د. خالد بن عبداللطيف السيف

هل تساءلت يوما كيف تدور الأقمار الاصطناعية حول الأرض ولا تسقط عليها ؟ وكيف تحافظ على مسارها عبر السنين ؟ يهدف هذا المقال إلى الإجابة على هذه الأسئلة ، حيث سيتطرق إلى المدارات التي تسير عليها الأقمار الاصطناعية واتجاهاتها والقوى التي تتحكم في سيرها وغيرها من المواضيع ذات العلاقة.

تسلك الأقمار الاصطناعية خلال حركتها حول الأرض مسارات تسمى بالمدارات ، أما العلم الذي يصف مدارات الأقمار فيطلق عليه حركية المدارات (Orbital Dynamics)، ويصف هذا العلم أيضاً حركة الكواكب حول الشمس والأقمار حول كواكبها.

قوانين الحركة

تتحرك الأقمار الاصطناعية حول مداراتها وفق قوانين أودعها الخالق جلت قدرته في هذا الكون، وتم اكتشافها منذ القرن السابع عشر بناءً على مشاهدات حركة الكواكب السيارة حول الشمس. يمكن من خلال هذه القوانين التنبؤ بموقع القمر وسرعته المدارية بعد وقت قصير من إطلاقه بناء على حل ما يسمى بمعادلات الحركة بين القمر الاصطناعي والأرض ، ومعرفة الحالة الأولية أو البدائية للقمر عند الإطلاق (Initial Conditions).

ورغم أن حركة الأقمار الاصطناعية حول الأرض تعتمد على القوانين المذكورة إلا أن هناك مؤثرات محيطة بالقمر الاصطناعي (الشمس ، القمر الطبيعي ، شكل كروية الأرض والضغط المؤثر على هيكل القمر نتيجة الرياح الشمسية) تؤدي إلى انحراف مساره عن المسار الناتج (المحدد)من حل معادلات الحركة.

تمكن كل من العالمين **كيبلر ونيوتن** بعد دراسات مستفيضة ومشاهدات لفترات طويلة من صياغة عدة قوانين تفسر حركة الأجرام السماوية والأقمار الاصطناعية حول بعضها، وفيما يلي استعراض لتلك القوانين .

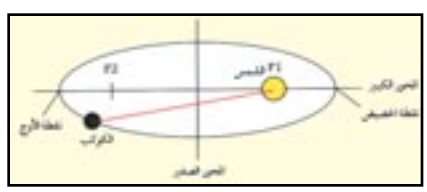
• قوانين كيبلر

تمكن عالم الفيزياء والفلك **جوهانز كيبلر** خلال دراسة متعمقة لحركة الكواكب حول الشمس ـ وبدعم من ملاحظات أستاذه **تايكو براهي** (١٥٤٦-١٦٠١م)، ومعتمداً على قياساته التي أجراها بنفسه ـ من وضع قوانين تصف حركة الكواكب السيارة حول الشمس، وذلك في الفترة (١٦٠٩-١٦١٩م) ، وهي كما يلي:

* **القانون الأول:** وينص على "أن الكواكب تدور حول الشمس في مدارات بيضاوية (إهليجية) ـ حول محور كبير وآخر صغير ـ بحيث تكون الشمس في إحدى بؤرتي المدار(F_1,F_2) "، كما هو موضح في الشكل (١). وتعرف نقطة الحضيض بأنها أقرب نقطة في المدار إلى مركز الشمس ونقطة الأوج بأبعد نقطة في المدار عن مركز الشمس.

* **القانون الثاني:** وينص على "أنه عند دوران الكوكب حول الشمس فإن الخط الذي يصل الكوكب بالشمس يمسح مساحات متساوية في أوقات متساوية "، كما هو موضح في الشكل (٢). بمعنى أن سرعة الكوكب تزداد عند اقترابه من الشمس حتى تصل إلى أعلى سرعة عند نقطة الحضيض، ثم تقل إذا ابتعد عنها حتى تصل إلى أقل قيمة لها عند نقطة الأوج.

