

## دراسة تأثيرات عزوم القوى الخارجية على قمر صناعي مكعب بحجم 1U

د. بلال شبحاً\*

ربيع صبيره\*\*

(تاريخ الإيداع 11 / 11 / 2020. قُبل للنشر في 1 / 7 / 2021)

### □ ملخص □

قمنا في هذا البحث بدراسة تأثير القوى الخارجية على قمر صناعي مكعب ذي حجم 1U وأبعاده  $10*10*10\text{cm}^3$  على ارتفاعات منخفضة تتراوح بين 200 km إلى 600 km، بوزن 1Kg و 1.33 Kg، والتي هي على شكل عزوم نابذة وعزوم جاذبية. ولقد تم حساب قيم البارامترات المدارية والتي تشمل السرعة الزاوية والسرعة المدارية وزمن المدار وزمن الظل للقمر الصناعي المكعب، باستخدام بيئة MATLAB/R2014a. إن طبيعة المدار الذي يدور ضمنه القمر الصناعي المكعب هو مدار دائري وبانزياح قطبي قيمته تقريباً 97.3° لكي يغطي منطقة سوريا أثناء حركته.

بيئاً في هذا البحث بأن ارتفاع المدار يزيد من قيمة عزوم القوى الخارجية، باستثناء عزم الضغط الشمسي الذي ترتبط قيمته بمساحة السطح الأمامية للقمر الصناعي المكعب، وكذلك قيمة الكثافة الجوية عند نشاطات إشعاع شمسي مرتفع تزيد من قيمة العزم الأيروديناميكي، وكذلك قيمة العزم المغناطيسي. وعند زيادة وزن القمر الصناعي المكعب من 1kg إلى 1.33kg مع المحافظة على أبعاده، فإن العزم المغناطيسي والعزم الأيروديناميكي وعزم تدرج الجاذبية الأرضية تزداد، باستثناء عزم الضغط الشمسي الذي لا يتأثر بهذه الزيادة مطلقاً، كما تزداد السرعة الزاوية والسرعة المدارية.

**الكلمات المفتاحية:** قمر صناعي مكعب، العزم الأيروديناميكي، العزم المغناطيسي، عزم تدرج الجاذبية الأرضية، عزم الضغط الشمسي، الكثافة الجوية.

\* استاذ مساعد، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

\*\* طالب دراسات عليا (دكتوراه)، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

## Studying the Effects of the External Forces on 1U CUBESAT

Dr. Bilal Chiha\*  
Rabih Sbera\*\*

(Received 11 / 11 / 2020. Accepted 1 / 7 / 2021)

### □ ABSTRACT □

This search studies the external forces affecting on a 1U CUBESAT with dimensions  $10*10*10\text{ cm}^3$  at low altitude ranging from 200km to 600km, by weight 1.33kg, which are formed in the form of attractive moments and centrifugal moments, and we calculate the values of the orbital parameters, which includes angular velocity, orbital velocity, orbit time and shadow time for the CUBESAT by using MATLAB/R2014a environment.

The orbit nature which the CUBESAT movement in it is circular and have polar inclination which evaluated approximately  $97.3^\circ$ , to covering the area of Syria.

This search showed that orbit altitude increasing of the forces torques with the exception of the solar pressure torque whose value are related to front surface area of the CUBESAT, as well as the value of atmospheric density when high solar radiation activities increase the value of the aerodynamic torque as well as magnetic torque.

When the weight of CUBESAT increase from 1kg to 1.33kg with keeping the same dimensions of the CUBESAT, the magnetic torque, aerodynamic torque and gravity gradient torque are increased, but the solar pressure torque doesn't effected in these increasing and the angular velocity and orbital velocity increased.

**Keywords:** CUBESAT, aerodynamic torque, magnetic torque, gravity gradient torque, solar pressure torque, atmosphere density.

---

\* Associate Professor, Department Of Computer And Control Engineering, Faculty Of Mechanical And Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\* Postgraduate Student (Ph.D.), Department Of Computer And Control Engineering, Faculty Of Mechanical And Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia , Syria.

**مقدمة:**

إن إنجاز علوم الفضاء واستكشافه بشكل دائم ومرن عن طريق الأقمار الصناعية الكبيرة مكلف جداً من الناحية المادية والزمنية، حيث يحتاج تصميم وبناء مركبة فضائية إلى العديد من السنوات بالإضافة إلى مبالغ مالية ضخمة يتم إنفاقها في مراكز الأبحاث. لقد تم اقتراح أول تصميم مرجعي لقمر صناعي مكعب Cubesat صغير جداً بحجم راحة اليد في العام 1999 في جامعتي كاليفورنيا وستانفورد [1]، كما هو مبين في الشكل (1)، بهدف الوصول إلى معرفة تسمح لجميع الطلاب في أنحاء العالم وباحثي الجامعات بتصميم وبناء مركب فضائية صغيرة مضمونة الإطلاق كحمل ثانوي (أي بدون تكلفة) إلى أقصى حد ممكن.



الشكل(1): قمر صناعي مكعب بحجم U1[2].

تدور هذه الأقمار الصناعية المكعبة ضمن مدارات ذات ارتفاعات مختلفة تبعاً لأحجامها وأوزانها، ويراعى أثناء تصميمها مجموعة من القوى الخارجية كالعزم الأيروديناميكي والعزم المغناطيسي اللذان يؤثران بشكل كبير على حركتها [3].

**أهمية البحث وأهدافه:**

تكمن أهمية هذا البحث في تقديم دراسة حول القوى الخارجية التي تؤثر على القمر الصناعي المكعب عند ارتفاعات مختلفة وإعطاء قاعدة بيانات صغيرة تشكل نقطة انطلاق لمزيد من الأبحاث ضمن هذا المجال بهدف معرفة تأثير الارتفاع على قيم عزوم القوى ومن ثم إيجاد قيم البارامترات المدارية اللازمة لمعرفة قيم العزوم المؤثرة على استقرار القمر الصناعي، الأمر الذي يقود بالنهاية إلى تصميم صحيح لمشغلات الحركة المسؤولة عن استقرار القمر الصناعي المكعب ضمن مداره.

**طرائق البحث ومواده:**

يعتمد البحث على المنهج الوصفي والتحليلي والتجريبي:

تطرقنا في بحثنا هذا إلى ماهية القوى الخارجية المؤثرة على القمر الصناعي المكعب، حيث تبين لنا أن سببها يعود إلى أربعة عزوم، اثنان منها عزوم نابذة تسبب انحراف للقمر الصناعي المكعب إلى خارج مداره وهما العزم الأيروديناميكي وعزم الضغط الشمسي، واثنان منها عزوم جاذبة تسبب سحب القمر الصناعي المكعب باتجاه الأرض وهما عزم تدرج الجاذبية الأرضية والعزم المغناطيسي.

قمنا بتحليل المعادلات الخاصة بكل عزم من هذه العزوم وحساب بارامترات هذه المعادلات وقيمها الحدية، وقد حصلنا على قيم بعض المعاملات باستخدام الرسوم البيانية، مثل معامل الانجراف الأيروديناميكي، والعزم المغناطيسي، العزم الأيروديناميكي، عزم الضغط الشمسي وعزم تدرج الجاذبية الأرضية، وكذلك قيم بعض البارامترات المدارية كزمن المدار وسرعة القمر الصناعي المكعب المدارية والزوايا.

