التفاعل بين الموجات الكهرومغناطيسية ذات التردد العالي مع البلازما وتأثير وجود الايونات السالبة على قابلية امتصاص القدرة

احمد خضير عباس الزبيدي - جامعة واسط \ كلية العلوم \ قسم الفيزياء

The Interaction between High Frequency Electromagnetic Waves with Plasma and the Effect of Negative Ions Existence on the Power Absorption Capability

AHMED KHUDAIR ABBAS AL-ZUBAIDI
Wassit University / College of Science / Physics Department

ABSTRACT

The interaction between the incident, high frequency, electromagnetic waves with plasma layer shows that the existence of negative ions and the non-linear effect reduces the power absorption capability of the plasma. In this research we study and discuss all parameters of the great influence in this process depending on many important equations, like the Maxwell equations, current response of the plasma equation, multi – fluid momentum equation and the continuity equation. Numerical simulations based on the finite- difference- time- domain approximation to multi- fluid equations for the positive ions, negative ions and electrons are used to study high frequency electromagnetic waves propagation and absorption in an unmagnetized plasma layer. A good agreement in the comparison between the simulations in this work and the experimental results in the previous works is shown.

الخلاصة

ان التفاعل مابين الموجات الكهرومغناطيسية، ذات التردد العالي، الساقطة وطبقة البلازما توضح بان وجود الايونات السالبة والتاثيرات غير الخطية تقلل من قابلية امتصاص القدرة في البلازما. وفي هذا البحث تم حساب ومناقشة جميع المعلمات ذوات التاثير في هذه العملية اعتمادا على العديد من المعادلات المهمة من معادلات ماكسويل والاستجابة التيارية للبلازما ومعادلات الاستمرارية والزخم للموائع المتعددة وغيرها من المعادلات ذات العلاقة. حيث قمنا بعملية دراسة محاكاة لعملية انتشار وامتصاص الموجات الكهرومغناطيسية ذوات التردد العالي في طبقة او شريحة بلازمية غير ممغنطة وذلك بطريقة التحليل العددي المسماة نطاق الفرق الزمني المحدود (Finite Difference Time Domain) التقريبية لمعادلات الموائع المتعددة للايونات الموجبة، الايونات السالبة، والالكترونات. لقد تم في هذا البحث مقارنة المعدل الزمني للقدرة الممتصة في حالة التحليل والمحاكاة العددية مع النتائج العالمية المتوفرة للبحوث السابقة وكانت متطابقة بشكل جيد.

١- المقدمة

ان انتشار الموجات الكهرومغناطيسية وتفاعلها مع البلازما يعد من المواضيع المهمة جدا في فيزياء البلازما [1]، وعلى وجه الخصوص نماذج الموجات الكهرومغناطيسية عالية التردد في بلازما متأينة جزئيا، كمثال على ذلك التفريغ البلازمي تحت الضغط الجوي والتوهجات البلازمية وغيرها، قد تمت دراستها بشكل مستفيض في السنوات الاخيرة كتطبيقات في عملية امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية [2] .

في البحوث السابقة لبحثنا هذا [4,3] ، تم الافتراض بان البلازما هي بلازما معتدلة ذات سماحية وفراغية ثابتتين، وذلك باهمال التاثيرات غير الخطية. وفي الحقيقة ان هنالك دائما نوعين من التاثيرات غير الخطية وهما: التاثير غير الخطي المتشتت (dispersive non- linear effect)، الناتج عن الاستجابة غير الخطية للتيار، وتاثيرات الحدود غير الخطية (non- linear terms) في معادلات الموائع المتعددة [6,5].وفي حالة الانظمة ذات الترددات العالية، فان استجابة البلازما للنماذج الكهرومغناطيسية هو من النوع الاول اي التاثير غير الخطي المتشتت والذي يؤثر بصورة كبيرة جدا على امتصاص القدرة. ولذلك، وفي هذا النظام، فان التصحيحات على التطبيقات الخاصة بالموجات المستوية في البحوث السابقة لبحثنا هذا يكون مهم جدا.