* **القانون الثالث:** وقد تم اكتشافه بعد مضي عشر سنوات تقريباً من القانون الأول والثاني ، وينص على أن " مربع زمن دورة الكوكب حول الشمس تتناسب طردياً مع مكعب نصف المحور الكبير الذي يرمز له (a)، ومتوسط المسافة بين الكوكب والشمس " .

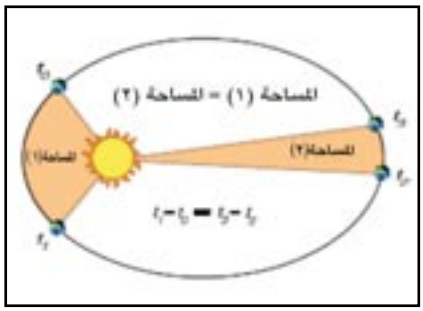


• شكل (١) المدار الإهليجي للكوكب

• قوانين نيوتن للجاذبية والحركة

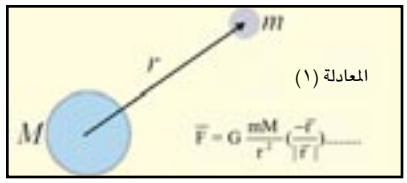
تمكن العالم الإنجليزي **إسحق نيوتن** (١٦٤٢-١٧٢٧م) من صياغة قانون الجاذبية وثلاثة قوانين تفسر حركة الأجسام وسرعتها، عرفت باسم قوانين نيوتن للحركة، وهي :

* **قانون الجاذبية:** ويعتمد على قوانين **كيبلر** ـ خصوصاً القانون الثالث ـ كأساس في طرحه، وينص قانون **نيوتن** للجاذبية على أن " قوة التجاذب بين أي جسمين تتناسب عكسياً مع مربع المسافة بين مركزيهما وطردياً مع كتلة كل منهما " ،



• شكل (٢) تساوي المساحات التي يمسحها القمر بتساوي مدة المسح

وبصيغة رياضية يمكن حساب هذه القوة (F) كما يلي:



حيث:

- (M) كتلة الأرض = ٥,٩٧٤×١٠^{٢٤} كجم
- (G) ثابت الجاذبية العام = ٦,٦٧×١٠$^{-١١}$ نيوتن .متر/كجم٢
- (r) المسافة بين منتصف قطر الأرض ومنتصف قطر القمر .

*** قوانين الحركة:** وهي ثلاثة قوانين تصف العلاقة بين حركة الجسم والقوي المؤثرة عليه، وهي:

– القانون الأول (قانون الاستمرارية): وينص على أن "الجسم الساكن والمتحرك في خط مستقيم يبقى علي حالته إذا لم يؤثر عليه بقوة خارجية" بمعني أن السرعة في حالة (الجسم المتحرك) سوف تكون ثابتة إذا لم يكن هناك قوى مؤثرة.

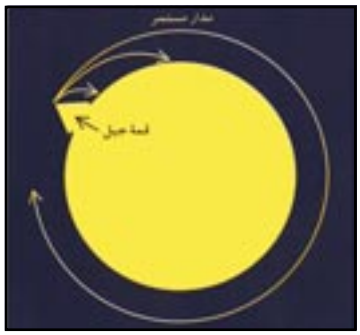
– القانون الثاني: وينص على أنه: "إذا أثرت قوة على جسم ما فإنه سوف يتسارع بقيمة تتناسب مع القوة المؤثرة وفي نفس الاتجاه" ، ويمكن تمثيلها بالصيغة الرياضية التالية :

المعادلة (٢)
$$\vec{F} = m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

– القانون الثالث، و ينص على أن "لكل فعل رد فعل مساوي له في المقدار ومعاكس له في الاتجاه".

