



دراسة أصل تكوين حلقات زحل وخواصها الفيزيائية

فريد مصعب مهدي*

قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الأنبار، الانبار، العراق

الخلاصة

تم بناء برنامج حاسوبي لحساب حد روش لحلقات وأقمار كوكب زحل ، وتبين إن العديد من حلقات الكوكب تقع خارج حد روش لها وهي لازالت على حالها ولم تتجمع وتتكتل منذ القدم ، وإن العديد من أقمار زحل تقع داخل حد روش لها ولم تؤثر عليها قوى المد والجزر من الكوكب ونفتتها . تم دراسة تغير عرض الحلقات كدالة نسبية للكتلة مع البعد عن الكوكب وتغير أقطار أقمار الكوكب كدالة نسبية للكتلة مع البعد عن الكوكب ومقارنة النتائج مع حالة الكواكب السيارة والشمس وتبين إن التغير متشابه في الحالتين تقريبا ، مما يدعونا للاستنتاج بأن أغلب أقمار زحل هي بالأصل كانت حلقات تدور حول الكوكب وهذه الحلقات قديمة ومن ضمن المادة الأولية للكوكب منذ نشأته وليست بقايا قمر تدمر بالاصطدام أو بتأثير قوى المد والجزر عند تجاوزه لحد روش . وإن تفاعل المد والجزر الجذبي ليس المؤثر الوحيد والأقوى في تحديد حالة التابع وشكله ومداره .

Study the Genesis of Saturn Rings and their Physical Properties

Farid M. Mahdi*

Department of Physics, College of Education for Pure Science, Anbar University, Anbar, Iraq

Abstract

A computer program has been created to calculate the Roche Limit of the rings and satellites of Saturn, showing that many of the rings of the planet are located outside the Roche Limit and still intact and do not accumulate and clump since ancient times, and that many of Saturn satellites are located within the Roche Limit and have not been influenced and crumbled by the tidal forces of the planet. The change of the rings width was studied as a relative function of the mass with the distance from the planet, and the satellite diameters change as a relative function of the mass with the distance from the planet. The results were compared with the condition of the planets and the sun showing almost similar change in the two cases, which induces to conclude that most of Saturn satellites were originally rings moving around the planet and these rings are old and among the raw material of the planet since its inception and not the remains of the satellite destroyed by collision or influenced by the tidal forces when by passing the Roche Limit. The tidal gravitational interaction is not only the most powerful and influential in determining the shape, condition and orbit of the satellite.

Keywords: roche limit, rings, satellites, Saturn, tidal forces

1 - مقدمة:

يتميز كوكب زحل بكثافته الواطئة وهي اقل من كثافة الماء وتعادل (0.687gm/cm^3) وكذلك وجود حلقات جميلة واضحة للعيان تحيط به ، وهو ذو مدار اهليلجي حول الشمس يتغير ما بين $(9.048 \text{ a.u.} - 10.115 \text{ a.u.})$ عنها ، بشذوذ مركزي (eccentricity) يقارب (0.0557) ، و يكمل الكوكب دورة واحدة حول الشمس كل (29.457) سنة شمسية وتعادل سنة زحلية

*Email: Fareedm1969@gmail.com

واحدة (مدة إكمال الكوكب دورة واحدة حول الشمس) ، بمتوسط سرعة مدارية تعادل (9.69 km/sec) . مستوي مدار الكوكب يميل عن الاستواء السماوي بمعدل (5.5°) ، وعن مستوي مدار الأرض حول الشمس بحدود (2.48°) ، يكمل الكوكب دورة واحدة حول نفسه كل (10.57 hr) بمعدل سرعة دورانية (9.87 km/sec) . يمتلك الكوكب غلاف جوي ارتفاعه (59.5 km) مكون أغليته من الهيدروجين ونسبة قليلة من الهليوم وغازات أخرى ، والحقل المغناطيسي للكوكب أقل بقليل من الحقل المغناطيسي الأرضي ويعادل (1/20) من الحقل المغناطيسي لكوكب المشتري ، وكرة هيل للكوكب (Hell sphere) تمتد لغاية (1.6×10^6 km) عن سطحه . يمتلك الكوكب بما يقرب من (200) قمر مرصود تدور حوله ، منها (62) قمر معروف ، (53) منها تم تسميتهم رسمياً ، أكبرها القمر تيتان (Titan) وهو ثاني أكبر قمر في المجموعة الشمسية بعد جيانميد (Ganymede) قمر المشتري ، وهو أكبر من كوكب عطارد حجماً ، وهو القمر الوحيد الذي يملك غلاف جوي واضح [1-3] .

يحيط بالكوكب ثمانية حلقات رئيسية متداخلة تتخللها بعض الحلقات الثانوية ، مكونة قرص من الجليد وقليل من الأحجار والغبار ، تدور حول الكوكب في مستوى استوائه وتبعد أقربها عنه بمقدار نصف قطر الكوكب وهي تعطيه شكلاً مميزاً . هذه الحلقات غير مرئية من الأرض بالعين المجردة ، أول من اكتشفها هو غاليليو غاليلي (Galileo Galilei) عام (1610) م ، وتوقع إنها كواكب تدور حول زحل ، وكان كريستيان هيغنز (Christian Huygens) أول من وصف الحلقات كقرص محيط بالكوكب عام (1655) م ، وفي العام (1675) م اكتشف جيوفاني دومينيكو كاسيني (Giovanni D. Cassini) إن كوكب زحل محاط بحلقات صغيرة تتخللها بعض الثغرات والتي سميت أكبرها باسمه لاحقاً والتي تفصل بين الحلقتين (A,B) . وفي العام (1787) وصفها بيير سايمون لابلاس (Pierre S. Laplace) بأنها عبارة عن سلسلة من الجذائل الصغيرة (series of tiny ringlets) ، وفي العام (1859) اقترح جيمس كلارك ماكسويل (James C. Maxwell) بأن الحلقات مكونة من العديد من الجسيمات الصغيرة تدور حول زحل ، وقد تم إثبات اقتراح ماكسويل من خلال الدراسات الطيفية على الحلقات التي أجراها جيمس كيلر (James Keeler) عام (1895) م [4,5].