في هذا البحث، تم تطبيق نموذج المائع المتعدد (multi – fluid model) على ديناميكية البلازما لغرض عملية محاكاة ذاتية منسجمة لعملية استجابة البلازما للموجات الكهرومغناطيسية. ان هذا النموذج موضوع استنادا الى مجموعة من المعادلات التي لاتتضمن فقط الاستجابة غير الخطية للبلازما تجاه الموجات الكهرومغناطيسية الساقطة، وانما تاثيرات غير خطية اخرى في معادلات المائع المتعدد كمعادلات الاستمرارية والزخم لمختلف الجسيمات المشحونة. ولذلك فان هذا النموذج يزودنا بوصف تناغم ذاتي لديناميكية البلازما، لانتشار المجال الكهرومغناطيسي اضافة الى عملية امتصاص القدرة.

عندما تنتشر موجة كهرومغناطيسية في بلازما متاينة جزئيا، فان استجابة الالكترونات وتصادمات الالكترونات المحايدة تعد من اكبر الاسباب في عملية الفقدان وضياع طاقة الموجة. وتحت الظروف الجوية وبسبب نسبة الاوكسجين العالية والتي تعوق الالكترونات من ان تصبح ايونات سالبة، فان ذلك يمكن ان يقلل من مساهمة الالكترونات لاكثر من ٨٠% من عدد الشحنات السالبة الكلية. ولذلك فان امتصاص القدرة سوف يقل بصورة كبيرة.

٢- نموذج تعدد الموائع

ان هذا الجزء من البحث هو وصف لنموذج مطور، لمقتضيات هذا العمل، عن نموذج التعدد غير الخطي للموائع (non- linear multi- fluid model). ولتبسيط المسألة، مع الاخذ بنظر الاعتبار عدم فقدان جوهر النموذج الاصلي، سوف نفترض بان الموجات الكهرومغناطيسية تسقط بزاوية سقوط عمودية نسبة لشريحة البلازما ذات السمك (d). وبافتراض ان مقاييس الطول لمستوي الشريحة هي اطول بكثير من المقياس العمودي على الشريحة، فسوف نطبق تقريب البعد الواحد 1D لهذا النموذج.كذلك سنفترض بان البلازما متاينة تاينا ضعيفا، منتظمة وتصادمية. وباستخدام الاحداثيات الكارتيزية، فان الموجات الكهرومغناطيسية ستعامل على انها تتقدم باتجاه محور z، لحساب E_x, H_y فقط. ان المحاكاة ستتم على بلازما الآركون (Ar^+ plasma)، مع ايونات سالبة نتيجة الكهروسالبية القوية للاوكسجين (O_2^-).
ولذلك فان معادلات ماكسويل تكون بالشكل الآتي [7] :

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_o}\vec{\nabla}\times\vec{E} \quad \text{- - - - - - - - - (1)}$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_o}(\vec{\nabla} \times \vec{H} - \vec{J}) \quad (2) \text{ ------}$$

حيث ان كل من $\vec{E}$ و $\vec{H}$ هما المجالين الكهربائي والمغناطيسي على الترتيب، وان كل من ε_o و μ_o هما النفاذية والسماحية في الفراغ على الترتيب؛ وان $\vec{J}$ هي الاستجابة التيارية للبلازما والتي تعطى بالمعادلة الآتية [8]:

$$\vec{J} = e(n_+ u_+ - n_- u_- - n_e u_e) \quad (3) \text{ --------}$$

حيث ان e هو عنصر الشحنة وان n_+ ، n_- و n_e هي كثافات الايونات الموجبة، الايونات السالبة والالكترونات على الترتيب، وان u_+ ، u_- و u_e هي سرع الانسياق لهم على التعاقب.
ومن اجل ديناميكية البلازما، وحسب النموذج المطور للمائع المتعدد، سوف نكتب معادلات الزخم والاستمرارية للايونات الموجبة والايونات السالبة والالكترونات بالشكل الآتي [9]:

$$m_+ n_+ (\frac{\partial}{\partial t} + u_+ \cdot \vec{\nabla}) u_+ = e n_+ \vec{E} - m_+ n_+ u_+ \nu_{+n} \quad (4) \text{ -------}$$

$$m_s n_s (\frac{\partial}{\partial t} + u_s \cdot \vec{\nabla}) u_s = -e n_s \vec{E} - m_s n_s u_s \nu_{sn} (s = e, -) \quad (5) \text{ -----}$$