لقد اخترنا قيم مختلفة للارتفاع تقع ضمن المجال [600 - 200]، ووزنين 1kg و 1.33kg، وذلك من أجل معرفة تأثير الوزنين على قيم القوى الخارجية المؤثرة على القمر الصناعي، كونها القيمتان اللتان يمكن تغييرهما، وفي ما عدا ذلك لا يمكن إجراء أي تغيير على باقي البارامترات، كونها ثابتة وقيم حدية تخضع لقيود تصميمية خاصة بالقمر الصناعي.

### 1- تصنيف الأقمار الصناعية المكعبة

يوجد تصنيفان أساسيان للأقمار الصناعية المكعبة إما حسب ارتفاع المدار أو حسب حجم ووزن القمر. يمتد التصنيف حسب ارتفاع المدار من 200km إلى أعلى من 35790km ومقسم إلى مجالات وفق الجدول (1)، أما بالنسبة للتصنيف حسب وزن وحجم القمر، فإن الأوزان تتراوح من 100g إلى 10kg ومقسمة إلى مجالات وفق الجدول (1) وحجوم مختلفة من رتبة U، حيث تدل U على وحدة قياس نظامية للقمر الصناعي المكعب من حيث الوزن والأبعاد وتدعى unit، وتبلغ قيمة الوزن القياسي 1.33kg لكل وحدة أو أقل حسب دواعي التصميم للقمر الصناعي المكعب. أما الأبعاد القياسية فهي  $10*10*10cm^3$ ،  $10*10*20cm^3$  و  $10*10*30cm^3$  للوحدات U و 2U و 3U على الترتيب.

الجدول(1): تصنيفات الأقمار الصناعية المكعبة [4]، [5].

التصنيف حسب الوزن		التصنيف حسب ارتفاع المدار (km)	
الحدود الوزن	التصنيف حسب الوزن	حدود الارتفاع	اسم المدار
أقل من 100 g	Femtosatellite	200-1200	مدار منخفض
[100g 1.33kg]	Picosatellite	1200-35790	مدار متوسط
[1.33kg 10kg]	Nanosatellite	35790	مدار تزامني
[10kg 100kg]	Microsatellite	35790	مدار ثابت
		Above 35790	مدار عال

### 2- القوى الخارجية المؤثرة على القمر الصناعي المكعب

توجد العديد من القوى التي تؤثر على حركة القمر الصناعي المكعب أثناء وجوده ضمن مداره والتي تكون على شكل عزوم، وتصنف إلى نوعين: النوع الأول ويدعى بالعزوم الجاذبة التي تعمل على سحب القمر الصناعي المكعب باتجاه الأرض ومنها العزم المغناطيسي الأرضي وعزم تدرج الجاذبية الأرضية، أما النوع الثاني هو عزوم نابذة تقوم بإبعاد القمر عن مداره باتجاه الفضاء الخارجي كالعزم الأيروديناميكي وعزم الضغط الشمسي [6]، [7]، ويهمل تأثير عزوم القوى الأخرى على الارتفاعات المنخفضة كعزم جاذبية القمر وعزم جاذبية بعض الأقمار الصناعية المكعبة الموجودة بجوار القمر المدروس [8].

## 1-2 العزم الأيروديناميكي Aerodynamic Torque

ينشأ هذا العزم عن الانجراف الأيروديناميكي، والذي بدوره ينشأ عن الضغط الشمسي، ويعتمد هذا العزم على النشاط المغناطيسي الأرضي وارتفاع المدار. تؤثر القوة الأيروديناميكية على القمر الصناعي المكعب بحيث يكون اتجاهها عكس شعاع السرعة الزاوية للقمر الصناعي المكعب، مما يسبب نبذ للقمر الصناعي المكعب عن مداره وإعاقة حركته [9]، وتعطى وفق العلاقة:

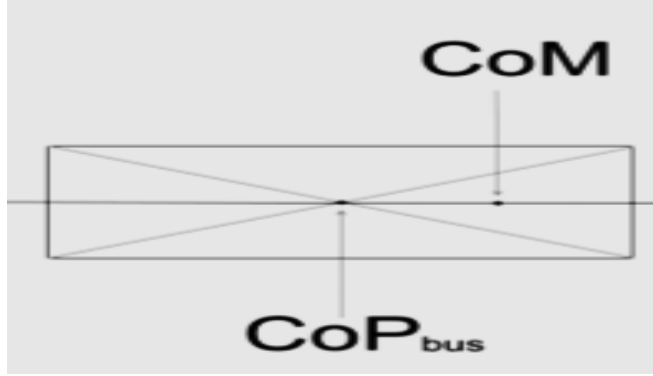
$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot C_D \cdot \rho \cdot v^2 \quad (1)$$

حيث  $S$  و  $v$  المساحة الأمامية والسرعة المدارية للقمر الصناعي المكعب على الترتيب،  $\rho$  الكثافة الجوية،  $C_D$  معامل الانجراف الأيروديناميكي.

يظهر العزم الأيروديناميكي عندما يكون مركز الضغط للقوة الأيروديناميكية مختلف عن مركز كتلة القمر الصناعي المكعب، ويحسب هذا العزم وفق العلاقة:

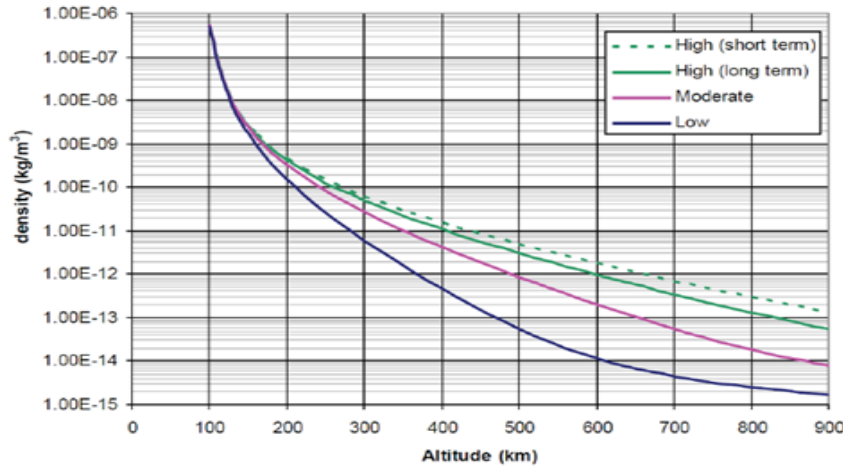
$$T_{aero} = r_{CoP} \cdot F_{aero} \quad (2)$$

حيث  $r_{CoP}$  الشعاع بين مركز كتلة القمر الصناعي المكعب (CoM) ومركز الضغط للقوة الأيروديناميكية (CoP) كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2): مكان تواضع مركز كتلة الساتل ومركز الضغط للقوة الأيروديناميكية [10].

تتعلق الكثافة الجوية  $\rho$  بارتفاع مدار القمر الصناعي المكعب والتي تؤخذ قيمتها عند كل ارتفاع من تقاطع الارتفاع مع منحنيات الكثافة الجوية عند نشاطات إشعاع شمسي مختلف، كما هو موضح في الشكل (3)، أي عندما يكون هذا النشاط منخفض و معتدل ومرتفع والذي تؤخذ قيمته في حالتين: الحالة الأولى عندما تقاس قيمته على فترات زمنية متباعدة، والحالة الثانية عندما تقاس قيمته على فترات زمنية متقاربة من قبل هيئات مختصة في هذا المجال [11].