السرعة المدارية

عند الوقوف على قمة جبل وقذف كرة بشكل أفقي وبسرعة معينة فإنها سوف تتسارع إلى الارض – حسب قانون **نيوتن** الثاني – (سقوط حر) وتأخذ مساراً مقوساً بعد مسافة أفقية معينة تعتمد على سرعتها الابتدائية عند قذفها .



● **شكل (٣) مسارات الكرة عند سرعات ابتدائية مختلفة**

يوضح الشكل (٣) مسارات الكرة عند سرعات ابتدائية مختلفة.

ومن الملاحظ أنه عندما تنطلق الكرة بسرعة عالية جداً بحيث تتساوى عندها قوة الطرد المركزي مع قوة الجاذبية الأرضية فإنها لاترتطم بالأرض بل تسلك مداراً دائرياً حول الأرض.

وبناء على هذه الظاهرة وجد العلماء أنه يمكن للقمر الاصطناعي الدوران حول الأرض إذا أطلق بسرعة ٨كم/ثانية (٢٨,٨٠٠كم/ساعة) قريباً من سطح الأرض، ويحتاج إلي سرعة أقل من ٥,٥ كم/ ثانية إذا أطلق على ارتفاع ٨١٣٦ كم فوق سطح الأرض. ويعني ذلك: أن السرعة المدارية تتناقص كلما ابتعدنا عن سطح الأرض (جاذبية الأرض). ويمكن حساب سرعة القمر المدارية كمايلي:

سرعة القمر الاصطناعي في المدار الدئري = $\sqrt{\frac{GM}{r}}$

سرعة القمر الاصطناعي في المدار الإهليجي = $\sqrt{\frac{2GM}{r} - \frac{GM}{a}}$

حيث "r" المسافة بين القمر الاصطناعي ومركز الكرة الأرضية. فمثلاً يمكن حساب "r" لمدار يبلغ إرتفاعه ٦٠٠ كلم كالتالي:

r= ٦٠٠كلم + نصف قطر الكرة الأرضية

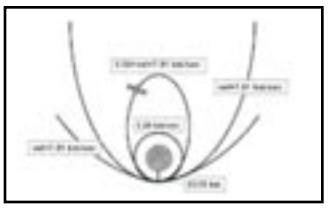
= ٦٣٧٨+٦٠٠ = ٦٩٧٨ كلم

GM = ٣٩٨٦٠٠

يوضح الجدول التالي سرعة القمر في مدار دائري عند ارتفاعات مختلفة:

الارتفاع	السرعة
٦٠٠ كلم	$\sqrt{\frac{٣٩٨,٦٠٠}{٦,٩٧٨}}$ = ٧,٥٥ كلم/ث
١٠,٠٠٠ كلم	$\sqrt{\frac{٣٩٨,٦٠٠}{١٦,٣٧٨}}$ = ٧,٥٥ كلم/ث
٢٠,٠٠٠ كلم	$\sqrt{\frac{٣٩٨,٦٠٠}{٢٦,٣٧٨}}$ = ٣,٨٨ كلم /ث

وفي حالة زيادة السرعة عن السرعة الدائرية يتحول المدار إلى مدار بيضاوي (إهليجي)، شكل(٤)، بحيث تزداد فلطحة هذا المدار كلما زادت السرعة ، حتى يفلت القمر من جاذبية الأرض عند سرعة تسمى بسرعة الإفلات (Escape Velocity)، ويسلك القمر الاصطناعي مساراً بشكل قطع مكافئ ويبتعد عن جاذبية الأرض.



● **شكل (٤) مسارات القمر عند سرعات مختلفة**

ويتناقص ارتفاع القمر نتيجة الاحتكاك مع الجزيئات الموجودة في مداره، وقد يرتطم بالأرض بعد مدة من الزمن إذا لم يحترق كاملاً خلال اختراق الغلاف الجوي.

