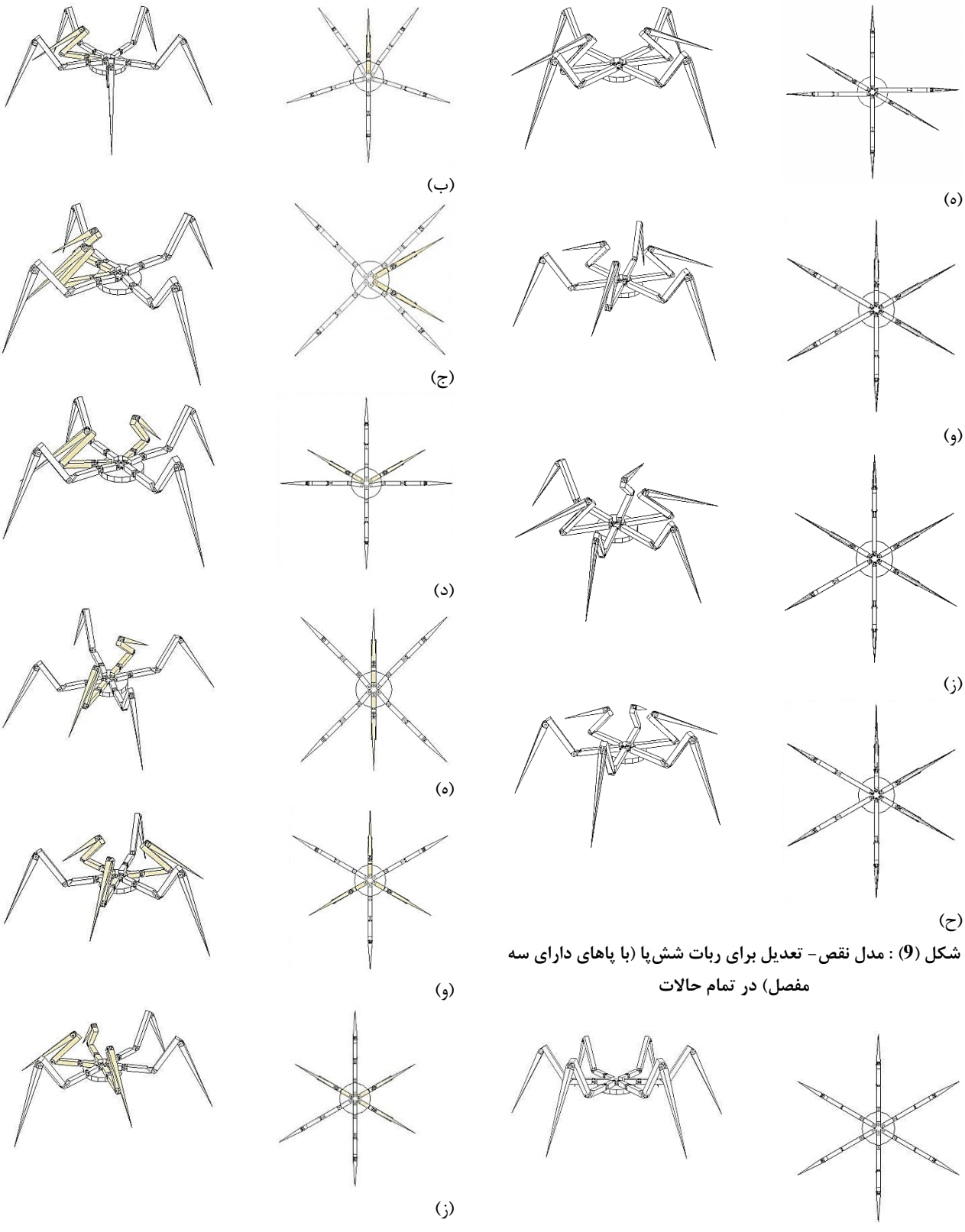


(الف)

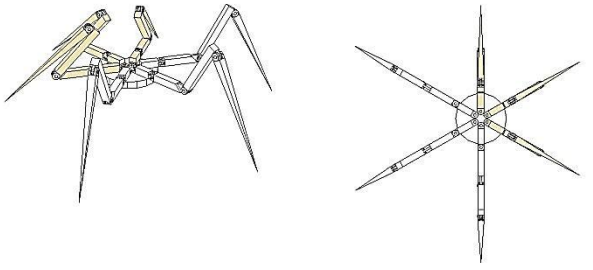
(ب)