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (n_s u_s) = 0 (s = +, e, -) \quad (6) \text{ ---------}$$

حيث انه في البلازما المتاينة جزئيا، يمكن اعتبار معظم الاصطدامات تحدث بين الغاز المتعادل والجسيمات المشحونة بترددات تعطى بالعلاقة الآتية [10]:

$$\nu_{sn} = R n_s \sum_{sn} C_s (s = +, -, e) \quad (7) \text{ ---------}$$

حيث ان s ترمز الى جميع انواع الجسيمات (+ ، - ، e)، وان $\sum_{sn}$ يمثل المقطع العرضي للتصادم بين الجسيمات المشحونة (ذات النوع s) والغاز المتعادل، وان R هو معامل الارتباط التبادلي (correlative coefficient) [11].
لنفترض بان تعادلية الشحنة تعطى بالعلاقة $n_{e0} = \rho_{n+0} = \rho n_0$ وان $n_{-0} = (1-\rho) n_0$ حيث ان ρ تمثل المعلم الكسري للالكترون(electron fraction parameter). وبتقريب تفاضلي رئيسي غير

ضمني للمعادلات من (١) الى (٧)، فانه يمكن اشتقاق تقريبي لمعادلات من المرتبة الثانية مناسبة لعملية المحاكاة بواسطة التحليل العددي [13,12]. ان الشروط الحدودية للمجال والبلازما هي كالآتي:
في حدود بلازما الهواء، فانه يتم تطبيق الموجة المستوية كموجات متراكبة مكونة من الموجات الساقطة والمنعكسة. وفي حالة الحدود الاخرى، فان الموجة تنتقل بدون انعكاس. ولذلك يمكن ان تؤخذ اما كحد امتصاص كلي او كسطح بيني داخلي يقسم الطبقة البلازمية والجزء الاخر من البلازما وبذلك فانه يمكن دراسة الامتصاص في الطبقة البلازمية.

ان المحاكاة بواسطة التحليل العددي للمعادلات من (١) الى (٧) ينفذ بمرحلتين او طورين وهما:
الطور الاول (phase I) ويسمى بطور معادلة ماكسويل (Maxwell equation phase)، والطور الثاني (phase II) يسمى بطور معادلة البلازما (plasma equation phase). في الطور الاول نقوم بحل معادلات ماكسويل. وبعملية اختيار صحيحة لكثافة الالكترون الابتدائية ρn_0 وبتنفيذ عملية المحاكاة بواسطة التحليل العددي بطريقة نطاق الفرق الزمني المحدود للمعادلات من (١) الى (٦)، فسوف نحصل على الحالة شبه المستقرة للمجال الكهرومغناطيسي، حيث ان المعادلات (١) و (٢) مناظرة لتحليلات نطاق الفرق الزمني المحدود [17,16,15,14] وان المعادلة (٣) تمثل البلازما والتي تكون فيها جميع الكثافات والسرع الخاصة بالجسيمات معطاة بالمعادلات (٤) الى (٦). وفي عملية المحاكاة، والتي يتم فيها تقييس الطول بواسطة سمك البلازما (d)، نختار $\Delta z = 0.01$، بينما الفترة الزمنية للطور الاول هي $\Delta t = \frac{0.5\Delta z}{c}$، حيث ان c هي سرعة الضوء في الفراغ. وفي الطور الثاني، نقوم بحل ديناميكية البلازما.
وبالاستناد الى حالة المحصلة الناتجة من الطور الاول، يمكن اجراء الحسابات على المعادلات من (٤) الى (٦) في هذا الطور للحصول على الحالات شبه المستقرة للكثافة الالكترونية، ومن ثم استخدام هذه الكثافة الالكترونية في الطور الثاني كمدخل للطور الاول في الخطوة التي تليها. وبعملية اعادة بصورة تبادلية لهذين الطورين، يمكن انجاز الحالة شبه المستقرة النهائية.

