

النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية لطرائق التحكم بوضعية الأجسام الموجهة المستخدمة في منظومات التوجيه الذاتي باستخدام البيئة البرمجية MATLAB

* الدكتور هيثم محمود خالد
** عبد المعين أحمد الرفاعي**

(قبل للنشر في 2005/3/15)

□ الملخص □

تعالج هذه المقالة النمذجة الرياضية والمحاكاة البرمجية لطرائق التحكم بوضعية جسم طائر المستخدمة في منظومات التحكم الذاتي، التي تصادف في تطبيقات عديدة، نظراً لإمكانية استخدامها في منظومات التحكم بوضعية مختلف أنواع الأجسام الطائرة (توابع صناعية، صواريخ، مقذوفات، روبوتات صناعية.....الخ).
تقدم الدراسة النماذج الرياضية ونتائج المحاكاة الحاسوبية لقوانين التوجيه الذاتي، وتظهر تأثير مختلف محددات (بارامترات) حركة الهدف، والجسم الطائر وقانون التوجيه على المسارات الكينماتيكية Kinematic Trajectory للأجسام الطائرة.
اعتمدت في العمل البيئة البرمجية MATLAB، التي تمتلك أدوات رياضية وإمكانات بيانية تفاعلية متطورة.

* مدرس في كلية الهندسة الإلكترونية - أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية - حلب
** طالب دراسات - كلية الهندسة الإلكترونية - أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية - حلب

Mathematical Modeling & Computer-Aided Simulation for Control Methods of Guided Objects Used in Commands Guidance Systems with MATLAB Environment

Dr. Haytham M. Khaled *
Abd Almoeen A. Alrifai**

(Accepted 15/3/2005)

□ ABSTRACT □

This paper concerns on mathematical modeling and computer-aided simulation for homing guidance methods, which using for control of most objects (satellites, missiles, projectiles, industrial robots.....etc) .

In this study mathematical models and results of computer-aided simulation for homing guidance law are proposed, and kinematic trajectories of object for different motion parameters of target and guided object and guidance law variables are illustrated.

Results of the study is applicable for investigation of guided objects which move in two dimensions.

In this study the MATLAB programming environment is used, which has power mathematical tools and advanced interactive graphical capabilities.

*Ph.D, C. Eng., Al-Assad Academy For Military Engineering _ Aleppo.

**Graduate Student , Al-Assad Academy For Military Engineering _ Aleppo .

مقدمة:

تشكل عملية التحكم بوضعية جسم طائر وإيصاله وفق مسار محدد إلى منطقة التلاقي مع الهدف جوهر التوجيه عن بعد. ويعتبر توجيه الأجسام الطائرة مسألة متعددة الحلول بمعنى أن هناك مسارات مختلفة وعديدة تؤمن تحقيق الغاية المطلوبة، وهي الوصول إلى الهدف. ولكن هذه المسارات متباينة فيما بينها من حيث درجة الانحناء، وزمن عملية التوجيه، وصعوبة التنفيذ الهندسي [1,2,7] وما يترتب على ذلك من متطلبات عديدة تفرض على منظومة التوجيه والجسم الطائر، سواء من حيث درجة تعقيد الأجهزة، أو القدرة على المناورة أو المتانة الميكانيكية... الخ. لذلك فإن دراسة المسارات عموماً، واختيار المسار الأمثل الذي يحقق كافة المتطلبات المفروضة يعتبر مسألة علمية هامة من الناحيتين النظرية والعملية. توصف مسارات الأجسام الطائرة رياضياً بنموذج يسمى المعادلة الحركية (الكينماتيكية) Kinematic Equation لطريقة التوجيه. وإن الطرق المتبعة حالياً في تقويم مسارات الأجسام الطائرة تقوم على تحليل التسارعات الناظرية المطلوبة من هذه الأجسام. إن تحليل طرائق التوجيه اعتماداً على النماذج الرياضية فقط يتسم بالتعقيد وعدم الوضوح في تبيان تأثير مختلف محددات (بارامترات) حركة الجسم الطائر والهدف وبارامترات قانون التوجيه على المسار. لذلك يتخذ البحث عن أدوات تصميم وتقويم جديدة باستخدام الحاسوب Computer-Aided Design & Evaluation Tools أهمية متزايدة. تلعب النمذجة والمحاكاة دوراً هاماً في تقويم وتصميم منظومات التحكم بوضعية الأجسام الطائرة، وفي تطوير أساليب استخدامها. ويعود السبب في ذلك بالطبع إلى المرونة العالية وإمكانية توفير التكاليف الكبيرة التي تحتاجها عادةً التجارب الحقيقية اللازمة للحصول على المعلومات المطلوبة عن المنظومة المدروسة.

أهمية البحث وأهدافه:

تتجلى أهمية البحث في المزايا العديدة التي تقدمها المحاكاة الحاسوبية لمنظومات التوجيه عموماً، ولمسارات الأجسام الطائرة المختلفة بشكل خاص، باعتبارها تتيح إمكانية دراسة وتحليل وتطوير طرائق التوجيه بمرونة عالية، وبسرعة كبيرة، وبأقل قدر ممكن من التكاليف. سيما وأن تطبيقات مثل هذه المحاكاة تلاقى انتشاراً متزايداً سواء في مجالات البحث والتصميم، أو في المخابرات الافتراضية Virtual Laboratories في مؤسسات التعليم العالي الهندسي لصالح العملية التدريسية والتدريبية.

بناءً على ما تقدم فإن الهدف من هذا البحث هو إعداد النماذج الرياضية والبرامج الحاسوبية للحصول على أدوات التأمين الرياضي والبرمجي، اللازمة لعملية محاكاة طرائق التحكم بوضعية جسم طائر المستخدمة في منظومات التوجيه الذاتي بغية تحليل وتقويم هذه الطرائق من أجل مختلف شروط حركة الهدف، والجسم الطائر، وبارامترات قانون التوجيه. ومن ثم اختيار الطريقة المثلى المناسبة لكل حالة.

طريقة البحث:

تُعمد في هذا البحث طريقة النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية؛ لذا تم إتباع المنهجية الآتية:

- دراسة المعادلة الكينماتيكية لكل طريقة توجيه؛
- وضع وتحليل النموذج الرياضي الهندسي لكل طريقة توجيه؛
- تنفيذ المحاكاة بمساعدة الحاسوب؛

- مقارنة حاسوبية بين طرائق التوجيه الذاتي للتحكم بوضعية جسم طائر؛
- مناقشة نتائج الدراسة وصياغة الاستنتاجات.

طرائق التوجيه الذاتي Homing Guidance Method:

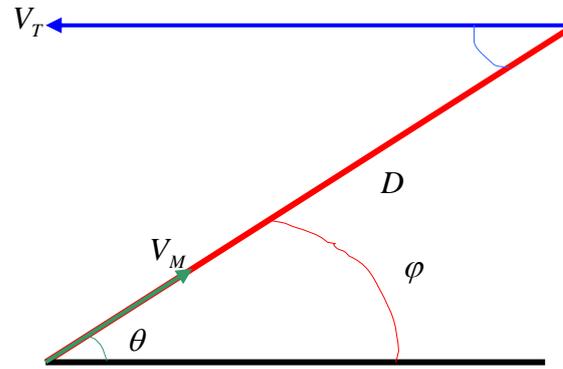
تقسم طرائق التوجيه الذاتي إلى:

- طريقة المطاردة الصرفة Pure-Pursuit Method؛
- طريقة المطاردة بزاوية سبق ثابتة Deviated-Pursuit Method؛
- طريقة الاقتراب المتوازي Parallel approach or Constant Bearing؛
- طريقة الاقتراب التناسبي Proportional approach؛

1- طريقة المطاردة الصرفة Pure-Pursuit Method:

تعتبر طريقة المطاردة الصرفة من أبسط طرائق التوجيه الذاتي. وتتميز هذه الطريقة بأن شعاع سرعة الجسم الطائر يكون موجهاً نحو الهدف من لحظة بدء التوجيه الذاتي وحتى نقطة الالتقاء مع الهدف كما هو

واضح على الشكل (1).