حركة القمر الاصطناعي حول الأرض

تعتمد حركة القمر الاصطناعي حول الأرض على قانون **نيوتن** الثاني وقانون **نيوتن** للجاذبية . فمثلاً لإيجاد معادلة تبين حركة قمر اصطناعي كتلته (m) حول الأرض كتلتها (M)، ومن ثم معرفة شكل المدار حول الأرض عن طريق حل المعادلة . وبذلك يكفي للتنبوء بمسار القمر (لفترات زمنية قصيرة) معرفة حالته الابتدائية، وبعدها تصبح حركة القمر معلومة كنتيجة لحل معادلات الحركة.

بتعويض قوة الجاذبية ـ معادلة (١) ـ في قانون **نيوتن** الثاني للحركة ـ معادلة (٢) ـ يمكن الحصول على المعادلة التالية لمتجه التسارع للقمر الاصطناعي:

$$m\frac{d\bar{r}^2}{dt^2}=G\frac{mM}{r^2}\left(\frac{-\bar{r}}{|\bar{r}|}\right)$$

المعادلة (٣)

$$\frac{d\bar{r}^2}{dt^2}+\frac{GM\ \bar{r}}{r^3}=0$$

تسمى هذه المعادلة بمعادلة حركة الجسمين (Equation of two body motion) وهي مبنية على الفرضيات التالية :

١ـ إهمال تأثير الأجسام المحيطة بالأرض والقمر الاصطناعي (مثال القمر الطبيعي ، الشمس. . الخ).

٢ـ إهمال كتلة القمر الاصطناعي بالمقارنة مع كتلة الأرض.

٣– أن قوة الجاذبية هي القوة المؤثرة الوحيدة بين القمر الاصطناعي والأرض.

٤– عدم احتساب فلطحة الأرض عند الأقطاب (الأرض ليست كروية تماماً).

بعد إجراء بعض العمليات الرياضية لمعادلة الحركة يمكن التوصل للحل النهائي كما يلي:

$$r=\frac{p}{1+e\cos(\theta)}$$

حيث إن :

– Θ تمثل الزاوية القطبية التي تحدد موقع القمر في مداره.

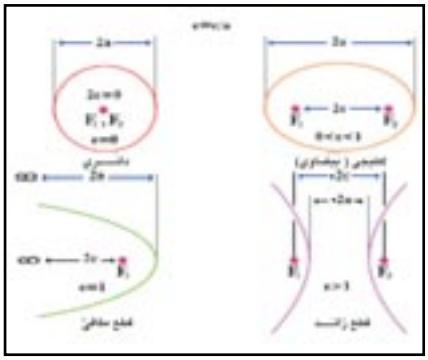
– (e) تمثل مقدار الانحراف (Eccentricity) .

–(p) ثابت المدار .

ويصف هذا الحل أحد القطوع المخروطية المعروفة كما هو موضح في شكل (٥).

وبذلك يكون مدار القمر الاصطناعي حول الأرض كما يلي:

ـ دائرياً (circular) : إذا كان مقدار الانحراف (e) يساوي صفر، وقطره يساوي (r = p).



● شكل (٥)القطوع المخروطية

ـ بيضاوياً (ellipse) : إذا كان الانحراف بين صفر وواحد (0 < e <1).

ـ قطاع مكافئ (parabola) في حالة (e=1).

ـ قطع زائد (hyperbola) في حالة (e >1).

الجدير بالذكر أن هذا الحل تقريبي، ولكن تزداد دقته كلما أخذنا بعين الاعتبار تأثير القوى المحيطة بالجسمين كما تقدم ذكره .

عناصر المدار

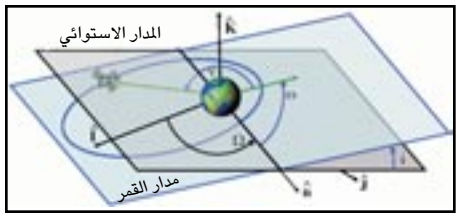
لتحديد وضع وشكل المدار الأهليجي (البيضاوي) في الفضاء لابد من معرفة عناصر المدار التقليدية ومتغيرات المدار الأهليجي، وهي ستة عناصر كما يوضحها شكل(٦).