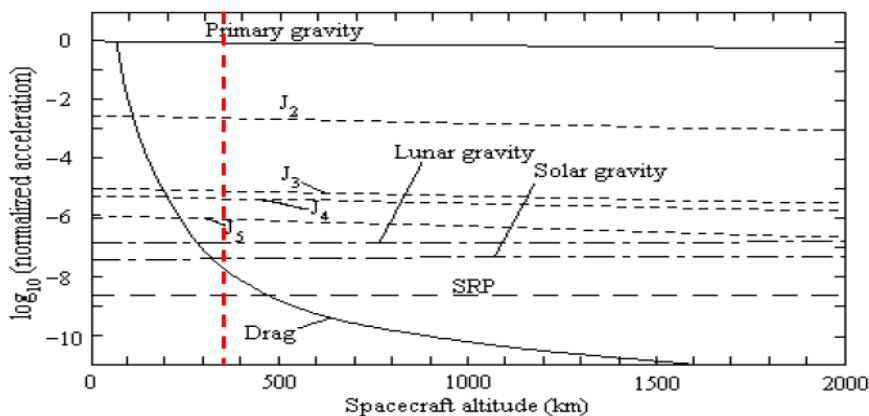


الشكل(3): منحنيات الكثافة الجوية عند نشاطات إشعاع شمسي مختلف [12].

يكتسب الانجراف الأيروديناميكي أهمية متزايدة عندما يكون ارتفاع القمر الصناعي المكعب منخفض وذلك بسبب الكثافة الجوية المرتفعة التي تسبب بدورها زيادة في قيمة الانجراف الأيروديناميكي.

إن اختيار معامل الانجراف  $C_D$  لا يعتمد فقط على شكل القمر الصناعي المكعب وأبعاده وإنما يعتمد على التركيب الجوي ودرجة حرارة الجسيمات التي تتفاعل مع سطحه ونظام التدفق الجوي، بالإضافة إلى عوامل أخرى تؤثر على معامل الانجراف الأيروديناميكي، مثل سرعة القمر في المدار وانزياحه بالنسبة لخط الاستواء، ولكن أهميتها على الأكثر 1% [13]. يبيّن الشكل (4) علاقة لوغاريتم التسارع المعياري ( $\log(acc)$ ) بدلالة ارتفاع القمر الصناعي المكعب والذي يمكن عن طريقه الحصول على قيمة معامل الانجراف الأيروديناميكي، جاذبية الشمس والقمر، وضغط الإشعاع الشمسي (SRP) ومعاملات انحلال الأرض ( $J_2/J_3/J_4/J_5$ ) التي هي قوى ناتجة عن دوران الأرض، حيث يحسب معامل الانجراف الأيروديناميكي وفق العلاقة التجريبية التالية [13]:

$$C_D = \log(acc) + 0.01 \quad (3)$$



الشكل(4): منحنى معامل الانجراف الأيروديناميكي عند ارتفاعات مختلفة [13].

## 2-2 عزم الضغط الشمسي Solar Pressure Torque

ينتج هذا العزم عن انعكاس ضوء الشمس الممتص من قبل سطوح القمر الصناعي المكعب وقيمة هذا العزم تابعة لهندسة القمر الصناعي المكعب بالإضافة إلى الخصائص البصرية لسطحه كالتفافية والانعكاس [14]. يتولد عزم الضغط الشمسي بنفس طريقة توليد العزم في الانجراف الأيروديناميكي ويعطى هذا العزم بالعلاقة التالية [14]:

$$T_{sol} = r_{CoP} \cdot F_{sol} \quad (4)$$

حيث

$$F_{sol} = \frac{I_s \cdot S(1+K)}{c} \quad (5)$$

والثابت الشمسي  $I_s \cong 1367 \text{ W/m}^2$ ، حيث تعتبر هذه القيمة تقريبية من أجل المدارات المنخفضة وذلك بسبب البعد الكبير للشمس عن تلك المدارات و  $S$  المساحة الأمامية للقمر الصناعي المكعب و  $K$  متغير تتعلق قيمته بالانعكاس، حيث  $0 < K < 1$ ،  $c$  سرعة الضوء في الخلاء أما  $(r_{CoP})^\dagger$  فهي المسافة بين مركز كتلة القمر الصناعي المكعب والمركز البصري للضغط [10]، [15].

## 2-3 العزم المغناطيسي Magnetic torque

ينتج العزم المغناطيسي من تفاعل الحقل المغناطيسي الأرضي  $B_E$  مع الحقل المغناطيسي المتولد عن ثنائي القطب المغناطيسي  $M_{sat}$  الموجود ضمن القمر الصناعي المكعب، مما يؤدي إلى تحريك القمر الصناعي ضمن مداره حيث، تعطى معادلة العزم المغناطيسي الناتج  $T_{mag}$  بالعلاقة [2]:

$$T_{mag} = M_{sat} \cdot B_E \quad (6)$$

إن قيمة الحقل المغناطيسي الأرضي متغيرة وتتعلق بموقع القمر الصناعي المكعب بالنسبة للأرض وارتفاعه، ويمكن حساب قيمته باستخدام مخططات الحقل المغناطيسي المرجعي العالمي (IGRF)<sup>‡</sup>، حيث تُنشر بشكل دوري كل عدة أعوام من قبل (IAGA)<sup>§</sup>، وتبلغ أعظم قيمة له عند القطبين، بينما أقل قيمه له عند خط الاستواء [2]، كما يمكن حساب قيمة الحقل المغناطيسي الأرضي بالعلاقة التالية [2]:

$$B = \frac{M}{R^3} \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \sin^2 \lambda_m} = \frac{B_0 \cdot R_E^3}{R^3} \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \sin^2 \lambda_m} \quad (7)$$

حيث  $R_E$ : نصف قطر الأرض الاستوائي،  $B_0$  شدة الحقل المغناطيسي الأرضي الاستوائي عند مستوى سطح البحر،  $M = B_0 \cdot R_E^3$  العزم المغناطيسي الأرضي،  $\lambda_m$  خط العرض المغناطيسي،  $R$  ارتفاع القمر الصناعي المكعب عن مركز الأرض.

إن قيمة العزم المغناطيسي تحسب بعد إيجاد قيم جميع عزوم القوى الخارجية المؤثرة على القمر الصناعي، حيث يراعى أثناء تصميم القمر الصناعي المكعب بأن تكون قيمة هذا العزم مساوية ضعفي عزوم القوى الخارجية كي يبقى القمر الصناعي المكعب مستقرًا ضمن حدود مداره [16].

<sup>†</sup> مركز الضغط الشمسي Center of pressure.

<sup>‡</sup> الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي International Geomagnetic Reference Field.

<sup>§</sup> الرابطة الدولية للمغناطيسية الأرضية وعلم الطيران International Association of Geomagnetism and Aeronomy.

