

کنترل غیر خطی یک موشک آشیانه یاب با استفاده از شبکه های عصبی چند لایه

علی محرم پور

سازمان صنایع هوا فضا

محمد فرخی

دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده برق

محمد جواد پشنان

دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده برق

چکیده

در این مقاله، روش خطی سازی فیدبکی، بعنوان یکی از روش های کنترل غیرخطی برای بدست آوردن قانون هدایت برای یک موشک آشیانه یاب بکار برده می شود. نشان داده شده است که قانون بدست آمده از نظر پیاده سازی احتیاج به اندازه گیری پارامترهایی دارد که از نظر عملی ممکن است قابل اندازه گیری نباشند. این دیدگاه ما را برای استفاده از روش های دیگر مانند شبکه های عصبی هدایت می کند. شبکه های عصبی چند لایه پرسپترون، با الگوریتم پس انتشار خطا، بعنوان روش موثری در تقریب نگاشت های غیرخطی نامعلوم شناخته شده می باشند. جهت آموزش شبکه عصبی طراحی شده از داده های شبیه سازی شده بوسیله روش خطی سازی فیدبکی استفاده شده، سپس با استفاده از شبیه سازی قابلیت های شبکه آموزش دیده نشان داده شده است. شبکه عصبی طراحی شده از نظر پیاده سازی، احتیاج به پارامترهای کمتری دارد که همه قابل اندازه گیری می باشند.

کلید واژه : کنترل غیر خطی، خطی سازی فیدبکی، موشکهای

آشیانه یاب، هدایت متناسب، شبکه های عصبی چند لایه.

۱- مقدمه

هدایت متناسب (PN) یک روش هدایت شناخته شده ای است که در بسیاری از موارد عملکرد خوبی را نشان می دهد. استنتاج اولیه این هدایت بر این اساس صورت گرفته است که اگر بتوانیم نرخ چرخش خط دید بین موشک و هدف را صفر کنیم، نهایتاً مسأله برخورد موشک به هدف رخ خواهد داد. (البته بعدها نشان داده شد که PN، در حقیقت یک قانون هدایت بهینه است برای حالتی که فرض های ساده کننده ای نظیر: ثابت بودن سرعت موشک، پاسخ سریع موشک، هدف بدون مانور و پرتاب نزدیک به مسیر برخورد، در نظر گرفته شود [۱]).

یکی از روش های کنترل هندسه دیفرانسیل با نام خطی سازی فیدبکی، از یک فیدبک غیرخطی برای از بین بردن هر رفتار غیرخطی در ورودی- خروجی سیستم استفاده می کند. وقتی سیستم حلقه بسته خطی شد، همه ابزارهایی که از تئوری سیستم های خطی وجود دارند را می توان مستقیماً برای کنترل سیستم مورد نظر بکار گرفت. این روش به ما اجازه می دهد که یک کنترل دقیق برای دسته ای از سیستم های غیرخطی طراحی کنیم.

در این مقاله، روش خطی سازی فیدبکی بعنوان یکی از روش های کنترل غیرخطی جهت بدست آوردن قانون هدایت برای یک موشک آشیانه یاب بکار برده شده است. نشان داده شده که قانون بدست آمده از نظر پیاده سازی احتیاج به اندازه گیری پارامترهایی دارد که از نظر عملی ممکن است قابل اندازه گیری نباشند. این دیدگاه ما را برای استفاده از روش های دیگر مانند شبکه های عصبی هدایت می کند.

شبکه های عصبی چند لایه پرسپترون با الگوریتم پس انتشار خطا بعنوان روش موثری در تقریب نگاشت های غیرخطی نامعلوم شناخته شده می باشد [۲]. جهت آموزش شبکه عصبی طراحی شده از داده های شبیه سازی شده بوسیله روش خطی سازی فیدبکی استفاده شده ، سپس با استفاده از شبیه سازی قابلیت های شبکه آموزش دیده نشان داده شده است.