● زاوية العقدة الصاعدة

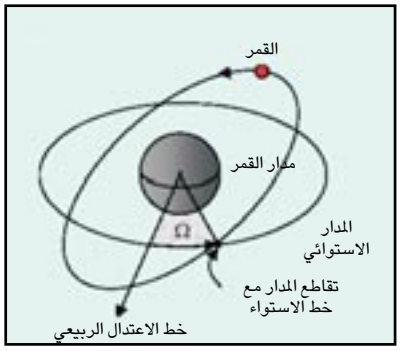
تعرف زاوية العقدة الصاعدة (Ω) (Right ascension of the ascending node) بأنها: الزاوية المحصورة بين خط الاعتدال الربيعي (Vernal equinox) ، والخط الناتج من تقاطع مستوى المدار مع خط الاستواء (line of nodes).

زاوية الحضيض

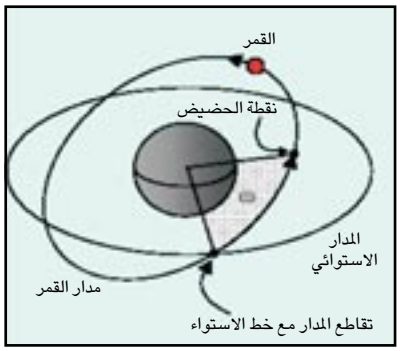
تعرف زاوية الحضيض (ω) (Argument of perigee): بأنها الزاوية المحصورة بين خط الاستواء



● شكل (٦) عناصر المدار



● شكل (٧) زاوية العقدة الصاعدة



● شكل (٨) زاوية الحضيض

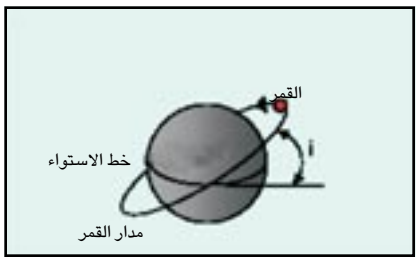
(line of nodes) ونقطة الحضيض كما هو مبين في الشكل (٨).

زاوية ميلان المدار

تقاس زاوية ميلان المدار (*i*) (Orbital inclination) من خط الاستواء إلى مستوى المدار، ويسمى المدار مدار قطبياً إذا كانت زاوية ميلان المدار ٩٠° الشكل (٩).

مقدار الانحراف

يحدد مقدار الانحراف

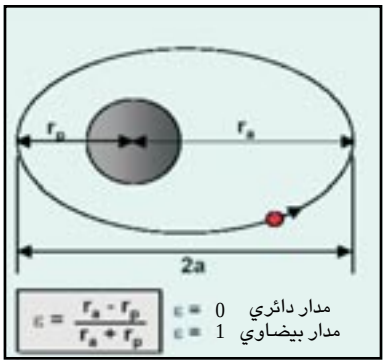


● شكل (٩) زاوية ميلان المدار

(Orbit eccentricity - e) ـ اللامركزية ـ الذي يتغير حسب قيمة اللامركزية (e) حسب ما هو موضح في الجدول (١). ولشكل (١٠)

مدار دائري	e = 0
مدار قطع ناقص (بيضاوي)	0 < e < 1
مدار قطع مكافي	e = 1
مدار قطع زائد	e > 1

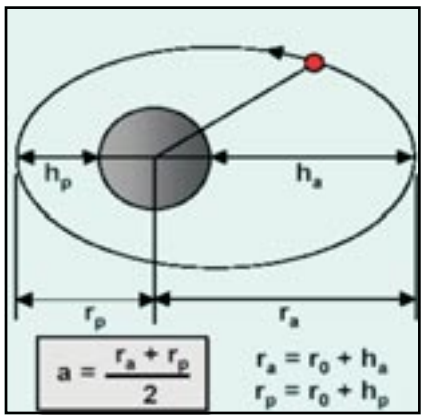
● جدول (١) تغير المدار باختلاف اللامركزية