## 4-2 عزم تدرج الجاذبية الأرضية Gravity Gradient torque

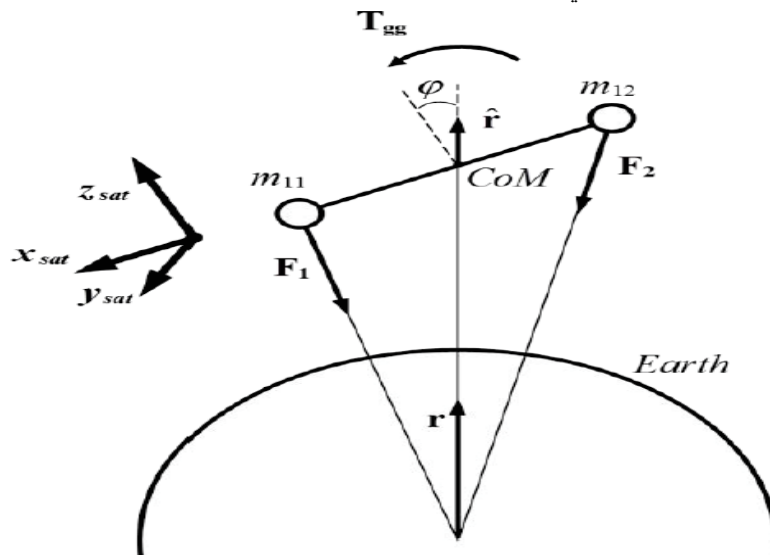
يتأثر القمر الصناعي أثناء حركته ضمن مداره بحقول الجاذبية التي يتعرض لها من قبل مكونات الفضاء الموجودة بجواره، كالشمس والقمر والأرض. وعندما يكون القمر الصناعي ضمن مدار منخفض يكاد يكون تأثير جاذبية كل من القمر والشمس مهملاً ويبقى تأثير حقل الجاذبية الأرضية والعزم الناتج عن هذه الجاذبية، ويعطى بالعلاقة [17]، [14]:

$$T_{gg} = \frac{3\mu}{r^3} \cdot c_3 \times I c_3 = 3\omega_0^2 \cdot c_3 \times I c_3 \quad (8)$$

حيث  $\mu = 3.986 \cdot 10^{14} m^2/s^2$  ويمثل معامل الجاذبية الأرضية،  $r$  المسافة بين القمر ومركز الكرة

الأرضية،  $I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}$  هي مصفوفة العطالة للقمر الصناعي المكعب التي تعبر عن مدى مقاومة الجسم

للحركة، حيث  $I_x, I_y, I_z$  أبعاد القمر،  $\omega_0$  السرعة الزاوية،  $c_3$  شعاع وحدة الموقع للقمر الصناعي المكعب مع ملاحظة أن  $c_3$  تقابلها  $\hat{r}$  في الشكل (5)، عزم الجاذبية الأرضية، CoM مركز كتلة القمر الصناعي،  $F_1$  و  $F_2$  قوة الجاذبية الأرضية،  $\varphi$  زاوية دوران القمر الصناعي.



الشكل(5): اتجاه عزم تدرج الجاذبية الأرضية [14].

## 3- البارامترات المدارية

يوجد العديد من البارامترات المدارية التي يجب التطرق إليها عند دراسة القوى والعزوم الخارجية المؤثرة على استقرار وحركة القمر الصناعي المكعب ضمن مداره، وهي مبينة في الجدول (2):

الجدول(2): العلاقات الرياضية للبارامترات المدارية الخاصة بالقمر الصناعي المكعب ودلالاتها

البارامتر	العلاقة الرياضية	دلالة العلاقة الرياضية
نصف قطر المدار [18]	$r = R_{earth} + H_{cube} \quad (9)$	بعد القمر الصناعي المكعب عن مركز الكرة الأرضية.



<p>الزمن اللازم لكي يتم القمر الصناعي المكعب دورة كاملة حول الأرض. ثابت الجاذبية العام <math>G = 6.670.10^{-11} N. m^2 / kg^2</math> كتلة الكرة الأرضية <math>M = 5.972 * 10^{24} kg</math> كتلة القمر الصناعي المكعب <math>m</math>.</p>	$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{\mu}} \quad (10)$ $\mu = G(M + m) \quad (11)$	<p>الزمن المداري [18]</p>
<p>زمن بقاء القمر الصناعي في المناطق التي تكون في الكرة الأرضية غير معرضة للشمس. <math>f_e = \frac{1}{180} \arccos\left(\frac{(h^2 + 2HR_{earth})^{0.5}}{(R_{earth} + H) \cos \beta}\right)</math> ارتفاع المدار، <math>\beta</math> الزاوية الكائنة بين مدار القمر الصناعي المكعب وشعاع الاشعاع الشمسي . <math>h = \frac{H + R_{earth}}{R_{earth}}</math></p>	$T_{eclipse} = T * f_e \quad (12)$	<p>زمن الظل [19]</p>
<p>السرعة التي يتحرك بها القمر الصناعي المكعب ضمن مداره.</p>	$v = \sqrt{\frac{G.M.m}{r}} \quad (13)$	<p>السرعة المدارية [20]</p>
<p>مقدار تغير زاوية الدوران للقمر الصناعي المكعب.</p>	$\omega_0 = \sqrt{\frac{\mu}{r^3}} \quad (14)$	<p>السرعة الزاوية [18]</p>

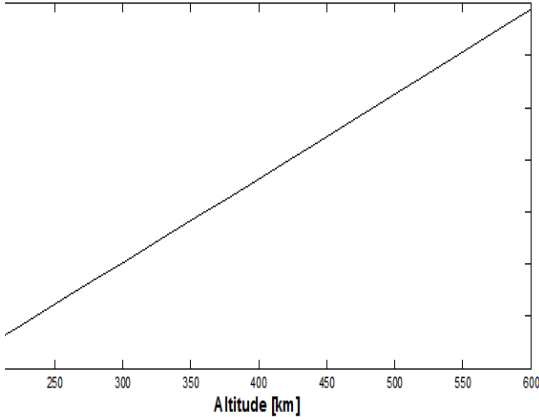
### النتائج والمناقشة:

لقد حصلنا في بحثنا هذا على قيم البارامترات المدارية بالاستعانة بالمعادلات الواردة في الجدول (2)، وذلك بعد حسابها من أجل قمر صناعي مكعب أبعاده  $10*10*10 \text{ cm}^3$  عند ارتفاعات منخفضة 200km، 400km و 600km، ووزن 1kg و 1.33kg، ومن ثم رسمنا المنحنيات البيانية الخاصة بكل بارامتر على المجال [200km- 600km]، كما هو مبين في الجداول والأشكال التالية:

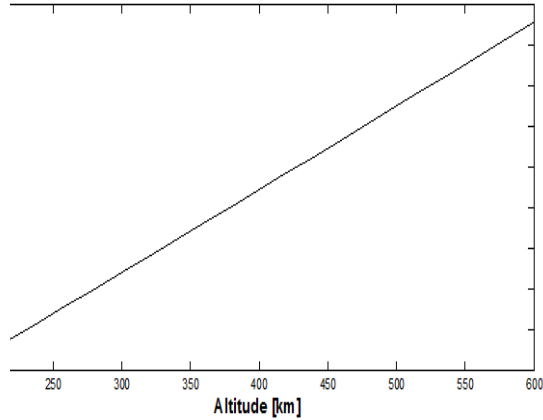
الجدول (3): قيم بعض البارامترات المدارية.