٣- النتائج والمناقشة

ان المعلمات المستخدمة في الحسابات قد تم اختيارها كالآتي، والتي تنسجم مع تجارب عالمية عملية [14]، حيث انه قد تم اختيار كثافة البلازما لتكزن $n = 10^{17}\ m^{-3}$ ، وان سمك شريحة البلازما $d = 0.01\ m$ ، المقاطع العرضية $\Sigma_{+n} = \Sigma_{-n = 5 \times 10^{-19}\ m^2}$، $\Sigma_{-en = 10^{-20}\ m^2}$، درجات حرارة الجسيمات $T_+ = T_- = 300\ K$، $T_e = 2000\ K$، وان $\nu_{\ln}(l = +,-)$ تحسب من معادلة (٣) حيث ان ν_{en} معطاة وتساوي 10 GHz.

ان تاثيرات الايونات السالبة في امتصاص القدرة غير الخطي للبلازما قد تم حسابها في مدى ترددات مابين 1 الى 10 GHz. ولكل موجة كهرومغناطيسية ، فان الرقم النسبي للكثافة الالكترونية $\rho = \frac{n_e}{n_+}$ يزداد من 0.1 الى ١ ، وهي الحالة التي لاتوجد فيها مساهمة للايونات السالبة.

ان نسبة امتصاص القدرة الكلية $\frac{P_a}{P_i}$ في الحالة غير الخطية ضد مختلف اجزاء الكسور الالكترونية مبينة في الشكل رقم (١). حيث انه من الواضح مرة اخرى ان نجد بان قابلية امتصاص القدرة للبلازما تعتمد وبصورة رئيسية على التعداد الالكتروني. ان كلا من الطيف واعظم امتصاص للقدرة تتنامى مع اجزاء الكسور الالكترونية. وبدون ايونات سالبة، اي اذا كانت $\rho = 1.0$ ، نجد بان طيف الامتصاص يغطي مدى واسع، وايضا بنسبة امتصاص عالية. ان قمة الامتصاص يمكن ملاحظتها في النظام ذا التردد العالي

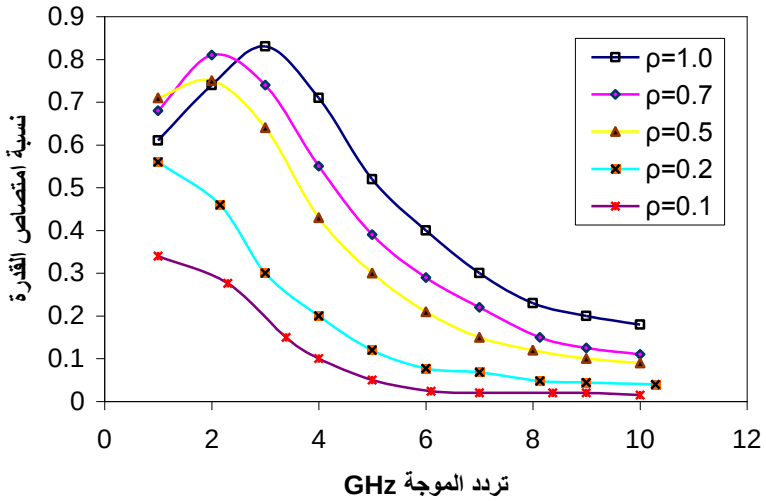
جدا. كما يمكن الملاحظة من الشكل رقم (٢)، $\rho = 1.0$ ، ومن الشكل رقم (٣)، $\rho = 0.2$ ، حيث تمت عملية محاكاة لموجة ذات تردد f = 5 GHz. وكذلك تمت ملاحظة ان سعة الموجة تقل عندما تقل المساهمة الالكترونية ρ . وبشكل واضح فانه بصورة مشابهة للنظام الخطي [4,3]، فانه للحالة غير الخطية، فان الايونات السالبة في طبقة البلازما يمكن ان تقلل امتصاص القدرة للموجات ذات الترددات العالية.

ان الاشكال (٤ ، ٥) تمثل التاثيرات غير الخطية لامتصاص القدرة في الطبقة البلازمية لكثافتين الكترونيتين مختلفتين $\rho = 1.0$ و $\rho = 0.2$ ، مقارنة مع النتائج المحتسبة في البحوث السابقة [3].