يظهر زحل للعين المجردة في سماء الليل كنقطة مصفرة لامعة ذات قدر ظاهري يتراوح بين ($+1 - 0$) ، وقد يصل في أقصى درجات لمعانه إلى (-0.24) ، وأوضح رؤية لزحل وحلقاته عندما تكون الزاوية بينه وبين الشمس (180°) . يقسم تاريخ مراقبة واستكشاف كوكب زحل إلى ثلاث مراحل رئيسية : الأولى هي الأرصاد القديمة بالعين المجردة مع بعض الأدوات البسيطة ، والمرحلة الثانية هي استخدام المقاريب التي اخترعت أوائل القرن السابع عشر وأخذت بالتطور والتحسين إلى أن وصلت إلى التلسكوبات الحديثة ، والمرحلة الثالثة هي الأرصاد الأرضية الحديثة وزيارة المركبات الفضائية للكوكب والدوران حوله أو التحليق فوقه بواسطة المسابير الفضائية وأخيراً رحلة المركبة كاسيني (Cassini) في عام (2006) م [6-8] .

2 - نظريات نشوء حلقات زحل وحساب حد روش:

حلقات زحل هي نظام حلقي متداخل يشكل قرص مركزه هو مركز الكوكب ويدور حوله بمستوى استوائه ، يمتد بين (66300 - 120700 km) من خط استواء الكوكب ومتوسط سمك الحلقات يقارب (20 m) . القرص الحلقي مكون من أجسام مختلفة الأحجام تتراوح بين (1 m - 1 mic.m) ، وتتكون مادتها من (93%) جليد الماء (Ice) مع قليل من الشوائب و (7%) كربون غير متبلور (amorphous carbon) . الكتلة الكلية للحلقات تساوي (3×10^{19} kg) تقريباً ، وهي تشكل ما يعادل (5×10^{-8}) من كتلة الكوكب الكلية ، وهي أقل بقليل من كتلة القمر ميماس (Mimas) ، وتشير بعض الدراسات الحاسوبية الحديثة المعتمدة على أرصاد المسبار كاسيني (Cassini probe) والتي قامت بها وكالة ناسا لفضاء (NASA) إلى إن كتلة الحلقات قد تعادل ثلاثة أضعاف هذا الرقم . وحلقات زحل تمتلك غلاف جوي خاص بها بمعزل عن الكوكب ، يتكون من غاز الأوكسجين الجزيئي (O_2) الناتج من تفاعل الأشعة فوق البنفسجية (Ultra violet) القادمة من الشمس مع جليد الماء الموجود في الحلقات ، كذلك تنتج الهيدروجين الجزيئي (H_2) ، ويحتوي الغلاف أيضاً على الهيدروكسيد (OH) ، وكثافة هذا الغلاف واطئة جداً [9-11].

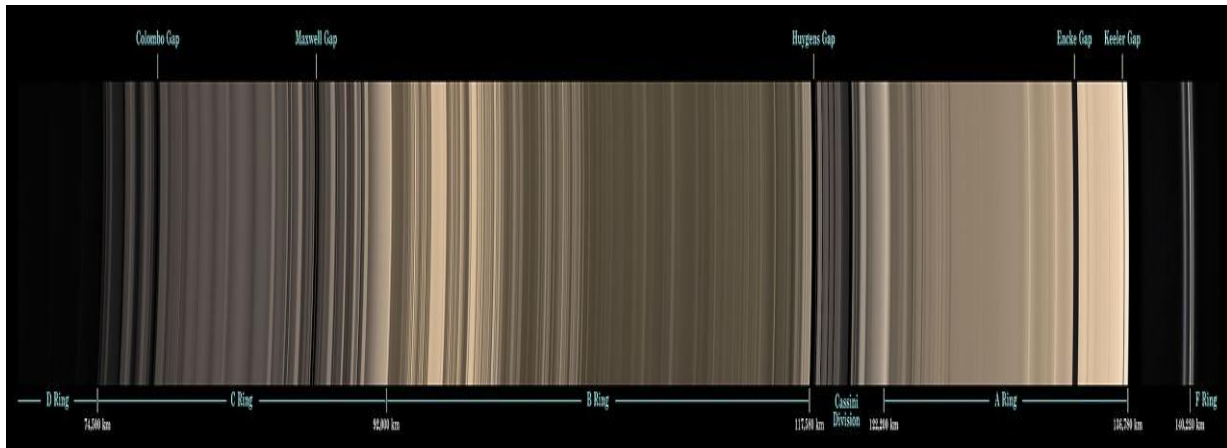
هنالك ثلاث نظريات رئيسية لتفسير أصل تكون هذه الحلقات وضعت في القرن التاسع عشر ، الأولى تفيد بأنها ناتجة من بقايا مواد قرص الكوكب الأولي والتي كانت دون حد روش للكوكب (Roche limit) ، ونتيجة لذلك لم تتمكن من التجمع وتشكيل أقمار . والثانية تشير إلى إن مواد هذه الحلقات ناتجة عن حطام قمر تقطعت نتيجة اصطدام ما حدث مسبقاً . والنظرية الثالثة تشير إلى إن

مواد الحلقات ناتجة من حطام قمر قطره المفترض (400 – 600 km) ، تفتت نتيجة تغير الاجهادات الجذبية التي عانى منها القمر عند مروره داخل حد روش للكوكب [13,12].