الارتفاع (km)	السرعة المدارية (Km/s)		السرعة الزاوية (Rad/s)		زمن المدار (Min)	زمن الظل (Min)
	Weight=1.33kg	Weight=1kg	Weight=1.33kg	Weight=1kg	Weight=1.33kg,1kg	Weight=1.33kg,1kg
200	8.97	7.78	$1.36 * 10^{-3}$	$1.18 * 10^{-3}$	88.37	34.72
400	8.84	7.67	$1.3 * 10^{-3}$	$1.13 * 10^{-3}$	92.44	36.32
600	8.71	7.55	$1.2 * 10^{-3}$	$1.08 * 10^{-3}$	96.57	37.94

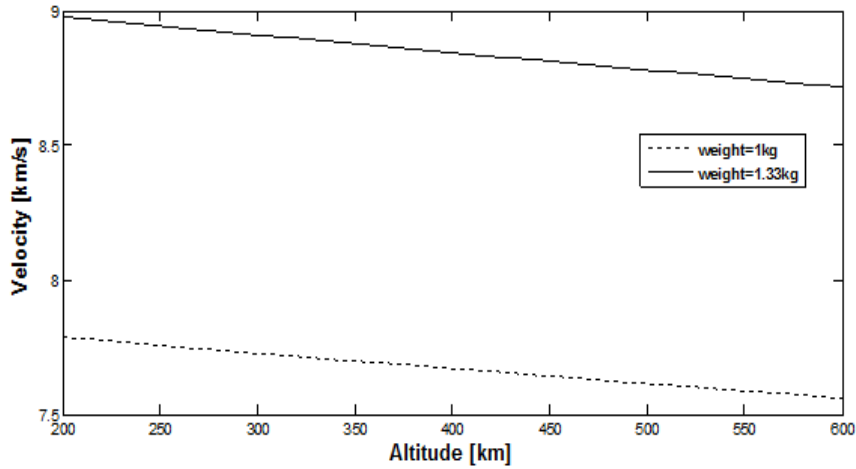
تبين النتائج التي حصلنا عليها أن زمن المدار وزمن الظل يزداد مع زيادة الارتفاع ولا يتأثر بزيادة وزن القمر الصناعي المكعب وذلك بسبب الوزن الصغير جداً للقمر الصناعي المكعب مقارنة مع كتلة الأرض، كما هو مبين في العلاقتين (10) و(12)، كما هو مبين في الشكلين (6) و(7). أما بالنسبة للسرعة الزاوية والسرعة المدارية فهما يتناقصان مع الارتفاع لأنهما يتناسبان عكسياً مع ارتفاع المدار، وتزداد هاتان السرعتان في حالة زيادة وزن القمر الصناعي المكعب، كما هو مبين في الشكلين (8) و(9) على التوالي.



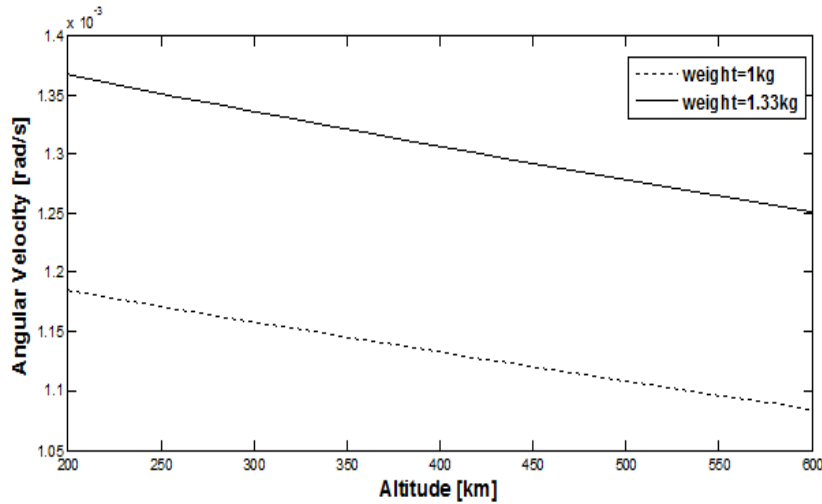
الشكل(7): منحنى زمن الظل بدلالة ارتفاع المدار.



الشكل(6): منحنى زمن المدار بدلالة ارتفاع المدار.



الشكل(8): منحنى السرعة المدارية بدلالة ارتفاع المدار.



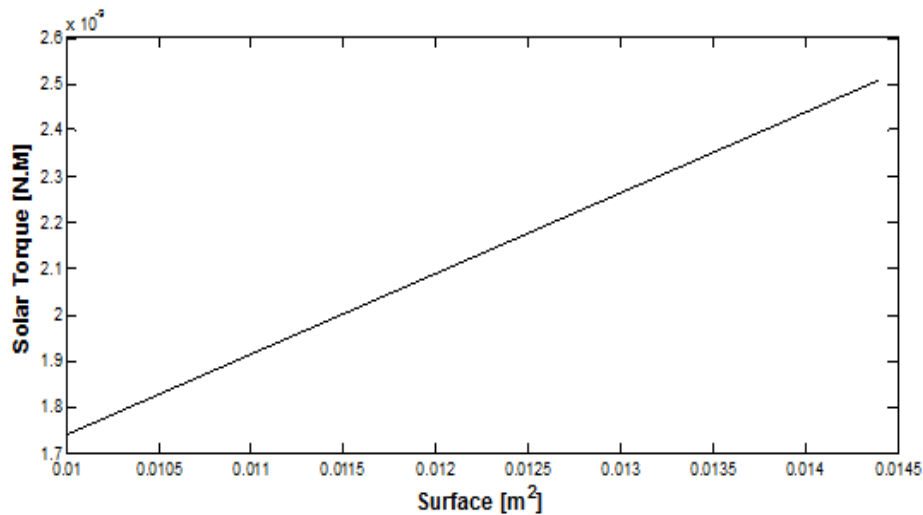
الشكل(9): منحنى السرعة الزاوية بدلالة ارتفاع المدار.

أما بالنسبة لعزوم القوى المؤثرة على القمر الصناعي المكعب فقد تم إيجاد قيمها بالاعتماد على العلاقات(2)،(4)،(6) و (8) وذلك عند الارتفاعات 200km ، 400km و 600km للمدار، ووزن 1kg و 1.33kg، وهي مبينة في الجدول(4)، ومن ثم تم رسم المنحنيات البيانية الخاصة بهذه العزوم في المجال [200km- 600km].

الجدول(4): قيم عزوم القوى عند ارتفاعات مختلفة.