الشكل (1) طريقة المطاردة الصرفة.

تعطى معادلة الربط لهذه الطريقة بالعلاقة الآتية:

$$\theta - \varphi = 0 \Rightarrow \theta = \varphi \quad \text{أو} \quad \psi = 0 \quad (1)$$

حيث أن:

θ - زاوية شعاع سرعة الجسم الطائر،

φ - زاوية الخط الواصل بين الجسم الطائر والهدف،

ψ - زاوية السبق. وتعطى بالعلاقة الآتية: $\psi = \theta - \varphi$

وتستخدم كبارامتر توجيه، أي أن أمر التوجيه متناسب مع قيمتها $\lambda_e = K\psi$.

وقد قيمة أمر التوجيه مساوية الصفر عندما يكون الجسم الطائر واقعاً على المسار الكينماتيكي.

1-1 المعادلة العامة للمسار الكينماتيكي لطريقة المطاردة الصرفة [7]:

$$D = C_1 \frac{(1 + \cos \varphi)^{K_v}}{(\sin \varphi)^{K_v + 1}} \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{D_0 (\sin \varphi_0)^{K_V+1}}{(1 + \cos \varphi_0)^{K_V}} \quad (3) \quad \text{حيث أن :}$$

$$K_V = \frac{V_M}{V_T}$$

V_M - سرعة الجسم الطائر،

V_T - سرعة الهدف،

D_0 - المسافة بين الجسم الطائر والهدف لحظة بدء التوجيه الذاتي،

C_1 - ثابت التكامل وهو يتعلق بالقيم الابتدائية لـ D_0 و φ_0 ،

φ_0 - الزاوية بين \bar{D} والاتجاه الأساسي لحظة بدء التوجيه الذاتي.

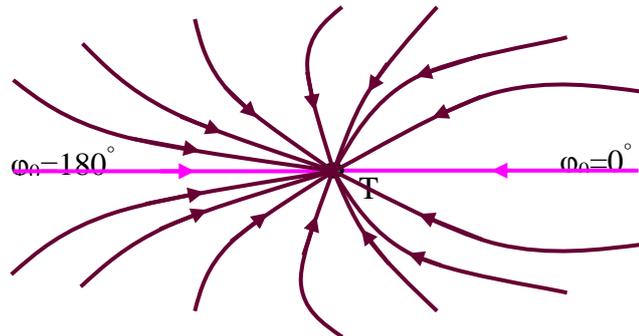
تستخدم العلاقتان (2) و (3) في حالة الأهداف المقترية، أما في حالة الأهداف المبتعدة فيمكن استخدام العلاقتين الآتيتين [7]:

$$D = C_1 \frac{(\sin \varphi)^{K_V-1}}{(1 + \cos \varphi)^{K_V}} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{D_0 (1 + \cos \varphi_0)^{K_V}}{(\sin \varphi_0)^{K_V-1}} \quad (5)$$

1-2- طبيعة المسار بالقرب من نقطة التلاقي:

إن العلاقات (2)، (3)، (4)، (5) تصف الرابطة بين مسافة الجسم الطائر إلى الهدف وبين الزاوية φ التي تحدد اتجاه شعاع المسافة \bar{D} مع الاتجاه الرئيس من أجل نسب معينة لسرعة الجسم الطائر إلى الهدف K_V وشروط توجيه ذاتي معينة. ولتحديد طبيعة المسار بالقرب من نقطة الالتقاء أي عندما $D \rightarrow 0$ تحسب نهاية قيمة العلاقتين (2) و (3) عندما $D \rightarrow 0$ ويُزال عدم التعيين باستخدام قاعدة أوبيتال. يتضح نتيجة ذلك أن التقاء الجسم الطائر بالهدف يحدث عندما $\varphi \rightarrow \pi$ و $K_V > 1$ ، أي أن الجسم الطائر يهاجم الهدف من الخلف وذلك بغض النظر عن الشروط الابتدائية للتوجيه الذاتي. كما هو واضح من الشكل (2).



الشكل (2) طبيعة المسارات في منطقة الالتقاء لطريقة المطاردة الصرفة.

يتضح من الشكل أن المسار يكون مستقيماً فقط في حالتين:

- عندما يرمى الجسم الطائر بدقة لملاقاة الهدف.

- عندما يرمى الجسم الطائر بدقة لمطاردة الهدف.

أما بقية المسارات فتكون منحنية وتتقارب بزاوية $\varphi = \pi$ في منطقة الالتقاء.

1-3- التسارع الناظمي للمسار الكينماتيكي في منطقة الالتقاء:

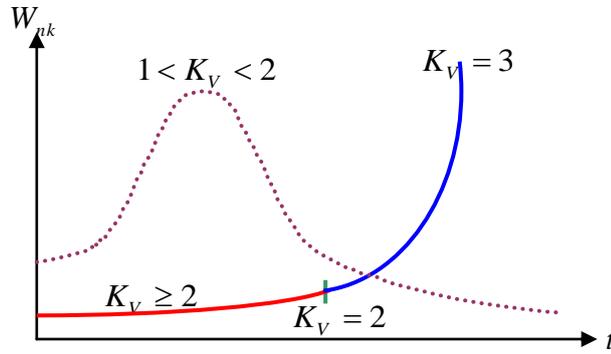
يعطى التسارع الناظمي للمسار الكينماتيكي بالعلاقة الآتية [8]:

$$W_{nk} = \frac{V_M V_T (\sin \varphi)^{K_V+2}}{C_1 (1 + \cos \varphi)^{K_V}} \quad (6)$$

وفي منطقة الالتقاء تكون قيمته مساوية [7]:

$$W_{nk} = \begin{cases} 0 & \text{for } 1 < K_V < 2 \\ 4 \frac{V_M V_T}{C_1} & \text{for } K_V = 2 \\ \infty & \text{for } K_V > 2 \end{cases} \quad (7)$$

يبين الشكل (3) علاقة التسارع الناظمي للمسار الكينماتيكي كتابع للزمن.



الشكل (3) التسارع الناظمي للمسار الكينماتيكي كتابع للزمن.

يتضح من هذا الشكل أن التسارع الناظمي المطلوب للمسار الكينماتيكي عندما يكون $1 < K_V < 2$ يتزايد في البداية إلى أن يبلغ قيمة عظمى ثم يبدأ بالتناقص ساعياً إلى الصفر في منطقة الالتقاء.

أما عندما يكون $K_V \geq 2$ فإن التسارع الناظمي يتزايد باستمرار بحيث يسعى إلى القيمة $4 \frac{V_M V_T}{C_1}$ عندما تكون

$K_V = 2$ ويسعى إلى اللانهاية ∞ عندما يكون $2 < K_V < 3$.