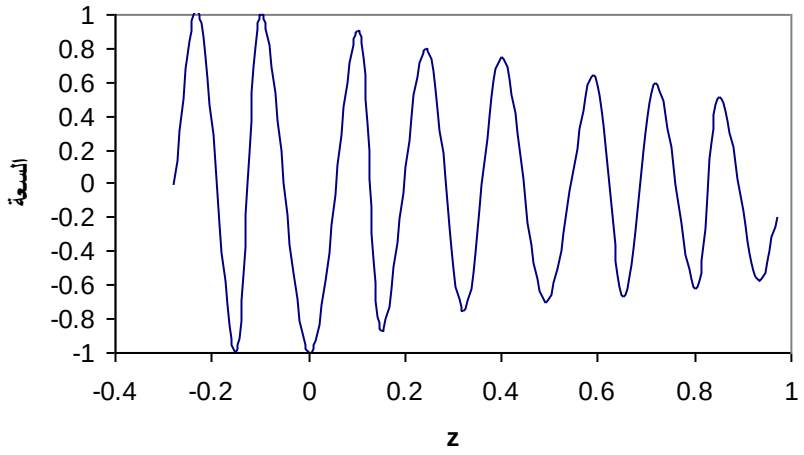
حيث يمكن ملاحظة اعلى قيمة لاجزاء الكسر الالكتروني في الشكل رقم (٢) واصغر قيمة لاجزاء الكسر الالكتروني في الشكل رقم (٣). وفي كلا الحالتين يمكن ملاحظة ان وجود التاثير غير الخطي يقلل امتصاص القدرة، وخصوصا في مدى الترددات العالية.

٤- الاستنتاجات

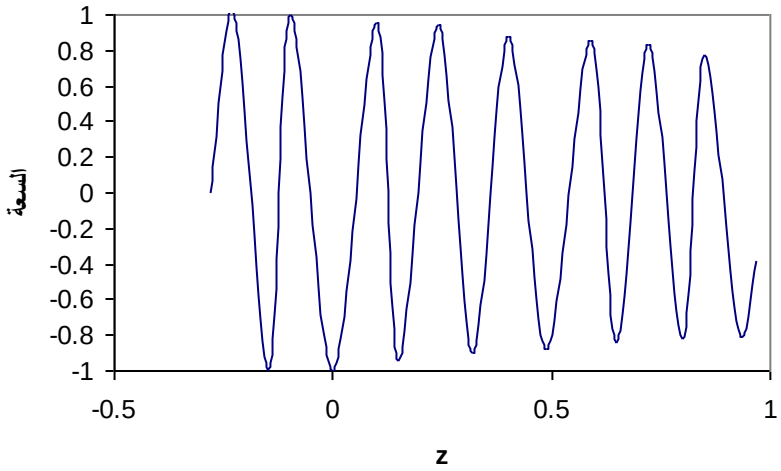
في هذا البحث استخدمنا طريقة التحليل العددي المسماة نطاق الفرق الزمني المحدود لغرض محاكاة ذاتية لمنظومة من معادلات المائع المتعدد التي تتضمن تاثير غير خطي بالغ الاهمية. ومقارنة مع النتائج العالمية المستحصلة سابقا فقد وجدنا بان التاثير غير الخطي يمكن ان يقلل من عملية امتصاص القدرة، وخصوصا في الانظمة ذات الترددات العالية. ولذلك فانه لترددات الموجات الكهرومغناطيسية بحدود ال GHz تكون النظرية غير الخطية ضرورية جدا في هذا المجال. اضافة الى ذلك قمنا بحساب تاثير الايونات السالبة المشحونة. ووجدنا بانه، وبشكل مشابه للحالة الخطية، فان وجود الايونات السالبة يسبب ايضا تقليل امتصاص القدرة في الطبقة البلازمية بشكل كبير جدا.