صورة توضيحية 1- لكوكب زحل تظهر حلقاته وأقماره [6]

الأنموذج المطور لنظرية القمر المدمر وضع من قبل كانوب (R. M. Canup) أشار فيه الى إن أصل الحلقات هو غطاء جليدي كبير لقمر أكبر من حجم تيتان ، هذا القمر الذي أزيلت طبقاته الخارجية المتجمدة قد ابتلع داخل الغيمة السديمية الأولية للكوكب ، وهذا يفسر ندرة المواد الصخرية داخل الحلقات . ويعتقد إن حلقات زحل كانت أكبر وأوسع بحدود (1000) مرة من حجمها الحالي ، لكن المكونات الخارجية للحلقات قد اندمجت وكونت القمر تيثيس (Tethys) وزمرته والتي تعاني من ندرة المكونات الصخرية فيها . والتطورات والتصادمات اللاحقة للقمر انسيلادوس (Enceladus) أدت الى فقدان الجليد من هذا القمر ورفع كثافته الحالية الى (1.61 gm/cm^3) مقارنة مع لميماس (1.15 gm/cm^3) و (0.97 gm/cm^3) لتيثيس . إن نظرية الحالة الضخمة للحلقات في الوقت المبكر من تشكيل زحل أوضحت كيفية تشكيل زمرة أقمار ريا (Rhea) ، حيث كانت قطع الصخور من السليكات المكونة للحلقات يزيد قطرها عن (100 km) تكونت بسبب تراكم المزيد من الجليد في هذه الحلقات . وبسبب التفاعلات الجذبية مع مكونات الحلقات وتفاعل المد والجزر الجذبي (Tidal Interaction) مع الكوكب أدى الى طرد هذه الكتل الى مدارات أوسع خارج حد روش للكوكب ، وبسبب تواجدها الكثيف تم تلاحمها مع مواد أخرى وشكلت أقمار حديثة التكوين من خلال عملية الدمج العشوائي . هذه العملية قد تفسر أسباب الاختلاف في المحتوى من السليكات بين أقمار زحل خارج مدار القمر ريا ، وكذلك قلة هذه المادة في الأقمار الأقرب الى الكوكب [15,14] .



الصورة 2- تبين حلقات زحل مأخوذة بواسطة المسبار كاسيني (2007) [14]

تم تسمية الحلقات أجديا حسب أسبقية اكتشافها وهي بالترتيب من الأبعد (A,B,C) من ضمنها فاصل كاسيني ، ثم الحلقة (D) الأكثر خفوتا والأقرب الى الكوكب ، ثم الحلقة (F) التي تحيط بالحلقات السابقة وهي حلقة ضيقة ، تحيطها حلقات باهتة ، ثم الحلقات الأكثر خفوتا (E,G) والتي تعاني بعض الاضطرابات بسبب تأثير الأقمار التي تدور بالقرب منها . وأبعد حلقة هي حلقة فويب (Phoebe) وتقع على بعد $(12 \times 10^6 \text{ km})$ وتميل عن باقي الحلقات بمقدار (27°) وقد تم اكتشافها عام (2009) م وهي حلقة رقيقة تمتد بين (128-207) ضعف قطر الكوكب وقد تصل الى (300) ضعف . تحتوي الحلقات أيضا على العديد من الفجوات أهمها فجوة ماكسويل وفجوة كلير وفجوة انكي . هذه الحلقات تكون لها بنية معقدة ، حيث تتألف من آلاف الثغرات الرقيقة والجدائل ، والعديد من الأقمار تدور داخلها تسمى الأقمار الرعاة (shepherd satellites) لدورها في المحافظة على حافة الحلقات وشكلها [16,1] .

تعد الحلقتان (A,B) الأكثر كثافة في النظام والتي يفصل بينها فاصل كاسيني (Cassini Division) ، الى جانب الحلقة (C) والتي تشبه في طبيعتها فاصل كاسيني . هذه الحلقات تمثل المناطق الرئيسية للنظام الحلقي للكوكب ، وتحتوي على جزيئات كبيرة نسبة الى باقي الحلقات المكونة من الغبار مثل الحلقة (D) . وتتسم الحلقة الضيقة (F) بصعوبة تصنيفها ، لان بعض أجزائها كثيفة جدا وتحتوي أيضا على قدر كبير من الجزيئات الغبارية الصغيرة . النظام الحلقي الذي يحيط بالحلقة الضيقة (F) مكون من عدة حلقات غبارية منها حلقة يانوس - ابيميثوس (Janus - Epimetheus Ring) وهي حلقة باهتة تملأ المنطقة التي تمثلها مدارات القمرين جانوس وابيميثوس ، ومصدر مادتها هو الغبار المتطاير من سطوح هذه الأقمار بعد ارتطام النيازك بها . أما الحلقة (G) فهي من الحلقات المغبرة (Dusty rings) ، بسبب صغر حجم الجزيئات المكونة لها والتي يقارب قطرها (1 micron) ومكونة من جليد الماء تقريبا أيضا ، تحتوي هذه الحلقة على قوس مشرق يصل عرضه الى $(1/6)$ عرض الحلقة مكون من أجسام جليدية كبيرة نسبيا ، ويقع في قسمها الداخلي ويحتوي على قمر صغير قطره (0.5 km) يدعى ايجايون (Aegaeon) [16,15].