1-4- سلبيات وإيجابيات طريقة المطاردة الصرفة:

يتضح من العلاقة (6) و (7) ومن المناقشة السابقة أن التسارع الناظمي المطلوب من الجسم الطائر ليتحرك وفق المسار الكينماتيكي يتناسب طردياً مع جداء سرعة الهدف بسرعة الجسم الطائر، لذا تستخدم طريقة المطاردة الصرفة للرمي بالمطاردة على الأهداف البطيئة وغير المناورة.

أما إيجابية هذه الطريقة فتتمثل في سهولة إنتاج الأوامر حيث أن ذلك يتطلب قياس الزاوية φ فقط.

1-5- المحاكاة الحاسوبية لطريقة المطاردة الصرفة:

تم بناء برنامج بلغة البرمجة MATLAB لتمثيل مسار الجسم الطائر والهدف في حالة هدف مقرب

(pure_pin) وحالة هدف مبتعد (pure_pout) كما يلي:

مطاردة صرفة (هدف مقرب):

تعطى معادلات المسار وزمن الطيران والتسارع الناظمي لهدف مقترب بطريقة المطاردة الصرفة كالاتي

[7]:

$$D = C_1 \frac{(1 + \cos \varphi)^{K_V}}{(\sin \varphi)^{K_V+1}}$$

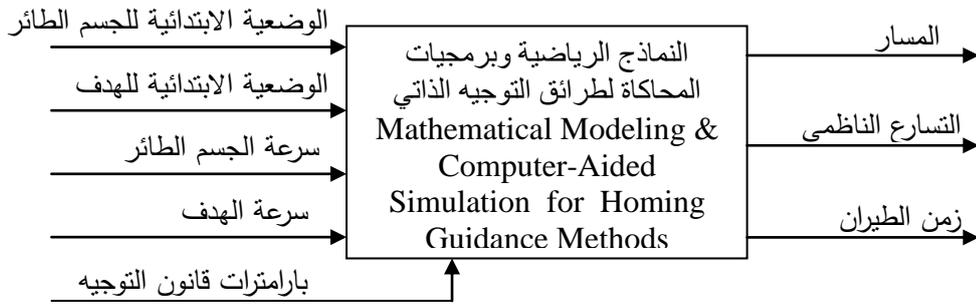
$$C_1 = \frac{D_0 (\sin \varphi_0)^{K_V+1}}{(1 + \cos \varphi_0)^{K_V}}$$

$$t = \frac{D_0 (\cos \varphi_0 - K_V) - D (\cos \varphi - K_V)}{K_V V_M - V_T}$$

$$\dot{\varphi} = \frac{V_T (\sin \varphi)^{K_V+2}}{C_1 (1 + \cos \varphi)^{K_V}}$$

$$W_n = V_M \dot{\varphi}$$

وقد تم بناء برنامج بلغة الـ MATLAB [11,12] لتمثيل هذه الطريقة من أجل قيم مختلفة لـ K_V . معطيات الدخل والخرج لعملية المحاكاة مبينة على الشكل الآتي:



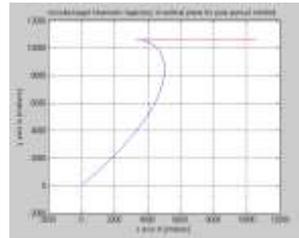
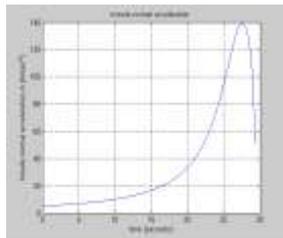
الشكل (4) معطيات الدخل والخرج لعملية المحاكاة.

1- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج pure_pin) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة المطاردة الصرفة في حالة هدف مقترب من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec$$

$$\text{هنا لدينا } K_V = \frac{V_M}{V_T} = \frac{450}{250} = 1.8 \text{ أي في حالة عندما } 1 < K_V < 2.$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{nmax}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{nfinal} [\text{m/sec}^2]$
مقرب	29.27	139.38	50.67

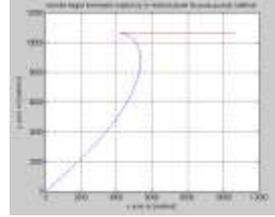
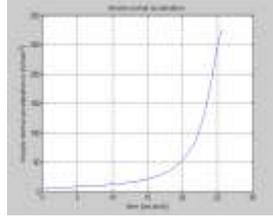
يلاحظ مما سبق أن الجسم الطائر يهاجم الهدف من الخلف في الجزء الأخير من مساره، ويلاحظ أن التسارع الناظمي للجسم الطائر ينتهي إلى الصفر. وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

2- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج pure_pin) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة المطاردة الصرفة في حالة هدف مقرب من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 500m/sec$$

$$. K_V = 2 \text{ هنا لدينا } K_V = \frac{V_M}{V_T} = \frac{500}{250} = 2$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{nmax}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{nfinal} [\text{m/sec}^2]$
مقرب	25.86	274.7	274.7

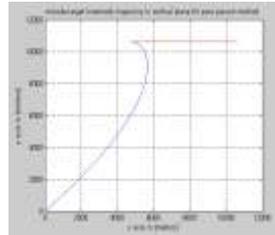
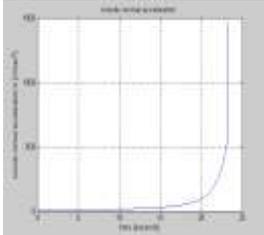
يلاحظ أن التسارع الناظمي للجسم الطائر ينتهي إلى قيمة محددة هي $4 \frac{V_T V_M}{C_1}$ وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

3- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج pure_pin) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة المطاردة الصرفة في حالة هدف مقرب من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 550m/sec$$

$$. K_V > 2 \text{ هنا لدينا } K_V = \frac{V_M}{V_T} = \frac{550}{250} > 2$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران	التسارع الأعظمي	التسارع النهائي
-----------	-------------	-----------------	-----------------

	$t_F[\text{sec}]$	$W_{n\max}[\text{m/sec}^2]$	$W_{n\text{final}} [\text{m/sec}^2]$
مقرب	23.33	$1.47 \cdot 10^{+3}$	$1.47 \cdot 10^{+3}$

يلاحظ أن التسارع الناظمي للجسم الطائر يسعى إلى اللانهاية ∞ . وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية. ويؤكد على عدم فعالية هذه الطريقة عند الرمي بالملاقاة (هدف مقرب).