(ج)

(د)




**شکل (9) : مدل نقص- تعدیل برای ربات شش‌پا (با پاهای دارای سه مفصل) در تمام حالات**



(ح)

**شکل (10) : مدل نقص- تعدیل برای ربات شش‌پا (با پاهای دارای چهار مفصل) در تمام حالات**

## 3- مراحل گام برداری ربات

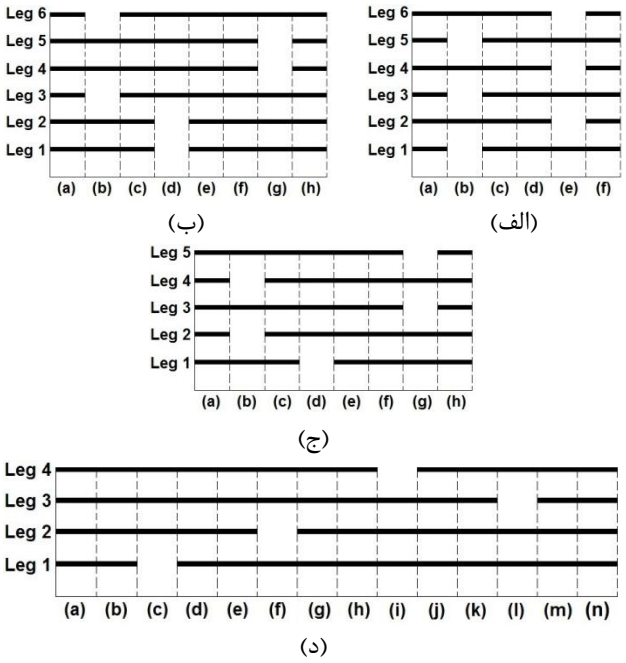
با توجه به اشکال (5)، (9)، (10) دیده می‌شود که ربات پس از معیوب شدن یک پا به آرایش پنج ضلعی منتظم و پس از معیوب شدن دو پا به آرایش چهار ضلعی منتظم می‌رود. در هر کدام از آرایش‌های چینش منتظم شش ضلعی، پنج ضلعی و چهار ضلعی الگوریتم گام برداری ربات متفاوت خواهد بود. شکل (11) مراحل گام برداری ربات را تشریح می‌کند.

در اصل گام برداری یک اصل مهم محدوده‌ی پایداری ربات است. در تمام مراحل گام برداری ربات به این اصل توجه شده است.

در شکل (11- الف) گام برداری ربات در آرایش شش پایی به صورت سه پایی انجام می‌شود. در شکل (11- ب) این گام برداری به صورت دو پایی انجام می‌شود. در شکل (11- ج) گام برداری ربات در آرایش پنج پایی در هشت مرحله نشان داده شده است. شکل (11- د) گام برداری ربات در آرایش چهار پای نشان می‌دهد.

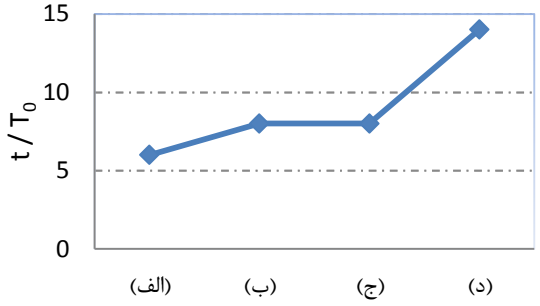
پس از وقوع نقص در یک پای ربات مراحل گام برداری ربات تغییری نمی‌کند اما برخلاف گام برداری دو پایی ربات شش پا که با ایستایش چهار پایی است، گام برداری به صورت ایستایش سه پایی انجام می‌شود. پس از وقوع دو نقص در پاهای ربات شش پا مراحل گام برداری ربات چهار پا از هشت مرحله گام برداری شش پایی و پنج پایی به چهارده مرحله افزایش می‌یابد که این خود افزایش سیکل گام برداری و کند شدن حرکت ربات می‌شود. در ضمن در این حالت نیز ایستایش به فرم سه پایی خواهد بود.