۲- مدل هندسی و سینماتیکی سیستم

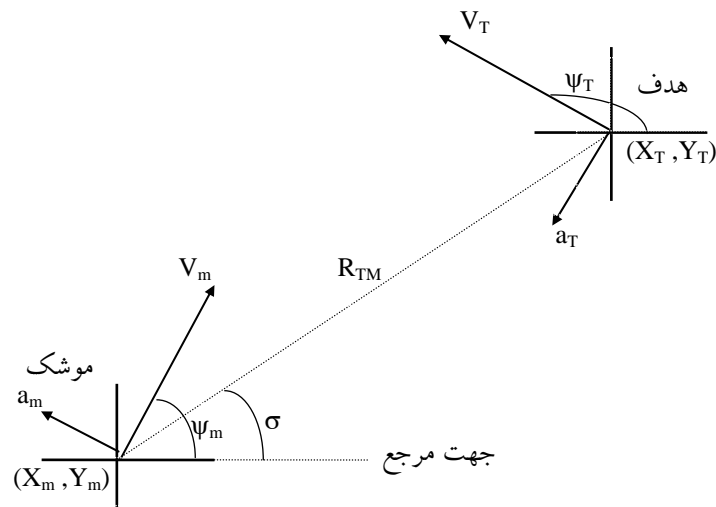
شکل ۱ هندسه برخورد یک موشک با هدف را در صفحه نشان می دهد. در این شکل، (X_m, Y_m) دلالت بر موقعیت لحظه ای موشک و (Ψ_m, V_m) دلالت بر زاویه بردار سرعت موشک و سرعت موشک می کنند که نسبت به یک جهت مرجع ثابت سنجیده می شوند، a_m دلالت بر شتاب موشک دارد که در جهت عمود بر بردار سرعت لحظه ای موشک عمل می کند. بطور مشابه می توان پارامترهای مربوط به هدف را نیز تعریف کرد. متغیرهای دیگری که در شکل دیده می شوند عبارتند از: σ که زاویه خط دید (LOS) با جهت مرجع ثابت است و R_{TM} که فاصله هدف تا موشک است.

روابط سینماتیکی موشک و هدف در صفحه قابل بیان در یک سیستم مختصات کارتزین راستگرد است که مبدأ آن در موقعیت اولیه موشک و محور X آن در جهت مرجع ثابت است که جهت اولیه (LOS) در نظر گرفته می شود. حروف اختصاری m و T به ترتیب بر متغیرهای مربوط به موشک و هدف دلالت می کنند.

از آنجایی که هدف قانون هدایت فرمان دادن به موشک برای برخورد موشک به هدف (یعنی صفر کردن R_{TM}) است، بنابراین طبیعی است که ورودی سیستم را شتاب موشک a_m و خروجی سیستم را فاصله هدف تا موشک R_{TM} در نظر بگیریم که بصورت زیر است:

$$R_{TM} = \sqrt{(x_m(t) - x_T(t))^2 + (y_m(t) - y_T(t))^2} \quad (1)$$

که فاصله اولیه $R_{TM}(t_0) = R_{TM0}$ می باشد.



شکل ۱- هندسه درگیری در صفحه

مسئله ای که در اینجا ما به آن توجه داریم پیدا کردن $\{a_m(t) : 0 < t < t_f\}$ است با t_f زمان نهایی نامشخص بگونه ای که با توجه به شرط $|a_m(t)| < A_{max}$ (A_{max} محدودیت شتاب موشک است)، $R_{TM}(t_f)$ زیر یک سطح مشخص قرار بگیرد. در نظر گرفتن دینامیک اضافی مانند دینامیک اتوپایلوت، بطور وضوح پیچیدگی محاسباتی قانون کنترل را بیشتر می کند که در اینجا در نظر گرفته نشده است. همچنین از محدودیت های دیگری نظیر محدودیت روی زاویه دید جستجوگر که یک عامل محدود کننده برای عملکرد کنترلر می باشد نیز صرف نظر شده است.

۳- استنتاج قانون هدایت با استفاده از خطی سازی فیدبکی [۳]

در اینجا از این روش برای سیستم فوق استفاده می کنیم. سیستم را می توان بعنوان سیستم فضای حالت مرتبه ۸ بفرم زیر در نظر گرفت:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(X, a_T) + g(X) a_m \\ y &= h(X) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن X بردار حالت سیستم می باشد. توصیف فضای حالت مرتبه ۸ سیستم در دستگاه مختصات کارتزین چنین است:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ V_{xm} \\ V_{ym} \\ x_T \\ y_T \\ V_{xT} \\ V_{yT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{xm} \\ V_{ym} \\ 0 \\ 0 \\ V_{xT} \\ V_{yT} \\ -a_T \sin(\psi_T) \\ a_T \cos(\psi_T) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\sin(\psi_m) \\ \cos(\psi_m) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} a_m \quad (3)$$

$$R_{TM} = \sqrt{(x_m(t) - x_T(t))^2 + (y_m(t) - y_T(t))^2} \quad (4)$$

که در آن:

$$\psi_m = \tan^{-1} \frac{V_{ym}}{V_{xm}}, \quad \psi_T = \tan^{-1} \frac{V_{yT}}{V_{xT}} \quad (5)$$