مطاردة صرفة (هدف مبتعد):

تعطى معادلات المسار وزمن الطيران والتسارع الناظمي لهدف مبتعد بطريقة المطاردة الصرفة كالاتي

[7]:

$$D = C_1 \frac{(\sin \varphi)^{K_V - 1}}{(1 + \cos \varphi)^{K_V}}$$

$$C_1 = \frac{D_0 (1 + \cos \varphi_0)^{K_V}}{(\sin \varphi_0)^{K_V - 1}}$$

$$t = \frac{D_0 (K_V + \cos \varphi_0) - D (K_V + \cos \varphi)}{V_T - K_V V_M}$$

$$\dot{\varphi} = \frac{-V_T (1 + \cos \varphi)^{K_V}}{C_1 (\sin \varphi)^{K_V - 2}}$$

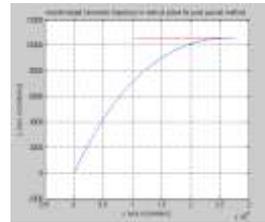
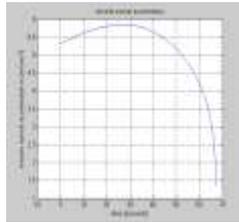
$$W_n = V_M \dot{\varphi}$$

وقد تم بناء برنامج بلغة الـ MATLAB لتمثيل هذه الطريقة من أجل قيم مختلفة لـ K_V كما يلي:
1- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج pure_pout) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة المطاردة الصرفة في حالة هدف مبتعد من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec$$

$$\text{هنا لدينا } K_V = \frac{V_M}{V_T} = \frac{450}{250} = 1.8 \text{ أي في حالة عندما } 1 < K_V < 2$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{n\max}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{n\text{final}} [\text{m/sec}^2]$
مبتعد	67.15	5.84	1.34

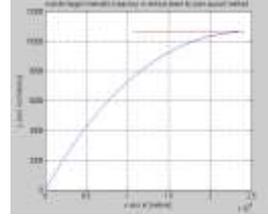
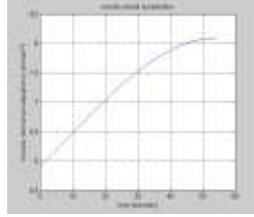
يلاحظ أن الجسم الطائر يهاجم الهدف من الخلف في الجزء الأخير من مساره، وأن التسارع الناظمي المطلوب منه ينتهي إلى الصفر. وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

2- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج pure_pout) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة المطاردة الصرفة في حالة هدف مبتعد من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 500m/sec$$

$$. K_V = 2 \text{ هنا لدينا } K_V = \frac{V_M}{V_T} = \frac{500}{250} = 2$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{nmax}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{nfinal} [\text{m/sec}^2]$
مبتعد	54.14	8.08	8.08

يلاحظ أن التسارع الناظمي المطلوب من الجسم الطائر ينتهي في منطقة الالتقاء إلى قيمة محددة هي $4 \frac{V_T V_M}{C_1}$.

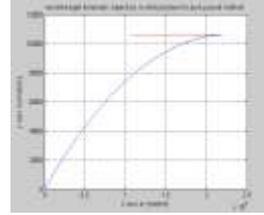
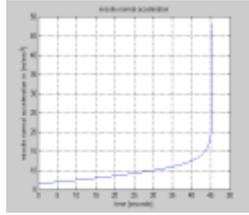
وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

3- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج pure_pout) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة المطاردة الصرفة في حالة هدف مبتعد من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 550m/sec$$

$$. K_V > 2 \text{ هنا لدينا } K_V = \frac{V_M}{V_T} = \frac{550}{250} > 2$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{nmax}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{nfinal} [\text{m/sec}^2]$
مبتعد	45.43	48.36	48.36

1-6- نتائج واستنتاجات:

الجدول (1): نتائج المحاكاة الحاسوبية عند الرمي على هدف مقرب من أجل قيم مختلفة لـ K_V

K_V	W_{nmax} [m/sec ²]	W_{nfinal} [m/sec ²]
$1 < K_V < 2$	139.38	50.67
$K_V=2$	274.7	274.7
$K_V>2$	1470	1470

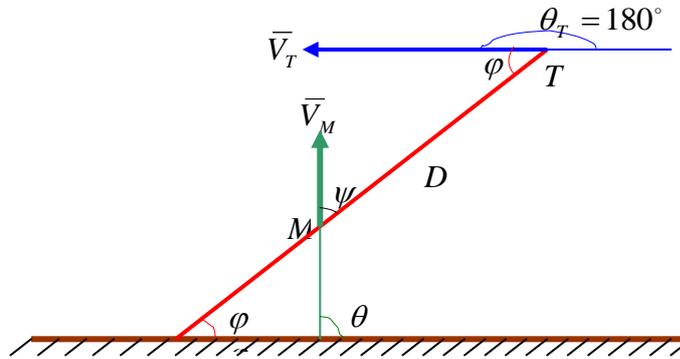
الجدول (2): نتائج المحاكاة الحاسوبية عند الرمي على هدف مبتعد من أجل قيم مختلفة لـ K_V

K_V	W_{nmax} [m/sec ²]	W_{nfinal} [m/sec ²]
$1 < K_V < 2$	5.84	1.34
$K_V=2$	8.08	8.08
$K_V>2$	48.36	48.36

يستنتج من الجدولين (1) و (2) ومن المقارنة بين التسارع الناظمي الأعظمي والنهائي المطلوب من الجسم الطائر لتحقيق المسار الكينماتيكي لحالتي هدف مقرب وهدف مبتعد بطريقة المطاردة الصرفة من أجل نفس بارامترات الطيران أن الرمي على الأهداف المقترية (بالملاقاة) يتطلب تسارعات ناظمية كبيرة وأكبر بكثير منه عند الرمي على الأهداف المبتعدة (بالمطاردة) مما يستبعد استعمال هذه الطريقة للرمي على الأهداف المقترية (ملاقاة).

2- طريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة Deviated-Pursuit Method:

طريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة هي طريقة التوجيه التي يشكل فيها شعاع سرعة الجسم الطائر \bar{V}_M زاوية سبق ثابتة مع الخط الواصل بين الجسم الطائر والهدف وذلك خلال كامل فترة توجيه الجسم الطائر إلى نقطة الالتقاء. كما هو واضح في الشكل (5).



الشكل (5) طريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة.

معادلة الربط لهذه الطريقة تعطى على الشكل الآتي:

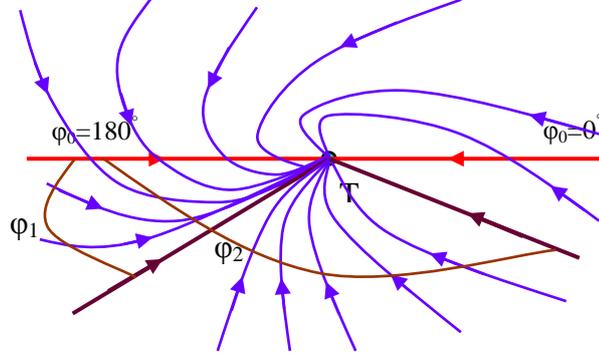
$$\theta - \varphi = \psi_0 = \text{const} \quad (8)$$

أما بارامتر التوجيه فيعطى بالعلاقة الآتية:

$$\Delta \psi = \psi - \psi_0 \quad (9)$$

2-1- طبيعة المسارات في منطقة الالتقاء:

إن جميع هذه المسارات مستقرة ما عدا المسار المناظر لـ φ_1 وهذا يعني أنه عندما ينحرف الجسم الطائر عن المستقيم المحدد بالزاوية φ_1 فإن الزاوية φ ستتغير حتى تصبح $\pi - \varphi$.
هذه المسارات مبينة على الشكل الآتي (6):



الشكل (6) طبيعة المسارات في منطقة التلاقي بطريقة المطاردة بزاوية سبق ثابتة.

واضح من الشكل (6) أن الجسم الطائر يهاجم الهدف في نصف الدائرة الخلفية للهدف.