● شكل (١٠) مقدار الانحراف

المحور شبه الأساس

يحدد المحور شبه الأساس (Semi major axis) حجم المدار، ويمثل نصف المسافة للمحور الأساس أو الأكبر شكل (١١) ، وفي حالة المدار الدائري يمثل

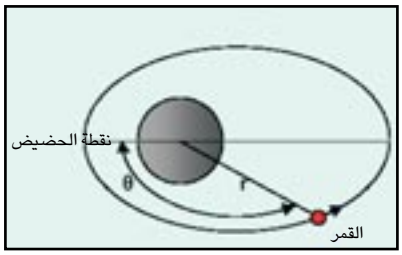


● شكل (١١) المدار شبه الأساس

هذا العنصر نصف قطر المدار.

زاوية الابتعاد المداري

زاوية الابتعاد المداري (true anomaly): هي الزاوية المحصورة بين نقطة الحضيض وموقع القمر في المدار، كما هو مبين في الشكل (١٢).



● شكل (١٢) زاوية الابتعاد المداري

تأثير الكواكب على مدار القمر الاصطناعي

تؤثر الكواكب المحيطة بالقمر الاصطناعي على حركته في مداره ، فثلاً تسبب قوى الجاذبية للشمس والقمر الطبيعي تغيرات دورية على عناصر مدار القمر الاصطناعي حول الأرض مثل ارتفاع المدار (H)، وزاوية الميلان (i) ، ومقدرار الانحراف (e)، كما تسبب تغيرات تصاعدية (Secular) في زاوية الحضيض (ω)، وزاوية العقدة الصاعدة(Ω) .

وتعد التغيرات التصاعدية الناشئة من تأثير الشمس والقمر ذات أهمية أكبر بالمقارنة بالمتغيرات الدورية ، ففي حالة المدار الدائري ، يمكن حساب معدل التغيير في زاوية العقدة الصاعدة (Ω).وزاوية الحضيض (ω) الناتجة من تأثير الشمس والقمر على النحو التالي:

$$\Omega_{moon} = -.00338\frac{\cos(i)}{n}$$

$$\Omega_{sun} = -0.00154\frac{\cos(i)}{n}$$

$$\omega_{moon} = -.00169\frac{4-5\sin(2i)}{n}$$

$$\omega_{sun} = -.00077\frac{4-5\sin(2i)}{n}$$

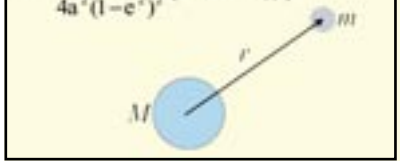
حيث تمثل (n) عدد دورات القمر الاصطناعي حول الأرض في اليوم الواحد .

تأثير الفلطحة على مسار القمر

عندما استنتجت معادلة الجسمين (Two body Problem) لم يؤخذ في عين الاعتبار فلطحة الأرض عند الأقطاب بل اعتبر أن الأرض كروية بشكل تام وذلك نتيجة لدوران الأرض حول محورها، وأن كتلتها موزعة بشكل منتظم ، وفي الحقيقة: إن فلطحة الأرض تسبب تغيرات تصاعدية في زاوية الحضيض (ω) وزاوية العقدة الصاعدة (Ω) حسب المعادلات التالية (تقريبية).

$$\omega = \frac{3J_2 nR_e^2}{2a^2(1-e^2)^2}\cos(i) \qquad \text{المعادلة (٤)}$$

$$\omega = \frac{-3J_2 nR_e^2}{4a^2(1-e^2)^2}(4-5\sin^2(i))$$



حيث : J_2 = معامل التفلطح ،
e = قدار الانحراف ، i = زاوية الميل ،
Re = نصف قطر الأرض.