فیدبک خطی شده بصورت زیر محاسبه می شود [۴]:

$$\begin{aligned} a_m &= \frac{1}{L_g L_f h(X)} [v - L_f^2 h(X)] \\ &= \frac{1}{\sin(\psi_m - \sigma)} [v - R_{TM} \dot{\sigma}^2 + a_T \sin(\psi_T - \sigma)] \end{aligned} \quad (6)$$

که v ورودی خارجی به سیستم خطی شده فیدبکی می باشد. توجه کنید که برای این قانون فیدبک خطی سه تابع از متغیرهای حالت لازم است که در دسترس باشند که عبارتند از: $R_{TM} \dot{\sigma}^2$ ، $\sin(\psi_m - \sigma)$ و $a_T \sin(\psi_m - \sigma)$. همینطور از شکل معادله شتاب (۶)، دیده می شود که ورودی همواره کراندار است بجز هنگامی که جهت بردار سرعت

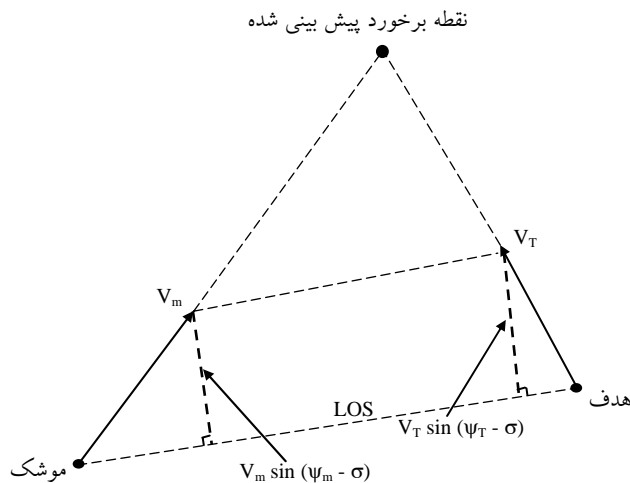
موشک^۱ با زاویه خط دید یکی باشد یعنی $\psi_m = \sigma$ که این مطابق با نقاطی از فضای حالت است که درجه نسبی در آنها تعریف نشده است. در نهایت سیستم ورودی- خروجی فیدبک خطی شده بصورت یک سیستم خطی مرتبه دوم زیر در می آید (V_c سرعت نزدیک شدن موشک به هدف است):

$$\dot{R} = -V_c \quad (7)$$

$$\ddot{R} = \nu \quad (8)$$

۴- ترکیب هدایت خطی سازی فیدبکی با هدایت متناسب

در این قسمت یک قانون هدایت که موشک را به سوی نقطه برخورد پیش بینی شده می راند بدست می آید. این قانون را قانون هدایت خطی شده فیدبکی^۲ (FLGL) می نامیم. ایده کلی برای هدایت به سمت نقطه برخورد پیش بینی شده، فرمان دادن به موشک در جهتی رو به سمت جلو هدف است به گونه ای که نرخ تغییرات زاویه خط دید، $\dot{\sigma}$ مانند قانون PN صفر شود. وقتی این جهت گیری انجام شود، گوییم موشک به سمت نقطه برخورد پیش بینی شده حرکت می کند. (شکل ۲ را ببینید).