2-2- المحاكاة الحاسوبية لطريقة المطاردة بزاوية سبق ثابتة:

تم بناء برنامج بلغة البرمجة MATLAB لتمثيل مسار الجسم الطائر والهدف في حالة هدف مقترب (pure_din) وحالة هدف مبتعد (pure_dout) كما يلي:
مطاردة بزاوية سبق ثابتة (هدف مقترب):

تعطى معادلة المسار وزمن الطيران والتسارع الناظمي لهدف مقترب بطريقة المطاردة بزاوية سبق ثابتة

كالاتي [7]:

$$a = K_V \sin \psi_0$$

$$b = K_V \cos \psi_0$$

$$D = D_0 \left(\frac{\sin \varphi_0 - K_V \sin \psi_0}{\sin \varphi - K_V \sin \psi_0} \right)^{\frac{K_V \cos \psi_0}{\sqrt{1-K_V^2 \sin^2 \psi_0}} + 1} \cdot \left(\frac{1 - K_V \sin \psi_0 \sin \varphi + \cos \varphi \cdot \sqrt{1 - K_V^2 \sin^2 \psi_0}}{1 - K_V \sin \psi_0 \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \cdot \sqrt{1 - K_V^2 \sin^2 \psi_0}} \right)^{\frac{K_V \cos \psi_0}{\sqrt{1-K_V^2 \sin^2 \psi_0}}}$$

$$D = D_0 \left(\frac{\sin \varphi_0 - a}{\sin \varphi - a} \right)^{\frac{b}{\sqrt{1-a^2}} + 1} \cdot \left(\frac{1 - a \sin \varphi + \cos \varphi \cdot \sqrt{1 - a^2}}{1 - a \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \cdot \sqrt{1 - a^2}} \right)^{\frac{b}{\sqrt{1-a^2}}}$$

$$t = \frac{1}{V_T (1 - K_V^2) \cos \psi_0} \{ D_0 [-K_V + \cos(\varphi_0 + \psi_0)] - D [-K_V + \cos(\varphi + \psi_0)] \}$$

$$\dot{\varphi} = \frac{V_T (-K_V \sin \psi_0 + \sin \varphi)}{D} = \frac{V_T (-a + \sin \varphi)}{D}$$

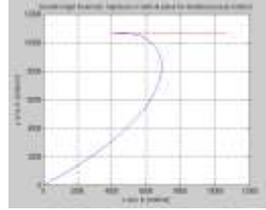
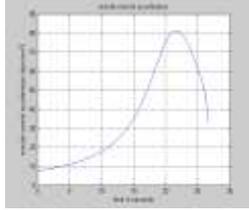
$$W_n = V_M \dot{\varphi}$$

وقد تم بناء برنامج بلغة الـ MATLAB لتمثيل هذه الطريقة كما يلي:

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج pure_din) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة في حالة هدف مقرب من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi_0 = 45^\circ, \psi_0 = -10^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{nmax}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{nfinal} [\text{m/sec}^2]$
مقرب	26.16	81.18	33.07

مطاردة بزواوية سبق ثابتة (هدف مبتعد):

تعطى معادلة المسار وزمن الطيران والتسارع الناظمي لهدف مبتعد بطريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة

كالآتي [7]:

$$a = K_V \sin \psi_0$$

$$b = K_V \cos \psi_0$$

$$D = D_0 \left(\frac{\sin \varphi - K_V \sin \psi_0}{\sin \varphi_0 - K_V \sin \psi_0} \right)^{\frac{K_V \cos \psi_0}{\sqrt{1-K_V^2 \sin^2 \psi_0}} - 1} \cdot \left(\frac{1 - K_V \sin \psi_0 \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \cdot \sqrt{1 - K_V^2 \sin^2 \psi_0}}{1 - K_V \sin \psi_0 \sin \varphi + \cos \varphi \cdot \sqrt{1 - K_V^2 \sin^2 \psi_0}} \right)^{\frac{K_V \cos \psi_0}{\sqrt{1-K_V^2 \sin^2 \psi_0}}}$$

$$D = D_0 \left(\frac{\sin \varphi - a}{\sin \varphi_0 - a} \right)^{\frac{b}{\sqrt{1-a^2}} - 1} \cdot \left(\frac{1 - a \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \cdot \sqrt{1 - a^2}}{1 - a \sin \varphi + \cos \varphi \cdot \sqrt{1 - a^2}} \right)^{\frac{b}{\sqrt{1-a^2}}}$$

$$t = \frac{1}{V_T (K_V^2 - 1) \cos \psi_0} \{ D_0 [K_V + \cos(\varphi_0 + \psi_0)] - D [K_V + \cos(\varphi + \psi_0)] \}$$

$$\dot{\varphi} = \frac{V_T (a - \sin \varphi)}{D}$$

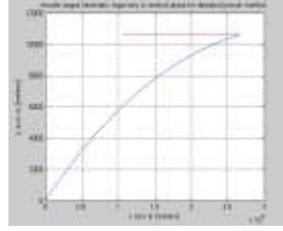
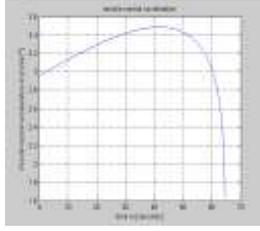
$$W_n = V_M \dot{\varphi}$$

وقد تم بناء برنامج بلغة الـ MATLAB [11,12] لتمثيل هذه الطريقة كما يلي:

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج pure_dout) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة في حالة هدف مبتعد من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi_0 = 45^\circ, \psi_0 = 10^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مبتعد	64.63	3.49	1.64

تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية السابقة من أجل قيم مختلفة لزاوية السبق ψ_0 والنتائج موضحة في الجدول الآتي.

4-3- النتائج والاستنتاجات:

الجدول (3): نتائج المحاكاة الحاسوبية عند الرمي على هدف مقرب من أجل قيم مختلفة لـ ψ_0 :

Pure-P		Deviated-P		
W_{nmax} [m/sec ²]	W_{nfinal} [m/sec ²]	Ψ_0 [deg]	W_{nmax} [m/sec ²]	W_{nfinal} [m/sec ²]
139	50.6	0	139	50.6
		10	81.2	33.1
		20	58.9	47.2

الجدول (4): نتائج المحاكاة الحاسوبية عند الرمي على هدف مبتعد من أجل قيم مختلفة لـ ψ_0 :

Pure-P		Deviated-P		
W_{nmax} [m/sec ²]	W_{nfinal} [m/sec ²]	Ψ_0 [deg]	W_{nmax} [m/sec ²]	W_{nfinal} [m/sec ²]
5.84	1.34	0	5.84	1.34
		10	3.49	1.64
		20	2.83	2.83