الارتفاع (km)	Solar pressure (N.m)	Aerodynamic (N.m)		Gravity gradient (N.m)		Magnetic (N.m)	
		Weight=1.33kg	Weight=1kg	Weight=1.33kg	Weight=1kg	Weight=1.33kg	Weight=1kg
200	$1.45 * 10^{-9}$	$7.94 * 10^{-6}$	$5.97 * 10^{-6}$	$1.23 * 10^{-7}$	$9.2 * 10^{-8}$	$1.61 * 10^{-5}$	$1.21 * 10^{-5}$
400	$1.45 * 10^{-9}$	$2.76 * 10^{-7}$	$2.07 * 10^{-7}$	$1.12 * 10^{-7}$	$8.4 * 10^{-8}$	$7.81 * 10^{-7}$	$5.87 * 10^{-7}$
600	$1.45 * 10^{-9}$	$3.06 * 10^{-8}$	$2.3 * 10^{-8}$	$1.03 * 10^{-7}$	$7.7 * 10^{-8}$	$2.7 * 10^{-7}$	$2.04 * 10^{-7}$

نلاحظ من الجدول(4)، أن قيم العزوم تتناقص مع زيادة الارتفاع باستثناء عزم الضغط الشمسي الذي ظل ثابتاً مهماً كان ارتفاع المدار، لأنه لا يتعلق بالارتفاع وإنما يتعلق فقط بأبعاد القمر الصناعي المكعب(المساحة الأمامية)، كما هو مبين في الشكل(10)، لذلك تم إيجاد قيمة عزم الضغط الشمسي من أجل عدة أقمار صناعية مكعبة منتظمة أبعادها من رتبة 1U، ولاحظنا أنه مع زيادة أبعاد القمر الصناعي المكعب يزداد عزم الضغط الشمسي بشكل خطي، لأن عزم الضغط الشمسي يتناسب طردياً مع المساحة الأمامية، وفي حالة زيادة وزن القمر الصناعي المكعب إلى 1.33kg فإن قيمة هذا العزم لا تتعلق بالوزن، كما تُظهر العلاقة(5).

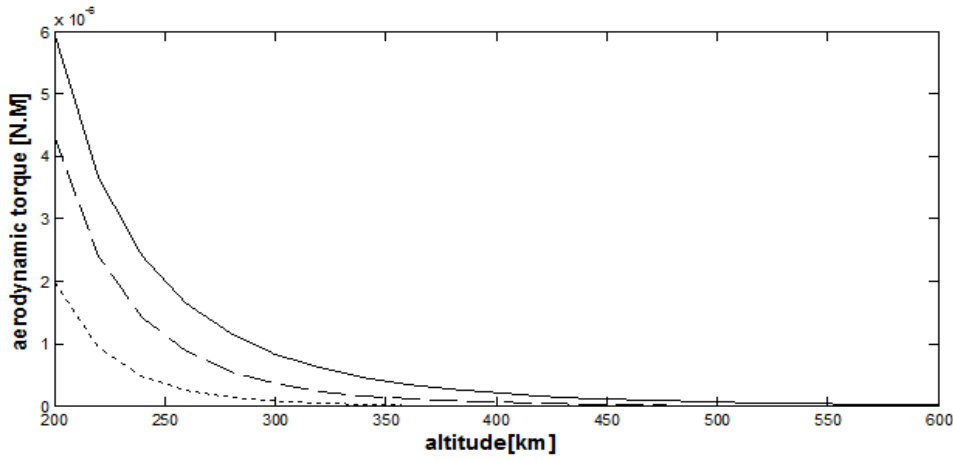


الشكل(10): منحنى عزم الضغط الشمسي بدلالة تغير مساحة سطح القمر الصناعي المكعب.

أما بالنسبة للعزم الأيروديناميكي كما هو مبين في الجدولين (5) و(6)، فهو يتأثر بارتفاع القمر الصناعي المكعب، أي كلما ازداد ارتفاع القمر الصناعي تتناقص قيمة العزم الأيروديناميكي، ولقد رسمنا بيانياً منحنيات العزم الأيروديناميكي في ثلاث حالات، وذلك تبعاً لحالات الكثافة الجوية الثلاث، أي عند نشاط إشعاع شمسي منخفض ومعتدل ومرتفع، حيث يبين الشكلان (11) و (12) أنه عند نشاط إشعاع شمسي مرتفع وتناقص في الارتفاع يزداد العزم الأيروديناميكي بشكل أسي. أما في حالة نشاط اشعاع شمسي معتدل تتناقص قيمة العزم الأيروديناميكي وكذلك الحال عند نشاط اشعاع شمسي منخفض تتناقص قيمة هذا العزم أيضاً، أما في حالة زيادة الوزن فتزداد قيمة العزم الأيروديناميكي.

الجدول(5): قيمة العزم الأيروديناميكي عند كثافات جوية مختلفة لقمر صناعي مكعب بوزن 1kg.

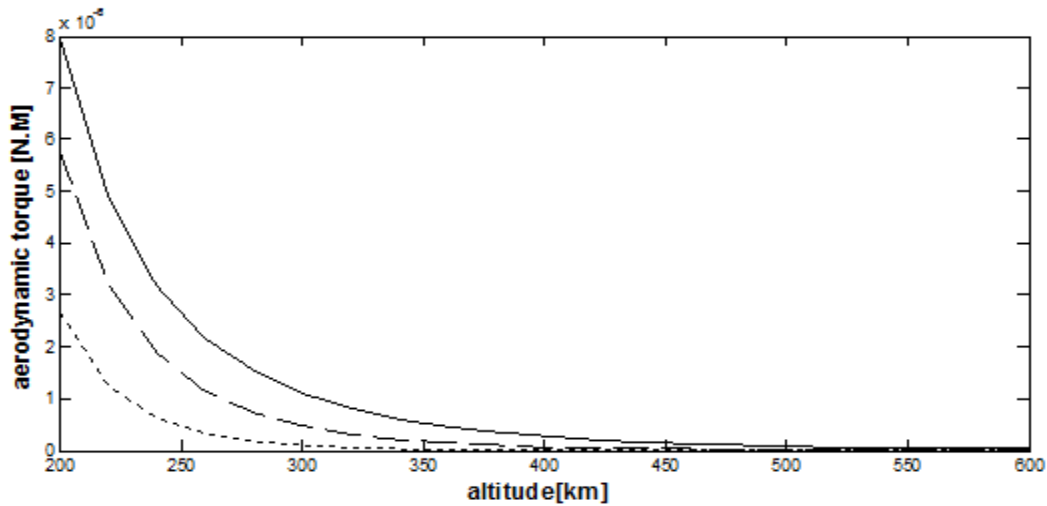
ارتفاع المدار (km)	العزم الأيروديناميكي عند كثافة جوية مرتفعة (N.m)	العزم الأيروديناميكي عند كثافة جوية معتدلة (N.m)	العزم الأيروديناميكي عند كثافة جوية منخفضة (N.m)
200	$5.97 * 10^{-6}$	$4.32 * 10^{-6}$	$2 * 10^{-6}$
300	$8.35 * 10^{-7}$	$3.61 * 10^{-7}$	$7.87 * 10^{-8}$
400	$2.07 * 10^{-7}$	$5.58 * 10^{-8}$	$6.12 * 10^{-9}$
500	$6.45 * 10^{-8}$	$1.12 * 10^{-8}$	$7.09 * 10^{-10}$
600	$2.3 * 10^{-8}$	$2.64 * 10^{-9}$	$1.46 * 10^{-10}$



الشكل(11): منحنيات العزم الأيروديناميكي بدلالة ارتفاع المدار وتغير الكثافة الجوية بوزن 1kg.