شکل ۲- مثلث برخورد

^۱ Missile Heading

^۲ Feedback Linearization Guidance Law

FLGL شتاب فرمان داده شده به موشک را بصورت زیر بیان می کند :

$$a_m = \begin{cases} \frac{1}{\sin(\psi_m - \sigma)} [v - R_{TM} \dot{\sigma}^2 + a_T \sin(\psi_T - \sigma)] & |\Delta\psi_m| > \alpha_0 \\ NV_C \dot{\sigma} & |\Delta\psi_m| \leq \alpha_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$NV_C \dot{\sigma} \quad |\Delta\psi_m| \leq \alpha_0 \quad (10)$$

که ورودی به سیستم خطی شده فیدبکی بصورت زیر است :

$$v = \begin{cases} K_1 (V_C - V_{CD1}) & \sin(\psi_m - \sigma) \sin(\psi_T - \sigma) \geq 0 \\ K_2 (V_C - V_{CD2}) & \sin(\psi_m - \sigma) \sin(\psi_T - \sigma) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\sin(\psi_m - \sigma) \sin(\psi_T - \sigma) < 0 \quad (12)$$

علاوه بر آن :

$$\Delta\psi_m = \psi_m - \psi_{m_{pip}} \quad (13)$$

$$\psi_{m_{pip}} = \sigma + \sin^{-1} \left(\frac{V_T \sin(\psi_T - \sigma)}{V_m} \right) \quad (14)$$

$$V_{CD1} = \sqrt{V_m^2 - (V_T \sin(\psi_T - \sigma))^2} - V_T \cos(\psi_T - \sigma) \quad (15)$$

$$V_{CD2} = V_m - V_T \cos(\psi_T - \sigma) \quad (16)$$

$$V_m = \sqrt{V_{xm}^2 + V_{ym}^2} \quad \text{و} \quad V_m = \sqrt{V_{xT}^2 + V_{yT}^2} \quad (17)$$

بکار بردن این قانون هدایت خطی شده فیدبکی مستلزم دانستن توابعی از متغیرهای حالت دارد مانند:

$a_T \sin(\psi_T - \sigma), V_T \sin(\psi_T - \sigma), V_T \cos(\psi_T - \sigma), \sin(\psi_m - \sigma), V_m, \dot{\sigma}, \sigma, V_C, R_{TM}$ ما

می توانیم خصوصیات زیر را که مربوط به موشک است را اندازه گیری کنیم و یا بدست بیاوریم مانند: V_C, R_{TM} ،

$V_m, \psi_m, \dot{\sigma}, \sigma$. توابع R_{TM} و V_C از جستجوگر (Pulse-Doppler) در دسترس هستند. سرعت موشک و موقعیت آن

(ψ_m, V_m) را می توان از ژایروهای (LOS) یا اندازه گیریهای (INS) مربوط به زوایای آنتن جستجوگر بدست آورد.

ولی اندازه گیری این پارامترها احتیاج به نصب سنسورهای مناسب بر روی موشک دارد که مستلزم هزینه بسیار زیاد

بوده و در برخی مواقع بر روی موشک های با سایز کوچک، از نظر کمبود فضای کافی برای نصب این سنسورها

محدودیت وجود دارد. از طرفی پارامترهای مربوط به هدف (V_T, a_T, ψ_T) را نمی توان مستقیماً اندازه گرفت و احتیاج

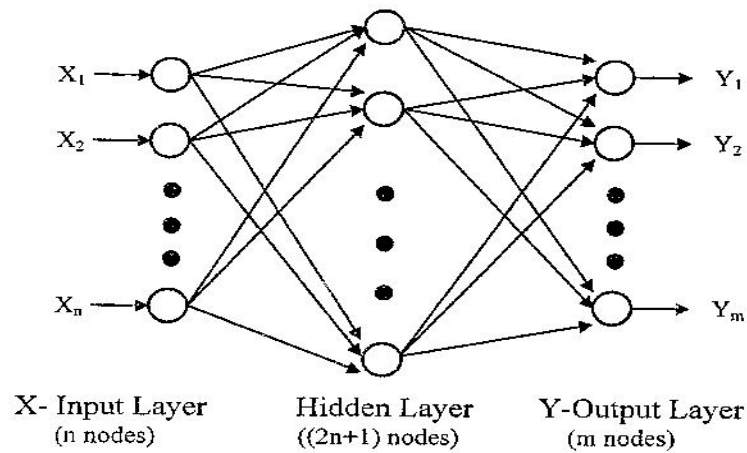
به یک رویت گر مناسب برای تخمین آنها می باشد. بنابر این استفاده از روش های دیگر مانند شبکه های عصبی برای برآورده شدن هدف مورد نظر و رفع محدودیت های فوق الزامی می باشد.