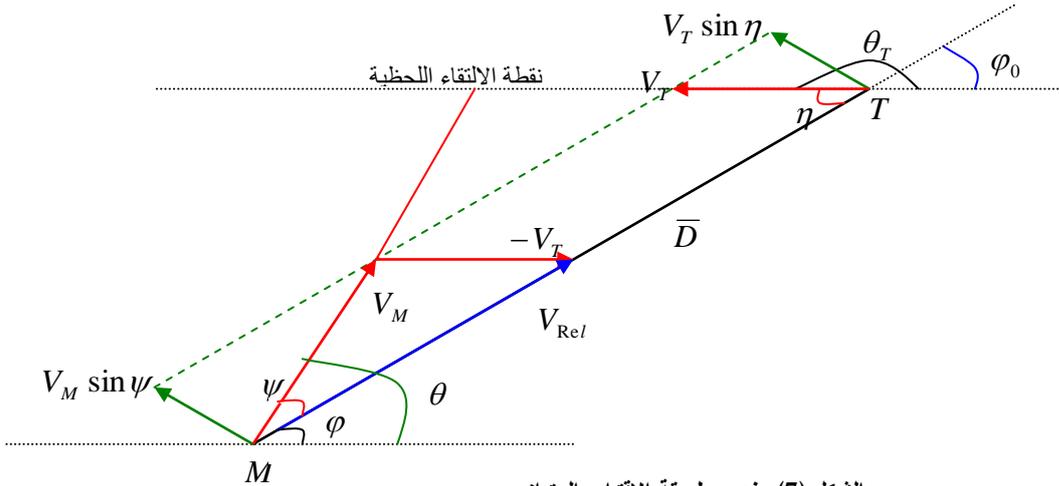
يتضح من الجدولين (3) و (4) ومن أجل قيمة معينة لـ K_V أن:

- التسارع الناظمي المطلوب من الجسم الطائر لتحقيق المسار الكينماتيكي بطريقة المطاردة بزوايا سباق ثابتة أقل من التسارع المطلوب بطريقة المطاردة الصرفة سواء كان الهدف مقرب أم مبتعد. أي أن طريقة المطاردة بزوايا سباق ثابتة تحسن من طريقة المطاردة الصرفة.
- إن قيم التسارع الناظمي من الجسم الطائر لتحقيق المسار الكينماتيكي بطريقة المطاردة بزوايا سباق ثابتة ما تزال كبيرة في حالة هدف مقرب بالمقارنة مع حالة هدف مبتعد. وهذا يعني أن طريقة المطاردة بزوايا سباق ثابتة لم تلغي سلبية طريقة المطاردة الصرفة.
- بما أن التسارع الناظمي في طريقة المطاردة الصرفة وطريقة المطاردة بزوايا سباق ثابتة يتناسب مع جداء سرعة الجسم الطائر وسرعة الهدف لذلك تستخدمان للرمي بالمطاردة على الأهداف البطيئة وغير المناورة.

3- طريقة الاقتراب المتوازي Parallel approach or Constant Bearing

إن الغاية من أية طريقة توجيه هي تحقيق التقاء الجسم الطائر مع الهدف وجعل خطأ الإصابة h_e معدوماً. فإن التقاء الجسم الطائر بالهدف محقق إذا بقي شعاع السرعة النسبية \bar{V}_{Rel} منطبقاً على شعاع المسافة \bar{D} خلال كامل فترة التوجيه. ويتأمن ذلك إذا بقيت المركبة الناظمية لسرعة الهدف مساوية للمركبة الناظمية لسرعة الجسم الطائر (أنظر الشكل رقم (7)). أي:

$$V_M \sin \psi = V_T \sin \eta \quad (10)$$



عندما يتحقق الشرط (10) فإن الزاوية ϕ ثابتة وشعاع المسافة \bar{D} يتحرك موازياً لنفسه. وهذا سبب تسمية الطريقة بالاقتراب المتوازي.

ينضح من الشكل (6) أنه عندما تكون سرعة الجسم الطائر والهدف ثابتتان فإن التقاء الجسم الطائر بالهدف يتم في نقطة الالتقاء اللحظية.

3-1- المحاكاة الحاسوبية لطريقة الاقتراب المتوازي:

تم بناء برنامج بلغة البرمجة MATLAB لتمثيل مسار الجسم الطائر والهدف لحالة هدف مقرب (parallel_in) وحالة هدف مبتعد (parallel_out) كما يلي:

اقتراب متوازي (هدف مقرب):

تعطى معادلة المسار وزمن الطيران والتسارع الناظمي لهدف مقرب بطريقة الاقتراب المتوازي كما يلي

[8]:

$$- \text{عندما } V_M(t) = V_M = \text{const} , V_T(t) = V_T = \text{const}$$

$$A_0 = \frac{\sqrt{K_{V0}^2 - \sin^2 \phi}}{K_{V0}}$$

$$t_F = \frac{D_0}{V_T \cos \phi_0 + A_0 V_{M0}}$$

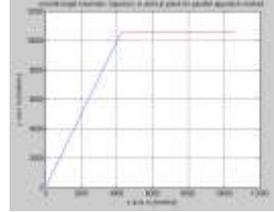
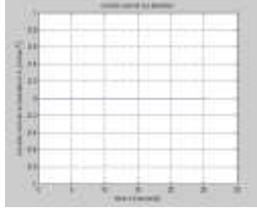
$$D_1 = D_0 - [V_T \cos \phi_0 + A_0 V_{M0}] \cdot t$$

وقد تم بناء برنامج لتمثيل هذه الطريقة كما يلي:

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج parallel_in) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة الاقتراب المتوازي في حالة هدف من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مقترَب	25.39	0	0

يلاحظ أن مسار الجسم الطائر عبارة عن خط مستقيم، ويلاحظ أيضاً أن التسارع الناظمي يساوي الصفر لأنه يتم الالتقاء في نقطة الالتقاء اللحظية وهذه ميزة طريقة الاقتراب المتوازي. وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

اقتراب متوازي(هدف مبتعد):

تعطى معادلة المسار وزمن الطيران والتسارع الناظمي لهدف مبتعد بطريقة الاقتراب المتوازي كما يلي

[8]:

$$A_0 = \frac{\sqrt{K_{V_0}^2 - \sin^2 \varphi}}{K_{V_0}}$$

$$t_F = \frac{D_0}{V_T \cos \varphi_0 - A_0 V_{M0}}$$

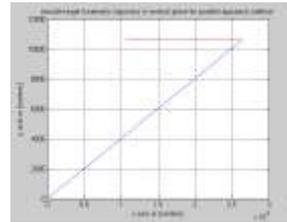
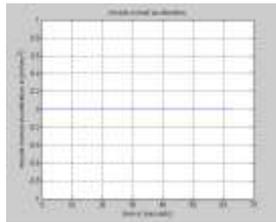
$$D_1 = D_0 + [V_T \cos \varphi_0 - A_0 V_M] \cdot t$$

وقد تم بناء برنامج لتمثيل هذه الطريقة كما يلي:

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج parallel_out) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة الاقتراب المتوازي في حالة هدف مبتعد من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, \varphi_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec$$

نتائج المحاكاة:



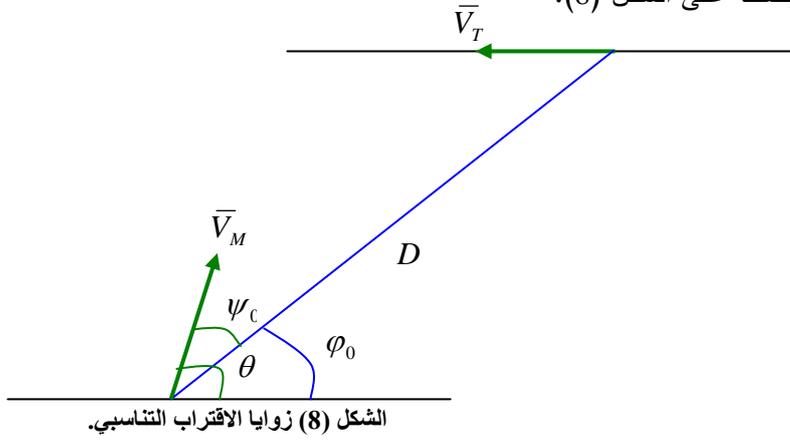
القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{nmax}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{nfinal} [\text{m/sec}^2]$
مبتعد	63.278	0	0

يلاحظ أن مسار الجسم الطائر عبارة عن خط مستقيم، ويلاحظ أيضاً أن التسارع الناظمي يساوي الصفر لأنه يتم الالتقاء في نقطة الالتقاء اللحظية وهذه ميزة طريقة الاقتراب المتوازي. وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

4- طريقة الاقتراب التناسبي Proportional approach Method:

تمتاز هذه الطريقة بأهمية كبيرة بين طرق التوجيه الذاتي نظراً لإمكانية استخدامها في توجيه مختلف أنواع الأجسام الطائرة. في هذه الطريقة تبقى السرعة الزاوية لدوران شعاع سرعة الجسم الطائر θ متناسبة مع السرعة الزاوية لدوران شعاع المسافة $\dot{\varphi}$ خلال كامل زمن الطيران. إن زوايا الاقتراب التناسبي موضحة على الشكل (8).