لذلك في حالة الأقمار المنخفضة الارتفاع (قريبة من جاذبية الأرض) يجب حساب قيمة هذه المتغيرات، حيث يستفاد في تصميم مدار متزامن مع الشمس، وذلك باختيار ارتفاع المدار مع قيمة معينة لزاوية ميله بحيث تتغير قيمة (Ω) بمعدل ٠,٩٨٥ درجة في اليوم، وينتج عن ذلك تزامن دوران المدار مع دوران الأرض حول الشمس.

أنواع المدارات وتطبيقاتها

يوجد العديد من المدارات، ولذلك يتم اختيار مدار القمر الاصطناعي بناء على أهداف ومتطلبات المهمة، فمثلاً يستخدم المدار القطبي (زاوية ميله تساوي ٩٠ درجة من خط الاستواء) عند الحاجة إلى التغطية الكاملة للكرة الأرضية ما عدا القطبين ، وفيما يلي وصف لبعض أنواع المدارات الدارجة في مجال الأقمار الاصطناعية.

المدار المتزامن مع الشمس

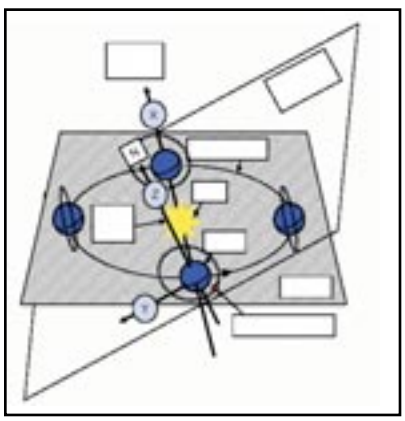
يحتفظ المدار المتزامن مع الشمس (Sun Synchronous Orbit) بزاوية ثابتة بينه وبين متجه الشمس (الخط الواصل بين الشمس والأرض) ، وذلك عن طريق اختيار ارتفاع المدار وزاوية ميلانه، بحيث يتزامن دوران الأرض حول الشمس مع دوران أو زحف مستوى المدار حول محور دوران الأرض (حوالي ٠,٩٨٥ درجة لكل يوم أو ٣٦٠ درجة في السنة) كما هو موضح في الشكل (١٣).

يقطع القمر الاصطناعي ـ في هذا المدار ـ خط الاستواء عند وقت محدد في كل دورة، ويمكن تحديد هذا الوقت عند عملية إطلاق القمر ووضعه في مداره ، فهو يغطي المنطقة المطلوبة في أوقات معينة تتكرر كل يوم.

يستفاد من هذا النوع من المدارات في تطبيقات الاستشعار عند بعد ، وفي حالة الحاجة للتصوير عند شدة إضاءة متقاربة لموقع معين على سطح الأرض، بالإضافة إلي أن هذا النوع من المدارات يجعل عملية الاتصال بالقمر من المحطة الأرضية مرتبطة بأوقات محددة، مما يساعد على وضع جدول زمني لفريق تشغيل القمر في المحطة الأرضية.

• مدار مولنيا

تبنى الاتحاد السوفيتي سابقاً تصميم مدار مولنيا (Molnya Orbit) في عام ١٩٦٥م مع أول مركبة فضائية بمسمى البرق (Molniya). يمتاز المدار بشكل بيضاوي (إهليجي) وبدرجة انحراف حولي ٠,٧٥ بحيث تصل المسافة بين أبعد نقطة عن سطح الأرض إلى ٣٩,٠٠٠ كم فوق الجزء الشمالي من الكرة الأرضية، وفي المقابل تتراوح أقرب نقطة للأرض ما بين ٢٠٠ إلى ١٠٠٠كم في الجهة



• شكل (١٣) المدار المتزامن مع الشمس

• شكل (١٤) مدار مولنيا

الجنوبية من الأرض. يستغرق القمر ١٢ ساعة ليكمل دورة كاملة حول الأرض ، ويوضح الشكل (١٤) مدار مولنيا حول الكرة الأرضية.