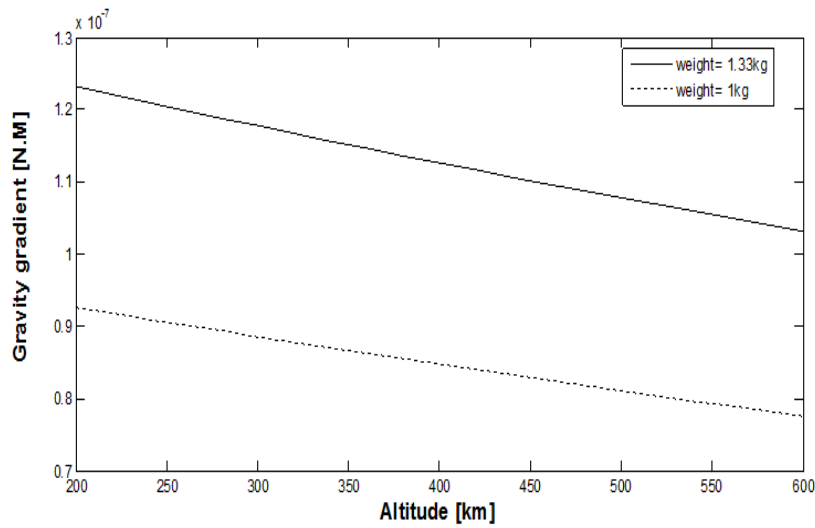
الجدول(6): قيمة العزم الأيروديناميكي عند كثافات جوية مختلفة لقمر صناعي مكعب بوزن 1.33kg.

ارتفاع المدار (km)	العزم الأيروديناميكي عند كثافة جوية مرتفعة (N.m)	العزم الأيروديناميكي عند كثافة جوية معتدلة (N.m)	العزم الأيروديناميكي عند كثافة جوية منخفضة (N.m)
200	$7.94 * 10^{-6}$	$5.75 * 10^{-6}$	$2.66 * 10^{-6}$
300	$1.11 * 10^{-6}$	$4.8 * 10^{-7}$	$1.04 * 10^{-7}$
400	$2.76 * 10^{-7}$	$7.42 * 10^{-8}$	$8.15 * 10^{-9}$
500	$8.58 * 10^{-8}$	$1.49 * 10^{-8}$	$9.4 * 10^{-10}$
600	$3.06 * 10^{-8}$	$3.52 * 10^{-9}$	$1.94 * 10^{-10}$



الشكل(12): منحنيات العزم الأيروديناميكي بدلالة ارتفاع المدار وتغير الكثافة الجوية بوزن 1.33kg.

أما بالنسبة لعزم تدرج الجاذبية الأرضية فقد تبين لدينا أنه مع زيادة ارتفاع المدار فإن هذا العزم يتناقص بشكل خطي وفقاً للشكل (13)، أما عند زيادة الوزن فإن قيمة هذا العزم تزداد كما هو مبين في الشكل (13) أيضاً.

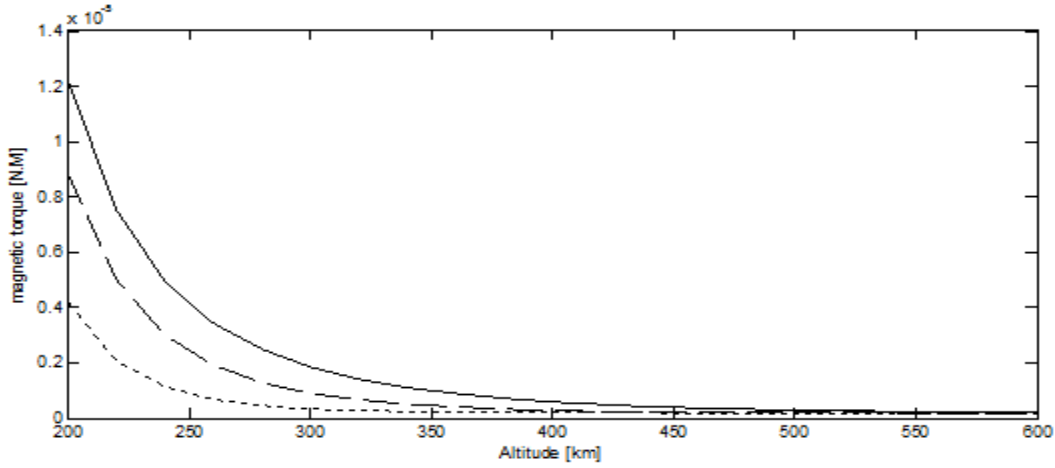


الشكل (13): منحني عزم تدرج الجاذبية الأرضية بدلالة ارتفاع المدار.

بعد أن حسبنا قيم كل من عزم الضغط الشمسي وعزم تدرج الجاذبية الأرضية والعزم الأيروديناميكي يمكننا حساب قيم العزم المغناطيسي المُولد داخل القمر الصناعي المكعب، وقيمته مبينة على الجدولين (7) و(8)، حيث رسمنا العزم المغناطيسي بدلالة الارتفاع وتغير الكثافة الجوية في حالاتها الثلاث، كما هو مبين في الشكلين (14) و(15)، واستنتجنا أن قيمة العزم المغناطيسي تكون أكبر في حالة نشاط إشعاع شمسي مرتفع من قيمته في حالة نشاط إشعاع شمسي معتدل ونشاط إشعاع شمسي منخفض، وفي الحالات الثلاث تتناقص قيمة هذا العزم بشكل أسّي مع زيادة الارتفاع، وفي حالة زيادة وزن القمر الصناعي المكعب يزداد العزم المغناطيسي مع زيادة الارتفاع.

الجدول (7): قيمة العزم المغناطيسي عند كثافات جوية مختلفة لقمر صناعي مكعب بوزن 1kg.

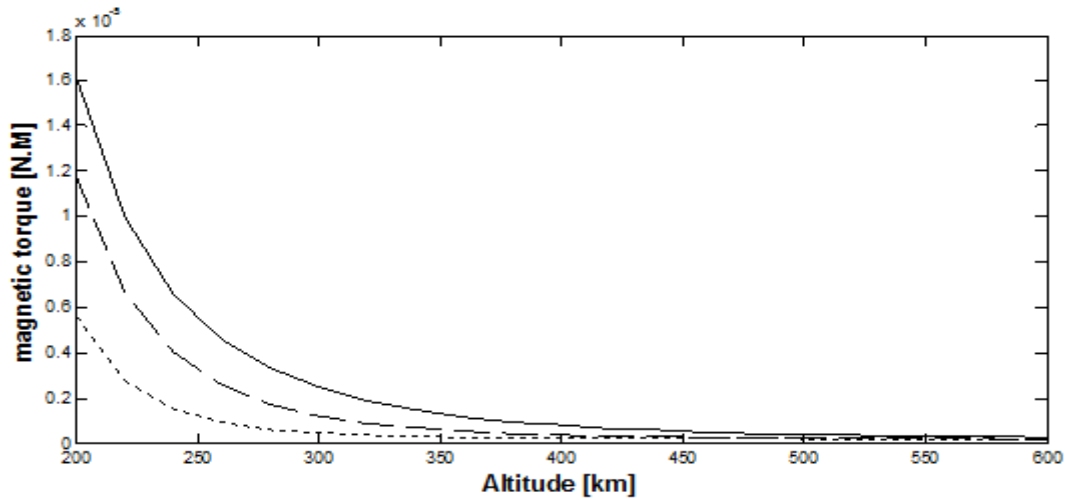
ارتفاع المدار (km)	العزم المغناطيسي عند كثافة جوية مرتفعة (N.m)	العزم المغناطيسي عند كثافة جوية معتدلة (N.m)	العزم المغناطيسي عند كثافة جوية منخفضة (N.m)
200	$1.21 * 10^{-5}$	$8.83 * 10^{-6}$	$4.19 * 10^{-6}$
300	$1.85 * 10^{-6}$	$9.02 * 10^{-7}$	$3.37 * 10^{-7}$
400	$5.87 * 10^{-7}$	$2.84 * 10^{-7}$	$1.84 * 10^{-7}$
500	$2.94 * 10^{-7}$	$1.87 * 10^{-7}$	$1.66 * 10^{-7}$
600	$2.04 * 10^{-5}$	$1.63 * 10^{-7}$	$1.58 * 10^{-7}$



الشكل(14): منحنى العزم المغناطيسي بدلالة ارتفاع المدار وتغير الكثافة الجوية عند وزن 1kg.