علاقات الربط لطريقة الاقتراب التناسبي [7]:

$$\dot{\theta} = K\dot{\varphi} \quad (11)$$

$$\theta = K\varphi + C \quad (12)$$

$$C = \theta_0 - K\varphi_0 \quad (13)$$

حيث أن:

K - ثابت التناسب،

C - ثابت التكامل.

يمكن من خلال هذه العلاقات الحصول على علاقات الربط لكل طرائق التوجيه كما يلي:

1- $K = 1$ ، $C = 0$ ، $\theta_0 = \varphi_0$ ، $\theta = \varphi$ وهذه علاقة الربط لطريقة المطاردة الصرفة حيث أن

$$\psi = \theta - \varphi = 0$$

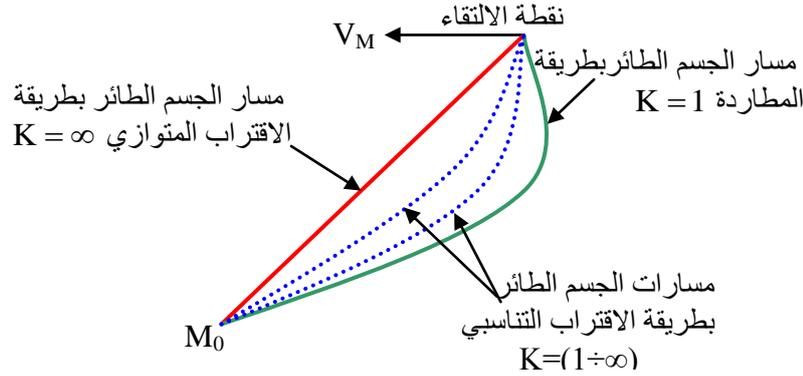
2- $K = 1$ ، $C \neq 0$ ، $\theta_0 \neq \varphi_0$ أي علاقة الربط لطريقة المطاردة بزواوية سبق

ثابتة.

$$-3 \quad K \rightarrow \infty : \text{بما أن } \dot{\theta} = K\dot{\varphi} \Leftrightarrow \dot{\theta} = \frac{\dot{\theta}}{K} \text{ وبما أن } \dot{\theta} \neq 0 \text{ فإن } \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{\dot{\theta}}{K} = 0 \text{ أي أن } \dot{\varphi} \rightarrow 0 \text{ أي}$$

علاقة الربط لطريقة الاقتراب المتوازي.

يستنتج مما سبق أن طبيعة المسارات في منطقة الالتقاء تشبه مسارات طريقة المطاردة وطريقة الاقتراب المتوازي كما هو مبين على الشكل الآتي (9).



وهذا يعني أن الرماية على الأهداف يمكن أن تتم بالمطاردة أو بالملافاة.

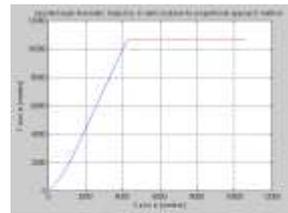
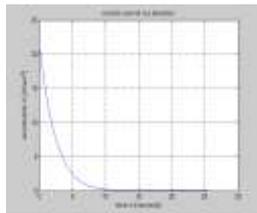
واضح مما سبق أن هذه الطريقة هي الطريقة العامة للتوجيه الذاتي والتي يمكن اعتمادها عليها الحصول على جميع الطرق من خلال تغيير بارامترات علاقة الربط ويتم تحديد المسار وتغييره حسب تغيير φ .

4-1- المحاكاة الحاسوبية لطريقة الاقتراب التناسبي:

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج prop-in) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة الاقتراب التناسبي في حالة هدف مقرب من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, V_M = 450m/sec, \varphi_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, K = 4$$

نتائج المحاكاة:



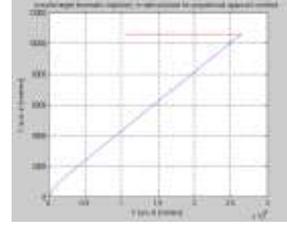
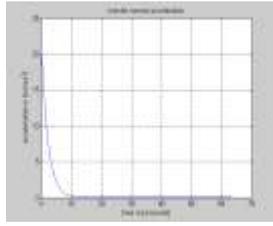
القيم العددية لنتائج المحاكاة:

نوع الهدف	جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
غير مناور	مقرب	25.48	21.8	0

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج prop-out) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة الاقتراب التناسبي في حالة هدف مبتعد من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, V_M = 450m/sec, \varphi_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, K = 4$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

نوع الهدف	جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
غير مناور	مبتعد	63.47	21.17	0

يستنتج من الدراسة السابقة أن طريقة الاقتراب التناسبي صالحة للرمي بالملقاة (هدف مقرب) أو بالمطاردة (هدف مبتعد) لأن التسارع الناظمي ينتهي إلى الصفر في منطقة الالتقاء.

5- نتائج واستنتاجات:

الجدول (5): نتائج المحاكاة الحاسوبية عند الرمي على هدف مقرب من أجل مختلف طرق التوجيه الذاتي:

	t_F [sec]	W_{nmax} [m/sec ²]	W_{nfinal} [m/sec ²]
P-Pursuit	29.27	139.38	50.67
D-Pursuit	26.16	81.18	33.07
Parallel approach	25.39	0	0
Proportional approach	25.48	21.8	0

الجدول (6): نتائج المحاكاة الحاسوبية عند الرمي على هدف مبتعد من أجل مختلف طرق التوجيه الذاتي:

	t_F [sec]	W_{nmax} [m/sec ²]	W_{nfinal} [m/sec ²]
P-Pursuit	67.15	5.84	1.34
D-Pursuit	64.63	3.49	1.64
Parallel approach	63.378	0	0
Proportional approach	63.47	21.17	0

يستنتج من دراسة معطيات الجدولين (5) و (6) ما يلي:

- إن أفضل طرائق التوجيه الذاتي هي طريقة الاقتراب المتوازي و طريقة الاقتراب التناسبي لأنها تتطلب تسارعات ناظرية صفرية في منطقة الالتقاء مع الهدف وزمن طيران أقل، وهذا يلبي احد أهم المتطلبات المفروضة على طريقة التوجيه [1].