يتواجد خارج الحلقة (G) قوس حلقة ميثوني (Methone Ring Arc) التابع للقمر ميثوني ويعتقد العلماء بأنه تكون بسبب الغبار الذي طرد من القمر لاصطدامه بالنيازك الصخرية . ويحيطه قوس حلقة أنثي (Anthe Ring Arc) الذي يمثل بقايا الغبار المتسرب من القمر أنثي . ثم حلقة باليني (Pallene Ring) وهي أيضا حلقة غبارية تحيط مدار القمر باليني ومصدرها سطح القمر نفسه . أما الحلقة (E) تقع بين مداري القمرين ميماس وتيتان وتتألف من جسيمات مجهرية على عكس باقي الحلقات ويعتقد إن مصدرها من القمر انسيدلاوس وهي حلقة سميكة يصل سمكها الى (2000 km) ، ولأنها عريضة جدا فهي تحوي العديد من الأقمار حيث تتراكم مادتها على سطوح هذه الأقمار . الحلقة الأخيرة هي حلقة فويب (Phoebe Ring) وهي عبارة عن قرص من المواد الغبارية يحيط بمدار القمر فويب ، وهي حلقة كبيرة جدا وسميكة ، سمكها يصل الى (20) مرة بقدر قطر الأرض و مادتها تجمعت من النيازك الصغيرة . ويعتقد العلماء إن هنالك حلقة حول مدار القمر ريا (Rhea) ثاني اكبر أقمار زحل ، حيث تم الاستدلال عليها من خلال ملاحظات المسبار كاسيني التي تشير الى استنزاف الالكترونات النشطة للغلاف المغناطيسي لكوكب زحل في المنطقة القريبة من القمر ريا [17,8] .

حد روش ويسمى أحيانا نصف قطر روش نسبة للعالم ادوارد روش (Eduard Roche) الذي وضعه في عام (1848) م وهو يمثل المسافة من مركز الجرم السماوي الى الفضاء المحيط والتي فيها تكون قوى المد والجزر للجرم أقوى من قوى التماسك بين جزيئات أي جسم ضمن هذه المسافة وتؤدي هذه القوى الى تفككه وتحوله الى حلقات مكونة من أجزاء صغيرة ، وخارج هذا الحد يمكن أن تتحد هذه الأجزاء مع بعضها بفعل الجاذبية المتبادلة . و يمكن حساب حد روش لأقمار وحلقات زحل من العلاقة التالية [18,17]:

$$r_R = 2.455 \times R \times \sqrt[3]{\frac{\rho_M}{\rho_m}}$$

حيث r_R يمثل حد روش ، R نصف قطر الكوكب ، ρ_M كثافة الكوكب ، ρ_m كثافة الحلقة الواحدة / القمر .

3 - الأنموذج المقترح :

(a) من خلال ما قدمته الفرضية السديمية من تفسيرات مقبولة حول أصل المنظومة الشمسية والتي تشير الى إن السديم الأولي قد تحول الى قرص مفلطح بفعل الحركة الدورانية وأدى ذلك الى انفصال الأجزاء الخارجية على شكل حلقات بسبب قوة الطرد

المركزي ، وكل حلقة تجمعت بسبب قوة الجذب المتبادلة بين أجزائها لتكون كوكب وتابعه بنفس الطريقة . ولا زالت أجزاء من النظام الشمسي لم تتجمع وتتحد لتكون كتلة موحدة كبيرة ومنها حزام الكويكبات وكذلك حزام كويبر (Kuiper belt) اللذان يضمان آلاف الأجرام مختلفة الحجم بين نرات الغبار ومئات الكيلومترات ولا زالت هذه الأجسام تدور في مدارات وأحزمة حول الشمس منذ بلايين السنين . من ذلك نجد إن :

- i. حالة كوكب زحل وحلقاته مشابه بشكل كبير لحالة الشمس وكواكبها ، وهي حالة مصغرة للنظام الشمسي في التوزيع ، إلا إن زحل ليس نجم . ونجد ذلك عند مقارنة الشكل البياني (1) الذي يبين تغير عرض الحلقات كدالة للكتلة مع البعد مع الشكل البياني (8) الذي يمثل تغير أقطار الكواكب كدالة للكتلة مع بعدها عن الشمس مع ملاحظة إن تغير الكثافة في الحالتين متقارب.
- ii. مركز السديم الكوكبي الأولي وهو الشمس ذو كثافة واطنة ومتكون من غازات في الأغلب ، والأجزاء الخارجية المنفصلة عنه بسبب القوة الطاردة المركزية المعتمدة على الكتلة ، مشابه لحالة كثافة كوكب زحل والواطنة والحلقات الخارجية المكونة من الصخور ذات الكثافة العالية نسبيا .
- iii. حزام الكويكبات الذي يقع بين مداري المريخ والمشتري وحزام كويبر الذي يقع في المنطقة الماوراء نبتونية هما بقايا السديم الكوكبي الأولي التي لم تتمكن من التجمع والاتحاد لتكوين كواكب ، وحلقات زحل مشابه في إنها لم تتمكن من التجمع والاتحاد لتكوين أقمار تابعة للكوكب ، وقد تكون أقمار في طور التكوين ، ولاسيما إن الكوكب من الكواكب الغازية المستمرة بالنكتل وكثافته أقل من كثافة الماء .
- (b) إذا كان أصل حلقات زحل هو قمر تم تدميره بسبب اصطدام ما ، وهو قمر ذو كتلة صغيرة بنصف قطر (500 km) (كما جاء في نظرية القمر المدمر) ، واحتمالية التدمير هذه ضعيفة جدا ، حيث إن احتمالية الاصطدامات لو كانت كبيرة في زمن ما ، فألا جدر أن يتم تدمير أكثر من قمر ولكانت كتلة هذه الحلقات كبيرة جدا نسبة الى الأقمار التابعة للكوكب .
- (c) إن سبب ندرة المواد الصخرية في الحلقات ليس سببه إن الحلقات كانت عبارة عن قشرة جليدية لقمر ما أزيلت لأسباب غير معروفة (كما جاء في فرضية كانوب) ، وإنما لان أغلب المواد الصخرية أما تكتلت مع بعضها وكونت أقمار صغيرة وهي الأقمار ما بين الحلقات والتي تسمى الأقمار الرعاة أمثال الأقمار بان ودافيس و(s/2009s1) وغيرها . وقسم من هذه الكتل الصخرية اندفعت الى الخارج بفعل قوتها الطاردة المركزية وكونت أقمار خارجية . لذلك نرى كثافة الأقمار الخارجية أكبر من الداخلية كما في الأقمار تيتان و فوبيو وريا و انسيلادوس وهيلين . ونعتقد إن أصل الجليد هو المذنبات القادمة من حزام كويبر والتي تفقد جزء من مادتها عند مرورها قرب الكوكب أو عند أسرها من قبله كما في المذنب شيوماكر ليفي (Shoemaker-Levy 9.9) الذي اسر من قبل كوكب المشتري وأصطدم به عام (1994) بعد أن فقد الكثير من أجزائه الخارجية الجليدية .
- (d) تأثير قوى المد والجزر على الأجسام التي تقع داخل حد روش لها سيكون ضعيف نسبيا ، وهذه القوى ليست العامل الأكثر تأثيرا في واقع ومدارات الأقمار والحلقات بسبب بعدها المناسب عن الكوكب وكثافتها ، لذلك نجد الكثير من الأقمار المكتشفة وفي طور الاكتشاف تدور داخل حد روش لها وما زالت متماسكة ولم تتفتت بل وتتكون أقمار جديدة من هذه الحلقات .
- (e) تم بناء برنامج حاسوبي بلغة (Quick basic) لحساب حد روش للحلقات باعتبار مكوناتها هي (93%) جليد الماء (Ice) بمعدل كثافة (0.92 gm/cm³) مع قليل من الشوائب و (7%) كربون غير متبلور (Amorphous carbon) بمعدل كثافة (1.95 gm/cm³) وكانت قيمته هي :