۵- استفاده از شبکه های عصبی

اساساً یک شبکه عصبی نمایشی از یک نگاشت ریاضی از یک بردار ورودی x به بردار خروجی y و بوسیله یک تابع برداری $f(\cdot)$ یعنی $y=f(x)$ می باشد. تئوری کولموگراف (Kolmogorov) که در شبکه های عصبی استفاده می شود بیان می کند که می توان هر تابع برداری پیوسته حقیقی را بوسیله یک شبکه عصبی مصنوعی سه لایه که در لایه اول n نرون (X-Input Layer) و در لایه میانی $2n+1$ نرون (Hidden Layer) و در لایه آخر m نرون (Y-Input Layer) قرار داشته باشند تولید نمود [۵]. شکل ۳ ساختار یک شبکه عصبی متشکل از چندین المان ساده و توابع تحریک غیر خطی را نشان می دهد. یک شبکه عصبی متشکل از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی و یک لایه خروجی می باشد. لایه ورودی به عنوان بافر عمل نموده و معمولاً تابع تحریک آن همانند خروجی خطی است. خروجی لایه های داخلی از رابطه زیر بدست می آید:

$$z_j^2 = F\left(\sum_{i=1}^{N_1} w_{ij}^1 z_i^1 + \theta_j^1\right) \quad \text{for } j=1,2,\dots,N_2 \quad (18)$$

در رابطه فوق $z_j^1(N_1 \times 1)$ ورودی به شبکه هستند و $z_j^2(N_2 \times 1)$ خروجی های لایه مخفی خواهند بود و $w_{ij}^1(N_1 \times N_2)$ وزن های اتصالات بین گره های ورودی و لایه مخفی و $\theta_j^1(N_2 \times 1)$ بایاس داخلی لایه مخفی می باشند. تابع F یک تابع غیرخطی پیوسته یکنواخت است. این تابع طوری انتخاب می شود که محدود، مشتق پذیر و غیر نزولی باشد. توابع مختلفی در این رابطه قابل استفاده می باشند، یکی از این توابع تابع تانژانت هیپربولیک می باشد. یکی از مزایای این تابع آن است که پیوسته و مشتق پذیر بوده و همچنین بکارگیری سخت افزاری آن نیز امکان پذیر است. انتخاب این توابع تحریک در کاربردهای مختلف متغیر می باشد.



شکل ۳- نمایش یک شبکه عصبی پیشخور

فرمول ریاضی که برای بدست آوردن این وزن ها استفاده می شود بنام الگوریتم یادگیری نامیده می شود. قانون یادگیری معروف در این رابطه همان قانون یادگیری پس انتشار خطا^۱ است. در این قانون که تحت قوانین یادگیری با معلم^۲ قرار می گیرد، خروجی های مطلوب از قبل مشخص می باشند، اگر تفاوت خروجی مطلوب با خروجی بدست آمده از شبکه را خطا بنامیم، آنگاه برای بدست آوردن ننگاشت صحیح در طی فرایند یادگیری، وزن های اتصالات طوری انتخاب می شوند که متوسط مجذور خطای خروجی برای تمامی ورودی ها حداقل گردد. در این صورت یادگیری شبکه کامل شده است. هدف اصلی الگوریتم پس انتشار آن است که یک ابر سطح خطا تعریف شده و نقطه کمینه آن بدست آید. این کار با گام برداشتن در جهت سرازیری در روی ابر سطح خطا و با استفاده از قاعده شیب نزولی^۳ انجام می پذیرد و در نهایت وزن های اتصالات بین گره ها بدست خواهند آمد.

^۱ Back Propagation Algorithm

^۲ Supervised Training

^۳ Gradient Descent Rule



۶- آموزش شبکه عصبی

جهت آموزش شبکه عصبی از ۱۰ سناریوی متفاوت استفاده شده است این سناریوها فقط در زاویه اولیه Ψ_{m0} با هم فرق می کنند. در این سناریو ها $\Psi_{m0} = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ بوده و پارامترهای زیر در همه مشترک می باشد:

$$V_m = 1000 \text{ m/s}, V_T = 250 \text{ m/s}, \sigma_0 = 0 \text{ deg}, \psi_t - \sigma_0 = -20 \text{ deg}, R_{TM} = 1500 \text{ m}$$

لازم به توضیح است که انتخاب این سناریو ها اختیاری بوده و هر سناریو دیگری را می توان جهت آموزش استفاده نمود. البته بایستی سناریوی انتخاب شده تا حد امکان جامعیت داشته باشد تا شبکه بتواند در خارج از محدوده یادگیری هم خوب عمل کند. همچنین می توان جهت آموزش شبکه از تعداد سناریوی بیشتر استفاده نمود و بدیهی است که هر چه تعداد اضافه شود، یادگیری هم بهتر خواهد بود.