در تمام مراحل گام برداری ربات در حالت شش پایی، پنج پایی و چهار پایی محدوده پایداری مثبت است اما با افزایش تعداد نقص این مقدار کاهش می‌یابد.




**شکل (11): مراحل گام برداری ربات در حالات چینش منتظم شش ضلعی، پنج ضلعی و چهار ضلعی منتظم**

در صورتی که برای هر مرحله از گام برداری ربات در یک سیکل کامل حرکت مدّت زمان $T_0$ را متصوّر شویم، مدّت زمان گام برداری ربات در یک سیکل کامل حرکت برای حالات مختلف شکل (11) مانند شکل (12) خواهد بود.




**شکل (12): مدّت زمان گام برداری ربات در یک سیکل کامل حرکتی نرمالیز شده به مدّت زمان حرکتی برای هر مرحله از گام برداری ربات ($T_0$)**

## 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله تعدیل نقص در اثر معیوب شدن یک یا چند پای ربات با استفاده از الگوریتم‌های افزونگی منطبق بر دو روش توضیح داده می‌شود. با استفاده از هر کدام از روش‌های پیشنهادی چینش جدید پاهای ربات به منظور تعدیل نقص تشریح می‌شود. روش دوم نیز از نظر

نقص‌پذیری، گام‌برداری و تحرک‌پذیری دارای عملکرد مناسب‌تری می-باشد.

در این مقاله نشان داده می‌شود که با افزایش تعداد نقص در پاهای ربات سرعت گام برداری ربات کاهش می‌یابد. در گام برداری پنج پایی این معیار تغییر نمی‌کند اما در گام برداری چهار پایی این مقدار به شدّت تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

## 5- مراجع

[1] B. Jakimovski, B. Meyer, E. Maehle, "Swarm Intelligence for Self-Reconfiguring Walking Robot," 2008 IEEE Swarm Intelligence Symposium St. Louis MO USA, September 21-23, 2008.

[2] Y. J. Lee and Sh. Hirose, "Three-legged Walking for Fault Tolerant Locomotion of Quadruped Robot with Deminig Mission," Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems.

[3] K. Osuka and K. Kirihara, "Motion Analysis and Experiments of Passive Walking Robot QUARTET II", Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation San Francisco April 2000.

[4] J. M. Yang and J. H. Kim, "Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. , vol. 28, pp. 109–116, 1998.

[5] J. M. Yang and J. H. Kim, "A Fault Tolerant Gait for a Hexapod Robot over Uneven Terrain," IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, vol. 30, no. 1, FEBRUARY 2000.

[6] J. M. Yang and J. H. Kim, "Optimal Fault Tolerant Gait Sequence of the Hexapod Robot with Overlapping Reachable Areas and Crab Walking," IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, vol. 29, NO. 2 March 1999.

[7] J. M. Yang and J. H. Kim, "Fault tolerant locomotion of the hexapod robot," in Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man, Cybern., Oct. 1996, pp. 1589–1594.

[8] J. M. Yang and J. H. Kim, "A Strategy of Optimal Fault Tolerant Gait for the Hexapod Robot in Crab Walking," Proc. of the 1998 IEEE International Conf. on Robotics & Automation Leuven, Belgium May 1998.

[9] S. K.-K. Chu and G. K.-H. Pang, "Comparison Between Different Model of Hexapod Robot in Fault-Tolerant Gait," IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, vol. 32, no. 6, November 2002.

[10] R. A. Brooks, "A robot that walks: emergent behaviors from a carefully evolved network," Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, pp. 253-262, 1989.

[11] J. Ayers, S. Kashin, D.-R. Blidberg, and D. Massa, "Biologically-based underwater robots," Unmanned Systems, vol. 12, pp. 30-36, 1994.

[12] D. Voth, "Nature's guide to robot design," IEEE Intelligent Systems, vol. 17, no. 6, pp. 4-7, 2002.

[13] G. Jianhua, "Design and Kinematic Simulation for Six-DOF Leg Mechanism of Hexapod Robot," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics December 17 - 20, 2006, Kunming, China.