$$r_R = 2.445 * 60268 * (0.687 / ((0.92 * 93 / 100) + (1.95 * (7 / 100))))^{1/3}$$

$$r_R = 131,272.831 \text{ km}$$

وهذا يمثل حد روش لمادة الحلقات والتي تكون بمعدل كثافة لمكوناتها يقارب (0.9921 gm/cm³) .

- i. عند مقارنة أبعاد الحلقات عن مركز الكوكب الموجودة في الجدول-2 مع القيمة المستخرجة لحد روش أعلاه نجد إن العديد من الحلقات تقع خارج حد روش لها وهي الحلقات (F,G,E,Phoebe) والحلقات الثانوية بينها وكذلك الجزء الخارجي من الحلقة (A) ، وما زالت هذه الحلقات على حالها وشكلها منذ أمد بعيد والتي من المفترض أن تكون قد تجمعت وتكتلت بسبب ضعف تأثير قوى المد والجزر عليها من الكوكب وغلبة قوى التجاذب بين مكوناتها .

- ii. بنفس الطريقة أعلاه تم حساب حد روش لبعض أقمار الكوكب زحل ووضع النتائج في الجدول رقم (1) ، وعند مقارنة هذه القيم مع أبعاد الأقمار عن مركز الكوكب نجد إن العديد من هذه الأقمار تقع داخل حد روش لها (اللون الغامق في الجدول) هذه الأقمار بقيت على حالها ولم تتفتت أو تتجزأ بتأثير قوى المد والجزر من الكوكب .
- (f) من الجدول -2 تم رسم العلاقة بين تغير عرض الحلقات وبعدها عن مركز الكوكب كما في الشكل البياني (1) ، وتبين إن العلاقة نبضية . وكذلك العلاقة بين تغير سمك الحلقات مع البعد وتبين أن العلاقة نبضية أيضا (ما عدا الحلقتين E و فويب العريضة والسميكة جدا والتي تشبه الهالة حول الكوكب) .
- (g) من الجدول-3 تم رسم العلاقة بين تغير عرض الفجوات داخل الحلقة (C) مع بعدها عن الكوكب ، ومن الجدول-4 تم رسم العلاقة بين تغير عرض مكونات فاصل كاسيني مع البعد عن الكوكب . تبين من الشكلين إن التغير هو تغير نبضي نسبيا
- (h) من جدول-5 تم رسم العلاقة بين تغير أقطار أقمار زحل كدالة نسبية للكثافة مع بعد هذه الأقمار عن مركز الكوكب كما في الأشكال (6,7,8) ، وتبين إن العلاقة تتغير تغير نبضي . ومن الجدول-6 تم رسم العلاقة بين تغير أنصاف أقطار الكواكب السيارة كدالة نسبية للكثافة مع بعد هذه الكواكب عن الشمس كما في الشكل-8 ومنه تبين إن التغيير نبضي أيضا .

الاستنتاجات :