- بما أن طريقة الاقتراب المتوازي تتطلب تحقيق شروط مثالية للغاية (سرعة الجسم الطائر والهدف يجب أن تكون ثابتة خلال كامل زمن الطيران حتى نقطة الالتقاء مع الهدف)، وهذه الشروط لا يمكن تحقيقها عملياً (في الواقع سرعة الهدف والجسم الطائر متغيرة)، لذا يستنتج أن طريقة الاقتراب التناسبي هي الأفضل بين طرائق التوجيه الذاتي وهي عملياً الأكثر استخداماً. وكذلك نلاحظ بأن التسارع النهائي المطلوب من الجسم الطائر تحقيقه

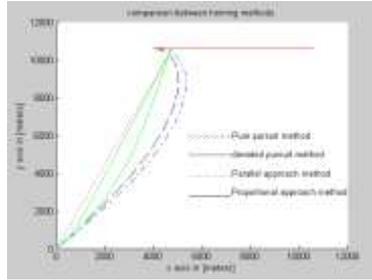
بطريقة الاقتراب التناسبي يسعى إلى الصفر وهذا يلبي إحدى المتطلبات المفروضة على نظام التوجيه وتعتبر الطريقة العامة للتوجيه الذاتي.

مقارنة برمجية بين طرق التوجيه الذاتي:

تم كتابة برنامج بلغة البرمجة matlab للمقارنة بين طرائق التوجيه الذاتي كما يلي:
- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج compare_homing_in) للمقارنة بين طرائق التوجيه الذاتي في حالة الأهداف المقتربة من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, V_M = 500m/sec, \varphi_0 = 45^0, V_T = 250m/sec$$

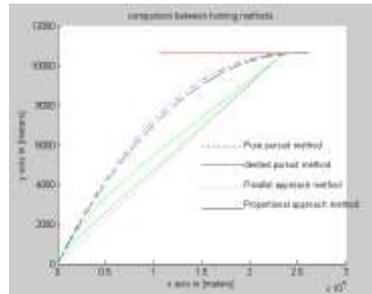
نتائج المحاكاة:



- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج compare_homing_out) للمقارنة بين طرائق التوجيه الذاتي في حالة الأهداف المبتعدة من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15000m, V_M = 500m/sec, \varphi_0 = 45^0, V_T = 250m/sec$$

نتائج المحاكاة:



مما سبق نستنتج أن مسارات الأجسام الطائرة بطريقة الاقتراب التناسبي تتوضع بين مسارات طريقتي المطاردة وطريقة الاقتراب المتوازي.

النتائج والمناقشة:

من خلال الدراسة التحليلية والمحاكاة البرمجية لطرائق التوجيه الذاتي تم التوصل إلى النتائج الآتية:
1- الجسم الطائر يهاجم الهدف من الخلف (مطاردة) في الجزء الأخير من مساره عند استخدام طريقتي المطاردة الصرفة والمطاردة بزاوية سبق ثابتة.

- 2- إن الرمي على الأهداف المقترية (بالملاقاة) بطريقتي المطاردة الصرفة والمطاردة بزواوية سبق ثابتة يتطلب تسارعات ناظرية كبيرة وأكبر بكثير منه عند الرمي على الأهداف المبتعدة (بالمطاردة) مما يستبعد استعمال هذه الطريقة للرمي على الأهداف المقترية (ملاقاة).
- 3- التسارع الناظمي المطلوب من الجسم الطائر لتحقيق المسار الكينماتيكي بطريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة أقل من التسارع المطلوب بطريقة المطاردة الصرفة سواء كان الهدف مقرب أم مبتعد. أي أن طريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة تحسن من طريقة المطاردة الصرفة.
- 4- إن قيم التسارع الناظمي من الجسم الطائر لتحقيق المسار الكينماتيكي بطريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة ما تزال كبيرة في حالة هدف مقرب بالمقارنة مع حالة هدف مبتعد. وهذا يعني أن طريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة لم تلغي سلبية طريقة المطاردة الصرفة.
- 5- بما أن التسارع الناظمي في طريقة المطاردة الصرفة وطريقة المطاردة بزواوية سبق ثابتة يتناسب مع جداء سرعة الجسم الطائر وسرعة الهدف لذلك تستخدمان للرمي بالمطاردة على الأهداف البطيئة وغير المناورة.
- 6- إن أفضل طرائق التوجيه الذاتي هي طريقة الاقتراب المتوازي وطريقة الاقتراب التناسبي لأنهما تتطلبان تسارعات ناظرية صفرية في منطقة الالتقاء مع الهدف وزمن طيران أقل، وهذا يلبي احد أهم المتطلبات المفروضة على طريقة التوجيه [1].
- 7- بما أن طريقة الاقتراب المتوازي تتطلب تحقيق شروط مثالية للغاية (سرعة الجسم الطائر والهدف يجب أن تكون ثابتة خلال كامل زمن الطيران حتى نقطة الالتقاء مع الهدف)، وهذه الشروط لا يمكن تحقيقها عملياً (في الواقع سرعة الهدف والجسم الطائر متغيرة)، لذا يستنتج أن طريقة الاقتراب التناسبي هي الأفضل بين طرائق التوجيه الذاتي وهي عملياً الأكثر استخداماً. وكذلك نلاحظ بأن التسارع النهائي المطلوب من الجسم الطائر تحقيقه بطريقة الاقتراب التناسبي يسعى إلى الصفر وهذا يلبي إحدى المتطلبات المفروضة على نظام التوجيه وتعتبر الطريقة العامة للتوجيه الذاتي.
- 8- أظهرت الدراسة تطابقاً كبيراً بين نتائج المحاكاة مع المعطيات المتوفرة في المراجع النظرية ذات الصلة [7,8]، وهذا يدل على سلامة منهجية العمل ومصداقية النماذج الرياضية الموضوعية وصحة برمجيات المحاكاة الحاسوبية، مما يجعل من الأدوات الرياضية والبرمجية التي يقدمها هذا العمل صالحة للتطبيق عند دراسة هذه الطريقة سواء في مجال التصميم والتقييم، أو في مجال التعليم والتدريب.

المراجع:

.....

1- طوشان.الياس فرج الله.1977-نظم توجيه الصواريخ.حلب

2- شحادة حسان. 1995-نظرية توجيه الصواريخ. حلب

- 3-Kennedy,G.P.,Rockets, Missiles and Spacecraft of the National Air and Space Museum, Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 1983.
- 4-Nesline,F.W.,and Zarchan,P.,A New Look at Classical Versus Modern Homing Guidance,*Journal of Guidance and Control*, Vol.4, Jan.-Feb. 1981, pp.78-85.
- 5-Garnell,P., Guided Weapon Control Systems, Pergamon, Oxford Press, Brassey's Publishers, Second Edition, 1980.
- 6- El-Sheikh,G.A., Guidance and Control:Tutorial, Technology and Armament Magazine, Cairo, Vol 13-3, July, 1998..
- 7- El-Sheikh,G.A., Theory of Guidance, Cairo, 1993..
- 8- Zarchan,P., Tactical and Strategic Missile Guidance, Second Edition, AIAA, 1994..
- 9- Bakhvalov,N.S, Numerical Methods, Mir Publishers, 1977..
- 10- Abbassi,M.M, Modern Numerical Methods, Vol.1, Almaarefestablishment Alexandria, 1975..
- 11- Shahian,B., and Hassul,M., Control System Design using MATLAB, New Jersey, 1993..
- 12- Ogata,K., Solving Control Engineering Problems with MATLAB, New Jersey, 1993.