يقضي القمر في مدار مولنيا معظم الوقت في الجزء الشمالي من الكرة الأرضية، حيث يمكث حوالي ١١ ساعة في تغطية المنطقة المطلوبة، لذلك يستخدم هذا النوع من المدارات في أغراض الاتصالات من مواقع مرتفعة عن خط الاستواء (high latitudes locations). يصمم هذا المدار بزاوية ميل تقدر بـ ٦٣,٤ درجة، وذلك لمنع دوران المدار في مستواه، مما يتسبب في تغيير وضع أقصر وأبعد مسافة من القمر إلى الأرض عن الوضع المرغوب، يوضح الشكل (١٥) المسار الأرضي لمثل هذا النوع من المدارات.

من عيوب هذا المدار ـ مقارنة بالمدارات الثابتة (الاستوائية) ـ أن هوائيات المحطة الأرضية يجب أن تعمل على متابعة القمر ، لاستمرارية الاتصال به في الفترة المحدودة، كما أن القمر الاصطناعي في هذا المدار يواجه ما يسمى بحزام إشعاعي (Allen Radiation belt) حيث يؤثر ذلك على الأجهزة الإلكترونية في القمر إذا لم تكن هذه لأجهزة محمية بمواد لمقاومة الإشعاع. شكل (١٥).

• المدارات الثابتة

تمتاز المدارات الثابتة ـ المدارات الاستوائية (Geostationary Orbits) ـ بأنها دائرية ويصل ارتفاعها إلى ٣٦,٠٠٠ كم فوق سطح الاستواء، وبذلك تكون زاوية ميلان المدار تساوي صفر وسرعتها المدارية تساوي سرعة دوران الأرض حول محورها (بمعنى أن القمر يدور حول الأرض مرة واحدة في اليوم، فهو متزامن مع دوران الأرض حول

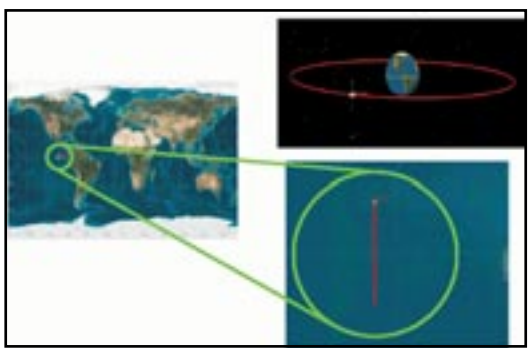
• شكل (١٥) المسار الأرضي لمدار مولنيا

محورها) وبالتالي يكون موقع هذا القمر ثابتاً بالنسبة لمحطة المراقبة علي سطح الأرض، حيث يمكن توجيه هوائيات المحطات الأرضية إلى نفس النقطة تقريباً في السماء، وهذا بدوره يسهل عملية الاتصال بالقمر، ولا يتطلب وجود نظام لمتابعة القمر كما هو الحال في المدارات الأخرى.

يستخدم هذا المدار في تطبيقات أقمار الاتصالات والرصد الجوي (دراسة الطقس) وأقمار البث التليفزيوني الفضائي.

الجدير بالذكر أن ثلاثة أقمار من هذا النوع تستطيع أن تقدم شبكة اتصالات شاملة للعالم (ماعدا المناطق القطبية). يوضح الشكل (١٦) المدار الاستوائي (الثابت) والمسار الأرضي له.

من عيوب هذا المدار أن هناك تأخيراً زمنياً في نقل المعلومات من وإلى القمر (Time Delay) ، وذلك نتيجة المسافة الكبيرة التي يجب أن تقطعها الإشارة من مكان الى آخر على سطح الأرض مروراً بالقمر . لايمثل هذا التأخير عائقاً في حالة الإنترنت ونقل المعلومات من وإلى القمر ، ولكن يمكن استشعاره بشكل واضح عند إجراء المكالمات الهاتفية الدولية.



• شكل (١٦) المدار الاستوائي والمسار الأرضي له