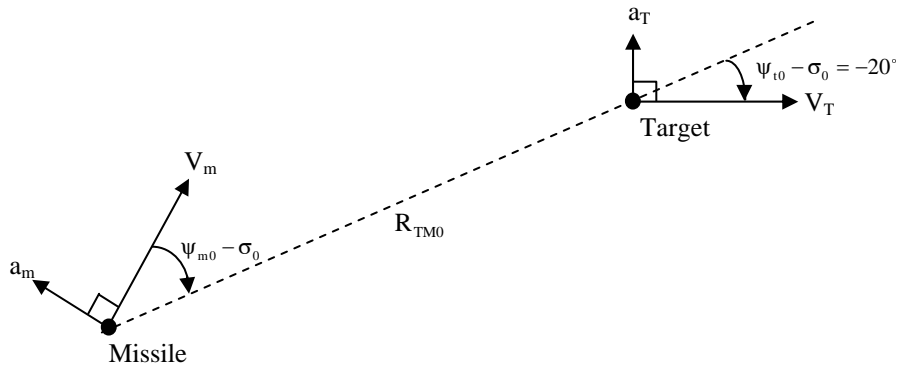
ورودی های شبکه سعی شده، بگونه ای انتخاب شوند که اندازه گیری آن ها در موشک امکان پذیر باشد. شبکه عصبی استفاده شده دارای ساختار ۱-۱۰-۲ می باشد. متغیرهای ورودی شبکه Ψ_m و $\dot{\sigma}$ می باشند. تابع تحریک تانژانت هیپربولیک برای لایه مخفی انتخاب شده است. برای لایه ورودی و خروجی تابع تحریک خطی فرض شده است. خروجی شبکه a_m (دستور شتاب) در نظر گرفته شده است.

از سناریوهای فوق تعداد ۲۷۳ بردار جهت آموزش شبکه انتخاب شد (خطای یادگیری در انتهای آموزش $RMS=0.001$ بدست آمد). بدیهی است که با افزایش تعداد سناریوها و یا بردارهای آموزشی نتایج بهتری بدست خواهد آمد.

۷- شبیه سازی

در این قسمت عملکرد FLGL و NNGL را با PN مقایسه می کنیم. شبیه سازی های انجام شده با نرم افزار Matlab بدست آمده است. فرض می کنیم که هدف مانوری ندارد و با سرعت 250 m/s و با جهت گیری $\psi_t - \sigma_0 = -20 \text{ deg}$ در حرکت می باشد. محور مرجع را در جهت اولیه خط دید در نظر می گیریم، یعنی $\sigma_0 = 0 \text{ deg}$. موشک با فاصله اولیه R_{TM0} و با سرعت 1000 m/s و با جهت گیری $\Psi_m - \sigma_0$ پرتاب می شود.

پارامترهای مربوط به قانون FLGL را بصورت: $K_1 = K_2 = 3$ انتخاب می کنیم. ثابت موثر هدایت $N = 3$ در نظر گرفته می شود. سویچ کردن از قانون کنترل FLGL به قانون PN در زاویه $\alpha_0 = 20^\circ$ انجام می گیرد. هندسه اولیه در گیری موشک و هدف را در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴- هندسه در گیری