الجدول(8): قيمة العزم المغناطيسي عند كثافات جوية مختلفة لقمر صناعي مكعب بوزن 1.33kg.

ارتفاع المدار (km)	العزم المغناطيسي عند كثافة جوية مرتفعة (N.m)	العزم المغناطيسي عند كثافة جوية معتدلة (N.m)	العزم المغناطيسي عند كثافة جوية منخفضة (N.m)
200	$1.61 * 10^{-5}$	$1.17 * 10^{-5}$	$5.58 * 10^{-6}$
300	$2.46 * 10^{-6}$	$1.2 * 10^{-7}$	$4.47 * 10^{-7}$
400	$7.81 * 10^{-7}$	$3.76 * 10^{-7}$	$2.44 * 10^{-7}$
500	$3.9 * 10^{-7}$	$2.48 * 10^{-7}$	$2.2 * 10^{-7}$
600	$2.7 * 10^{-7}$	$2.16 * 10^{-7}$	$2.09 * 10^{-7}$



الشكل(15): منحنى العزم المغناطيسي بدلالة ارتفاع المدار وتغير الكثافة الجوية عند وزن 1.33 kg.

**الاستنتاجات والتوصيات:**

نستنتج من خلال دراستنا لتأثير القوى والعزوم الخارجية المؤثرة على قمر صناعي مكعب بحجم 1U أنه بزيادة ارتفاع مدار القمر الصناعي المكعب يزداد زمن المدار وزمن الظل، وتتناقص السرعة الزاوية والسرعة المدارية، بينما تتناقص قيم جميع عزوم القوى باستثناء قيمة عزم الضغط الشمسي الذي لا يتعلق بارتفاع المدار وإنما يتعلق بالمساحة الأمامية للقمر الصناعي المكعب، حيث أنه يزداد بزيادة تلك المساحة. عند زيادة وزن القمر الصناعي المكعب تزداد كلاً من السرعة الزاوية والسرعة المدارية كي يبقى زمن المدار وزمن الظل ثابتان، كما تزداد قيمة العزم المغناطيسي والعزم الأيروديناميكي وعزم تدرج الجاذبية الأرضية باستثناء عزم الضغط الشمسي لأن قيمته غير متعلقة بالوزن. استنتجنا أيضاً أن الكثافة الجوية المرتفعة تسبب زيادة في قيمة العزم الأيروديناميكي و قيمة العزم المغناطيسي، بينما ليس لها أي تأثير على عزم الضغط الشمسي ولا على عزم تدرج الجاذبية الأرضية.

**المقترحات المستقبلية**

نقترح دراسة النقاط التالية:

1. دراسة عزوم القوى المختلفة المؤثرة على القمر الصناعي المكعب على ارتفاعات متوسطة وعالية.
2. دراسة القوى الخارجية المؤثرة على أحجام مختلفة للقمر الصناعية المكعب أكبر من 1U.
3. دراسة بعض عزوم القوى الخارجية ذات القيم المهملة عند ارتفاعات وأوزان مختلفة للقمر الصناعي المكعب، مثل تأثير جاذبية القمر ووجود بعض الأقمار الصناعية بجوار القمر الصناعي المكعب المدروس.
4. دراسة تأثير العزوم على القمر الصناعي المكعب عند مدارات مختلفة الارتفاعات، حيث تشكل هذه الدراسة نقطة انطلاق لتحقيق نظام التحكم الخاص باستقرار القمر الصناعي المدروس، كما أنها تعطي مدلولات تدخل في عملية التصميم للمشغلات المسؤولة عن حركة القمر الصناعي المكعب والتي إما أن تكون عجلات ردة الفعل أو ملفات مغناطيسية.

**References:**

- [1]- KREJCID; SELVA,D. *A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation*. Acta Astronautica, vol.74 ,2012,50-68.
- [2]- AURET,J. *Design of an Aerodynamic Attitude Control System for a CubeSat*. University of Stellenbosch,2012.
- [3]- BRÅTHEN,G. *Design of Attitude Control System of a Double CubeSat*. Norwegian University of Science and Technology, January 25, 2013.
- [4]- GIEBELMANN,J. *Development of an Active Magnetic Attitude Determination and Control System for Picosatellites on highly inclined circular Low Earth Orbits*. RMIT University, June 2006.
- [5]- LI,J; Post,M; Wright,o; Lee,R. *Design of Attitude Control Systems for CubeSat-Class Nanosatellite*. Journal of Control Science and Engineering ,2013.
- [6]- GALLI,S. *Mission Design for the CubeSat OUFIT-1*. University of Liège,2008.
- [7]- TIKKA,T. *Attitude Determination and Control System Implementation for 3-Axis-Stabilized Nanosatellites*. Aalto University,2012.
- [8]- COJUANGCO,A. *orbital lifetime analyses of pico- and nano-satellites*. UNIVERSITY OF FLORIDA,2007.
- [9]- VIRDEE,H.S. *Radiation Pressure Torque and Computational AttitudeModelling of Space Debris*. University College London,2016.



- [10]- GAVRILOVICH,I. *Development of a robotic system for CubeSat Attitude Determination and Control System ground tests*. Montpellier, 2016.
- [11]- SELLERS,R. *a gravity gradient, momentum-biased attitude control system for a cubesat*. California Polytechnic State University, San Luis Obispo,2013.
- [12]- *COSPAR INTERNATIONAL REFERENCE ATMOSPHERE (CIRA-2012)*.
- [13]- FERNÁNDEZ,M.V. *Mission analysis of QB50, a nanosatellite intended to study the lower thermosphere*. University of Liège Faculty of Applied Sciences,2011.
- [14]- RAWASHDEH,S.A. *passive attitude stabilization for small satellites*. University of Kentucky,2010.
- [15]- IBRAHIM,S.A; YAMAGUCHI,E. *Comparison of Solar Radiation Torque and Power Generation of Deployable Solar Panel Configurations on Nanosatellites*. Aerospace, Vol.6, Issue 5,2019.
- [16]- FERRÉS, M.T.*Design and Implementation of an Attitude Determination and Control System for the AntelSat*. Ingeniería University ,2015.
- [17]- AMAN,M.N ;ARELHI ,R; KHAN ,N. *Studying the Effects of Disturbance Torques on a 2U CubeSat in Low Earth Orbits*. Journal of Physics: Conference Series,vol.1152, 2019.
- [18]- MEY,P.H. *Development of Attitude Controllers and Actuators for a Solar Sail Cubesat*. Stellenbosch University, March 2011.
- [19]- LAI,J.E. *Thermal Analysis for a High Precision Pointing Helios CubeSat*. San José State University,2015.
- [20]-BELOKONOVA,I; TIMBAI,I. *The selection of the design parameters of the aerodynamically stabilized nanosatellite of the CubeSat standard*. Procedia Engineering, vol.104 , 2015 ,88 – 96.