1. تشابه توزيع كثافة الأقمار وكثافة الحلقات حول كوكب زحل مع توزيع كثافة الكواكب حول الشمس . وعدد حلقات زحل وكثافتها يعتمد على حداثة تكوين الكوكب وكثافته ، وهذه الحلقات تمثل المادة الخارجية للكوكب . والتوزيع النبضي يعتمد قوة جذب الكوكب وسرعة الدوران وعلى كثافة المادة الأولية الخارجية المنفصلة عن الكوكب على شكل حلقات والتي قسم منها تجمع وكون أقمار وقسم منها في طور التجمع .
2. أصل حلقات زحل والكواكب الأخرى في النظام الشمسي هو القرص السديمي الأولي لتكوين الكواكب ، ومادة الحلقات هي أصل المادة المكونة للأقمار وليس العكس كما أشارت بعض النظريات ، وقد يكون هنالك تبادل بالمادة بين الحلقة والقمر ، والسبب هو حداثة تكثف وتجمع قسم من مادتها على سطح القمر المنكون حديثا وضعف تماسكها ، وخاصة في الحلقات الخارجية للكوكب . وهنالك بعض المذنبات التي صادف مرورها ضمن كرة هيل للكوكب ففقدت قسم من مادتها بسبب التأثير المغناطيسي للكوكب وقلة كثافة هذه المذنبات ، حيث أضيفت هذه المادة الى مادة الحلقات الأصلية ، واغلب المادة المفقودة من المذنبات مكونة من الجليد .
3. أصل أقمار زحل هو الحلقات التي دارت حول الكوكب والتي كانت اكبر بكثير من حجمها الحالي عند التكوين ، ولا زالت بعض الأقمار في طور التكوين وتأخذ مادتها من هذه الحلقات وتتزايد حجما وكثافة ويتبعها تناقص حجم وكثافة هذه الحلقات . لكن هنالك بعض الأقمار اللانظامية شكلا ومدارا قد تكون قدمت من المنطقة المحيطة بالنظام الشمسي وتم أسرها من قبل كوكب زحل عند مرورها ضمن كرة هيل له والتي تكون خاضعة لسطوته .
4. قوى المد والجزر للكوكب التي تؤثر على توابعه وتصنع حدا للتأثير يسمى حد روش هي ليست المؤثر الوحيد والرئيسي على حالة وشكل ومدار التوابع بل هنالك قوى أخرى لها تأثير قد يكون أكبر منها كثافة المادة المكونة للتابع إضافة الى قوى التماسك بين أجزائه .

المصادر :

1. Seidelmann, P. Kenneth, Archinal, B. A., and A'hearn, M. F.. 2007. *Report of the IAU/IAG Working Group on cartographic coordinates and rotational elements: 2006* .Celestial Mech. Dyn. Astr.
2. James, E.1998. *The History and Practice of Ancient Astronomy*, Oxford University Press.p7 -292.
3. Munsell, Kirk. 2005. Saturn-story/moons.cfm , *NASA Jet Propulsion Laboratory*, California Institute of Technology.
4. Thompson, Richard .1997. Planetary Diameters in the Surya-Siddhanta, *Journal of Scientific Exploration*, [6-193].2(11): 193-200.
5. Fortney, Jonathan J. 2004 . *Looking into the Giant Planets*, Science, (5689) : 305 , 1414-1315.
6. Lovett, L., Horvath, J. and Cuzzi, J. 2006. *Saturn: A New View*, New York: Harry N. Abrams, Inc .ISBN 0810930900.

7. Miner, Ellis D., Wessen, Randii R., and Cuzzi, Jeffrey N. **2007**. *Planetary Ring Systems*, The scientific significance of planetary ring systems, Springer Praxis Books in Space Exploration. Praxis. pp:1-16.
8. Nicholson, P.D., and 16 co-authors .**2008**. *A close look at Saturn's rings with Cassini VIMS*, *Icarus* 193 (1): 182-212.
9. Stewart, Glen R., Robbins, S. J., and Colwell, J. E. **2007**. Evidence for a Primordial Origin of Saturn's Rings. *Bulletin of the American Astronomical Society*. American Astronomical Society, DPS meeting #39 (American Astronomical Society) 39: 420.
10. Johnson, R. E., Smith, H. T., Tucker, O. J., Liu, M., Burger, M. H., Sittler, E. C., and Tokar, R. L. **2006**. The Enceladus and OH Tori at Saturn". *The Astrophysical Journal* (The American Astronomical Society) 644 (2): L137.
11. Kerr, Richard A. **2008**. *Saturn's Rings Look Ancient Again*, *Science*, 319 (5859): 21.
12. Canup, R. M. **2010**. *Origin of Saturn's rings and inner moons by mass removal from a lost Titan-sized satellite*, *Nature* 468 (7326): 943-926.
13. Charnoz, S., Crida, A., Castillo-Rogez, J. C., Lainey, V., Dones, L., Karatekin, Ö., Tobie, G., Mathis, S., Le Poncin-Lafitte, C., and Salmon, J. **2011**. *Accretion of Saturn's mid-sized moons during the viscous spreading of young massive rings: Solving the paradox of silicate-poor rings versus silicate-rich moons*, *Icarus* 216 (2): 535-550.
14. Porco, C.C., Baker, E. et al.**2005**. *Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Rings and Small Satellites*. *Science* 307 (5713): 1226-1236.
15. Hedman, M. M., Burns, J. A., Tiscareno, M. S., Porco, C. C., Jones, G. H., Roussos, E., Krupp, N., Paranicas, C., and Kempf, S. **2007**. *The Source of Saturn's G Ring*. *Science* 317 (5838): 653-656.
16. Hedman, M. M., Murray, C. D., Cooper, N. J., Tiscareno, M. S., Beurle, K., Evans, M. W., and Burns, J. A. **2008**. *Three tenuous rings/arcs for three tiny moons*, *Icarus*, 199 (2): 378-386.
17. Hedman, M. M., Burns, J. A., Hamilton, D. P., and Showalter, M. R.**2012**. *The three-dimensional structure of Saturn's E ring*, *Icarus* 217: 322-338.
18. Frank H. Shu. **1982**. *The Physical Universe: an Introduction to Astronomy*, University Science Books, p. 431, ISBN 0-935702-05-9.