شکل های ۵ و ۶ به ترتیب فاصله از دست دهی را نسبت به فاصله اولیه موشک و هدف R_{TM0} برای FLGL و NNGL نشان می دهند. نتایج فقط برای $0 < \psi_m - \sigma_0$ نشان داده شده است برای $\psi_m - \sigma_0 < 0$ نتایج مشابه می باشند. وقتی فاصله اولیه R_{TM0} کوچکتر از ۱۵۰۰ متر باشد و جهت گیری اولیه موشک $|\psi_m - \sigma_0| \leq 50^\circ$ باشد، عملکرد PN، FLGL و NNGL تقریباً شبیه هم هستند. برای PN وقتی جهت گیری اولیه موشک در فاصله $50^\circ \leq |\psi_m - \sigma_0| \leq 70^\circ$ باشد و R_{TM0} کوچکتر از ۱۵۰۰ متر باشد، فاصله از دست دهی تقریباً برابر R_{TM0} است، در صورتی که برای FLGL و NNGL فاصله از دست دهی بسیار کم می باشد. وقتی $|\psi_m - \sigma_0| > 70^\circ$ باشد، عملکرد توسط محدودیت اشباع شتاب محدود می شود، فاصله از دست دهی برای PN تقریباً برابر R_{TM0} می باشد ولی برای FLGL و NNGL نسبتاً کمتر است و برای زاویه های بزرگ، عملکرد هر سه تقریباً شبیه هم می باشد و هر سه توانایی تعقیب هدف را از دست می دهند. در واقع به علت محدودیت شتاب هیچ قانون هدایتی نمی تواند عملکرد بهتری برای این ناحیه داشته باشد.

شکل های ۷ و ۸ شتاب موشک و زاویه $\psi_L = \psi_m - \sigma$ (Look Angle) را نسبت به زمان نشان می دهند. در این حالت فاصله از دست دهی برای PN بسیار زیاد است در صورتی که برای FLGL و NNGL این فاصله بسیار کم می باشد. در واقع با توجه به شکل ۷ در مراحل اول پرواز FLGL دستور شتاب بزرگتری را نسبت به PN و NNGL



صادر می کند. همان گونه که از شکل مشخص می باشد، NNGL بدون به اشباع رفتن شتاب، دستور خود را صادر می کند و این مزیت بزرگی می باشد.

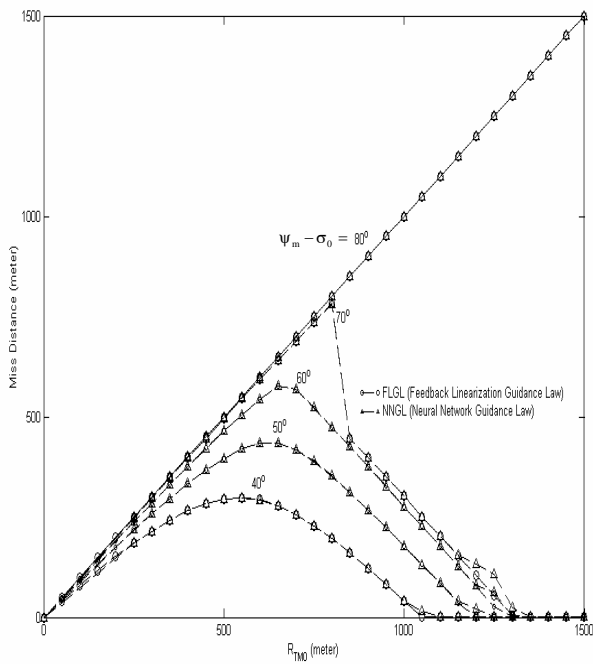
۸- نتیجه گیری

یکی از روش های کنترل غیر خطی ، خطی سازی فیدبکی برای هدایت یک موشک آشیانه یاب بکار گرفته شد و به این نتیجه رسیدیم که قانون هدایت بدست آمده برای حالتی که جهت بردار سرعت دور از زاویه برخورد است، از قانون بدست آمده از کنترل بهینه (PN) بهتر عمل می کند. پیاده سازی قانون بدست آمده با توجه به محدودیت نصب سنسورهای لازم بر روی موشک امکان پذیر نمی باشد. با استفاده از یک شبکه عصبی مناسب با ورودی های قابل اندازه گیری بوسیله موشک، می توان قانون بدست آمده از کنترل غیر خطی را بطور مناسبی تقریب زد.