جدول 1- يبين حد روش لعدد من أقمار زحل مرتبة حسب البعد (برنامجنا + المصدر [1])

Se.	Satellites	Orbital Radius (km)	Mean density (kg/m ³)	Roche Limit (km) (our results)
1-	Pan (SXVIII, S/1981 S13)	133,583	420	174,827.74
2-	Daphnis (XXXV, S/2005 S1)	136,500	340	187,586.64
3-	Atlas (SXV, S/1980 S28)	137,670	500	164,956.75
4-	Prometheus (SXVI, S/1980 S27)	139,353	480	166,760.87
5-	Pandora (SXVII, S/1980 S26)	141,700	490	166,071.36
6-	Epimetheus (SXI, S/1980 S3)	151,422	640	151,926.47
7-	Janus (SX, S/1980 S1)	151.472	630	152,726.1
8-	Mimas (SI)	185,520	1150	124966.66
9-	Enceladus (SII)	238,020	1610	11178.13
10-	Tethys (SIII)	294,660	985	131587.51
11-	Calypso (SXIV, S/1980 S25)	296,788	1000	131,962.26
12-	Dione (SIV)	377,400	1480	114882.7
13-	Helene (SXII, S/1980 S6)	378,500	1300	118,962.54
14-	Rhea (SV)	527.04	1240	121867.02
15-	Titan (SVI)	1,221.83	1880	106081.78
16-	Hyperion (SVII)	1,481,100	550	159798.44
17-	Iapetus (SVIII)	3,561,300	1090	127,218.79
18-	Phoebe (SIX)	12,944,000	1640	111,022.79

جدول 2- يتضمن التقسيم الرئيسي لحلقات زحل [9,8,1]

Se.	Name of Ring	Distance from center of Planet to center of Ring (km)	Width (km)	Ring Radius (Eq. Radius)	Thickness (m)
1	D Ring	70,705	7,500	1.173	2
2	C Ring	83,329	17,500	1.383	5
3	B Ring	104,790	25,500	1.739	7.5
4	Cassini Division	119,875	4,700	1.989	---
5	A Ring	129,472.5	14,600	2.148	15
6	Roche Division	138,077.5	2,600	2.291	---
7	F Ring	140,180	500	2.326	0.4
8	Janus-Epimetheus Ring	151,500	5,000	2.5137	---
9	G Ring	170,500	9,000	2.86	1
10	Methone Ring Arc	194,230	500	3.2227	---
11	Anthe Ring Arc	197,665	1,800	3.2797	---
12	Pallene Ring	212000	2,500	3.5217	---
13	E Ring	330000	300,000	5.5	2000 km
14	Phoebe Ring	8500000	9,000,000	141.0375	20 planet dim.

جدول 3- يتضمن مكونات الحلقة (C) [9,8,1]

Se.	Name	Distance from Saturn's center (km)	Width (km)
1	Colombo Gap	77,870	150
2	Titan Ringlet	77,870	25
3	Maxwell Gap	87,491	270
4	Maxwell Ringlet	87,491	64
5	Bond Gap	88,700	30
6	1.470R _s Ringlet	88,716	16
7	1.495R _s Ringlet	90,171	62
8	Dawes Gap	90,210	20

جدول 4- يتضمن مكونات فاصل كاسيني (Cassini Division) [9,8,1]

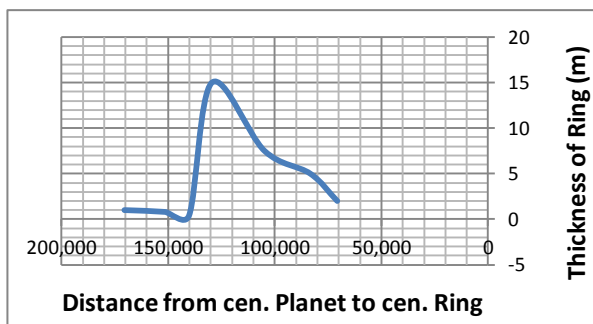
Se.	Name	Distance from Saturn's center (km)	Width (km)
1	Huygens Gap	117,680	345
2	Huygens Ringlet	117,848	17
3	Herschel Gap	118,234	102
4	Russell Gap	118,614	33
5	Jeffrey Gap	118,950	38
6	Kuiper Gap	119,405	3
7	Laplace Gap	119,967	238
8	Bessel Gap	120,241	10
9	Barnard Gap	120,312	13

جدول 5- يتضمن الخواص الفيزيائية والمدارية لأقمار زحل [9,8,1]

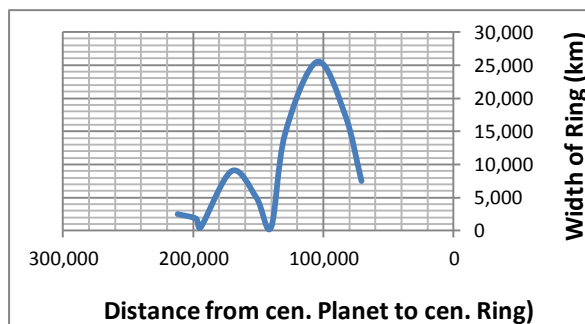
Major Satellites				
Se.	Satellites	Orbital Semi major axis		Radius (km)
		(10 ³ km)	(Saturnian Radii)	
1-	Mimas (SI)	185.52	3.0783	198
2-	Enceladus (SII)	238.02	3.9494	252
3-	Tethys (SIII)	294.66	4.8892	531
4-	Dione (SIV)	377.40	6.2620	561
5-	Rhea (SV)	527.04	8.7449	763
6-	Titan (SVI)	1,221.83	20.273	2,575
7-	Hyperion (SVII)	1,481.1	24.575	139
8-	Iapetus (SVIII)	3,561.3	59.091	735
Lesser Satellites				
9-	Pan (SXVIII, S/1981 S13)	133.583	2.18	14
10-	Daphnis (XXXV, S/2005 S1)	136.500	2.26	4
11-	Atlas (SXV, S/1980 S28)	137.670	2.2820	16
12-	Prometheus (SXVI, S/1980 S27)	139.353	2.2843	46
---	-----	-----	-----	-----
---	-----	-----	-----	-----
51-	Ymir (SXIX, S/2000 S1)	23,040	383	9
52-	Loge (SXLVI, S/2006 S5)	23,070	383	3
53-	Fornjot (SXLII, S/2004 S8)	25,110	417	3
Recently Discovered (Unnamed) Satellites				
54-	S/2004 S07	21,000	348	3
55-	S/2004 S12	19,890	330	3
---	-----	-----	-----	-----
---	-----	-----	-----	-----
61-	S/2007 S3	18,980	315	3
62-	S/2009 S1	117	1.94	0.3