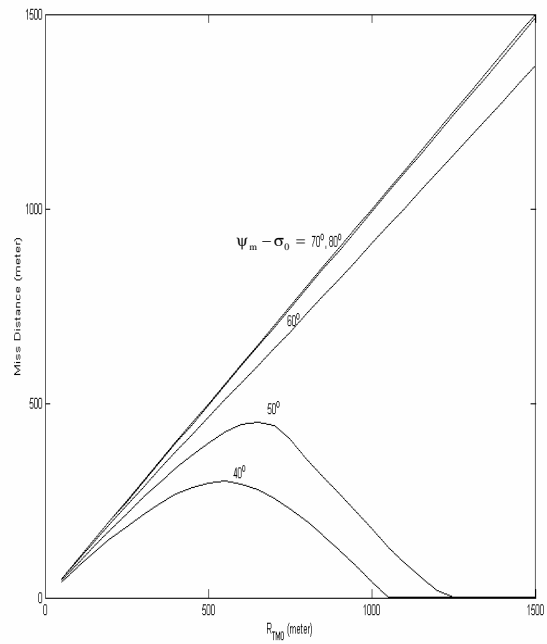
شبهه سازیها مقایسه بین قوانین بدست آمده از کنترل غیرخطی و شبکه های عصبی با قانون هدایت متناسب با ثابت ناوبری موثر ثابت را نشان می دهند. (FLGL) و (NNGL) برای وقتی که نشانه روی اولیه بزرگ باشد، معمولاً "بهتر از (PN) عمل می کنند. همچنین (NNGL) با اعمال شتاب های مناسب نسبت به (FLGL) کمتر در حالت اشباع قرار می گیرد.

مراجع

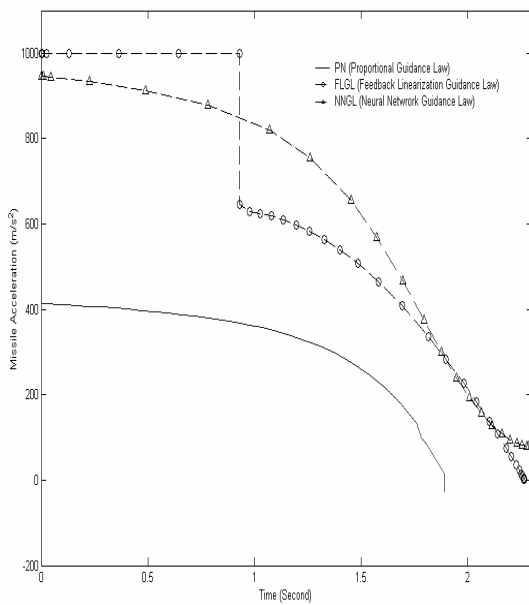
- [1] Kreindler, E., *Optimality of Proportional Navigation*, AIAA Journal, vol. 11, No. 6, 1973, pp. 878-880.
- [2] Hornik, K.M., Stinchcombe and H. White, *Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators*, Neural Networks, Vol. 2, No. 5, 1989, pp. 359-366.
- [3] Bezick, S; Rusnak,I; Gray,E.S., *Guidance of a Homing Missile via Nonlinear Geometric Control Methods*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol 18, No.3, May-June, 1995, pp. 441-448.
- [4] Slotine, J.-J. E, and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [5] Haykin, S., *Neural Networks*, Mcmillan College Publishing Company, 1994.



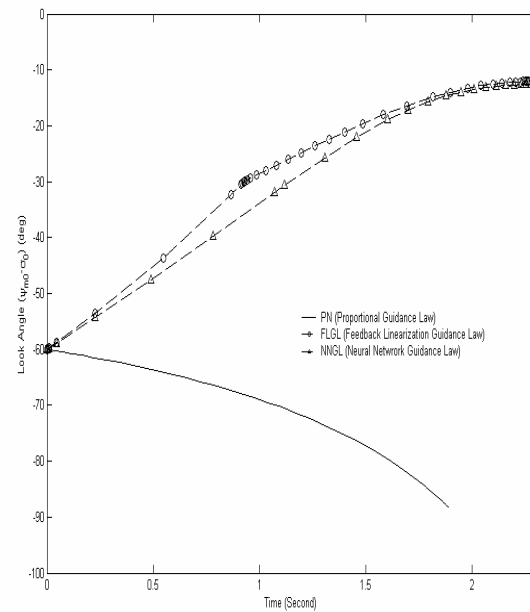
شکل ۵- فاصله از دست دهی نسبت به فاصله اولیه برای NNGL و FLGL



شکل ۶- فاصله از دست دهی نسبت به فاصله اولیه برای PN



شکل ۷- شتاب دستور داده شده به موشک نسبت به زمان $\psi_m - \sigma_0 = -60 \text{ deg}$, $R_{TM0} = 1500 \text{ m}$



شکل ۸- زاویه $\psi_L = \psi_m - \sigma$ نسبت به زمان $\psi_m - \sigma_0 = -60 \text{ deg}$, $R_{TM0} = 1500 \text{ m}$