جدول 6- يتضمن الخواص الفيزيائية والمدارية لكواكب المجموعة الشمسية [4]

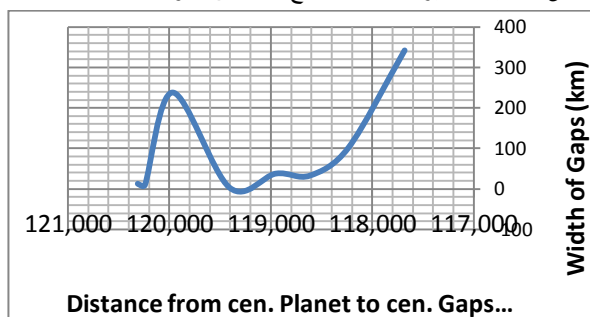
Se.	planet	Equatorial diameter (eq. of earth)	Orbital Radius (a.u.)	Orbital Period (yr)	Mass (mass of earth)
1-	Mercury	0.382	0.39	0.24	0.06
2-	Venus	0.949	0.72	0.62	0.82
3-	Earth	1.00	1.00	1.00	1.00
4-	Mars	0.532	1.52	1.88	0.11
5-	Jupiter	11.209	5.20	11.86	317.8
6-	Saturn	9.449	9.54	29.46	95.2
7-	Uranus	4.007	19.22	84.01	14.6
8-	Neptune	3.883	30.06	164.8	17.2



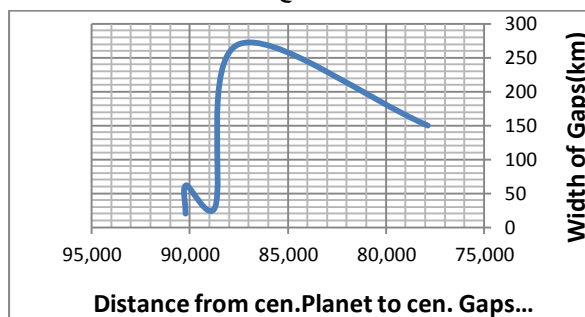
الشكل 2- يمثل تغير سمك الحلقة مع البعد عن الكوكب



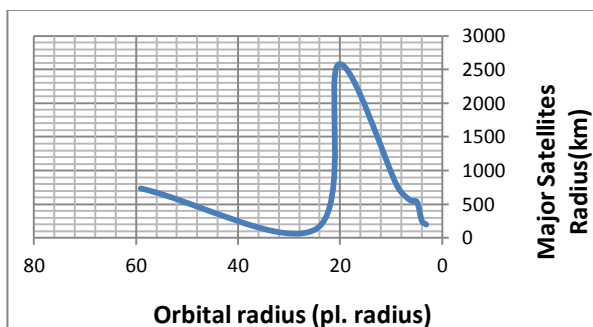
الشكل 1- يمثل تغير عرض الحلقة مع البعد عن الكوكب



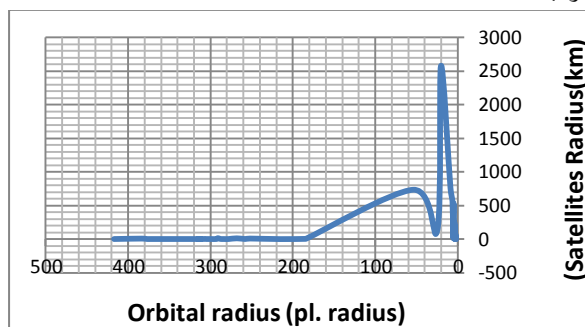
الشكل 4- يمثل تغير عرض مكونات فاصل كاسيني مع البعد عن الكوكب



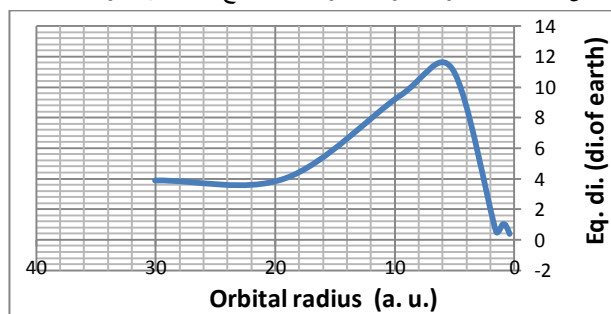
الشكل 3- يمثل تغير عرض الفجوات داخل الحلقة (C) مع البعد عن الكوكب



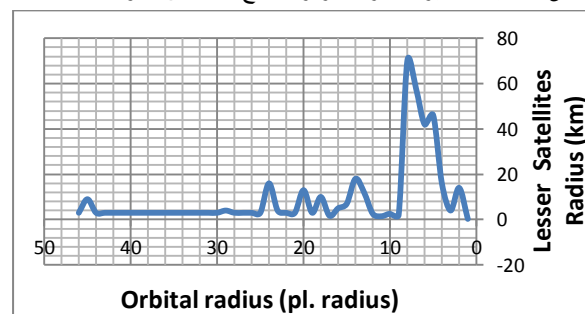
الشكل 6- يمثل تغير أقطار الأقمار النظامية مع البعد عن الكوكب



الشكل 5- يمثل تغير أقطار أقمار زحل مع البعد عن الكوكب



الشكل 8- يمثل تغير أقطار كواكب المجموعة الشمسية مع البعد عن الشمس



الشكل 7- يمثل تغير أقطار أقمار زحل اللانظامية مع البعد عن الكوكب