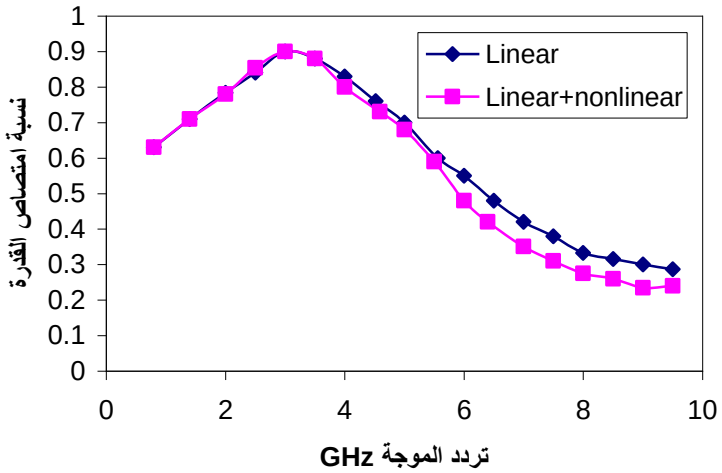
شكل رقم (١) طيف امتصاص القدرة غير الخطي، بدلالة النسبة بين القدرة الممتصة الى القدرة الساقطة، ضد تردد المجال الكهرومغناطيسي لمختلف المقادير للنسبة الالكترونية ρ=0.1,0.2, 0.5, 0.7, 1.0 .



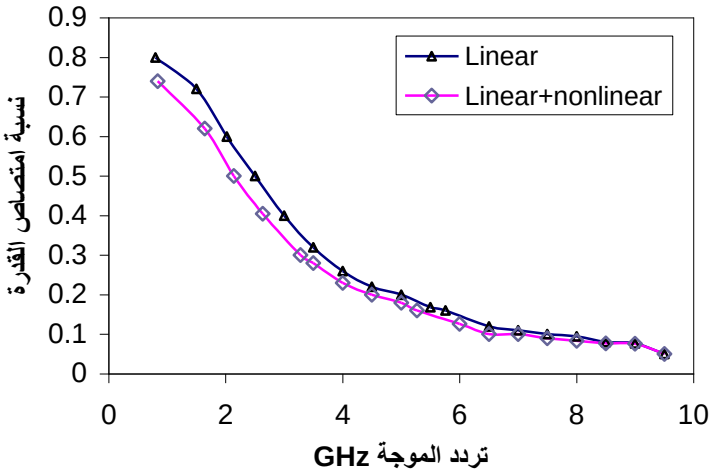
شكل رقم (٢) تقدم الموجة الكهرومغناطيسية القادمة من منطقة الهواء تحت الظروف الاعتيادية (z < 0) الى طبقة البلازما (0 < z < 1) ، للحالة التي يكون فيها ρ = 1.0 ، *f* = 5GHz.



شكل رقم (٣) تقدم الموجة الكهرومغناطيسية القادمة من منطقة الهواء تحت الظروف الاعتيادية (z < 0) الى طبقة البلازما (0 < z < 1) ، للحالة التي يكون فيها ρ = 0.2 ، *f* = 5GHz.



شكل رقم (٤) مقارنة بين طيف امتصاص القدرة الخطي وطيف امتصاص القدرة الكلي (الخطي + غير الخطي)، النسبة بين القدرة الممتصة الى القدرة الساقطة، في الحالة ρ= 1.0.



شكل رقم (٥) مقارنة بين طيف امتصاص القدرة الخطي وطيف امتصاص القدرة الكلي (الخطي + غير الخطي)، النسبة بين القدرة الممتصة الى القدرة الساقطة، في الحالة ρ= 0.2.

References

[1] Tatematsu Y. A., Saito T.K., (2004). "Effects of Magnetic Field Distribution on Power Absorption through Second Harmonic Electron Cyclotron Resonance Heating in Mirror Machines" , J. Plasma Fusion Res. Series, vol.6 , no.2: pp.669-672.

[2]. Koretzky E. Z. , Kuo S. P, (1998). "Characterization of an Atmospheric Pressure Plasma Generated by a Plasma Torch Array", J. Phys. Plasmas, vol.5, no.10: pp.3774-3780.

[3] Guo B. N., Wang X. G., (2005). "Power Absorption of High Frequency Electromagnetic Waves in a Partially Ionized Plasma Layer in Atmosphere Conditions", J. Plasma Sci. & Tech., vol.7, no.4: pp.2645- 2648.

[4] Guo B. N., Wang X. G., (2005). "Power Absorption of High Frequency Electromagnetic Waves in a Partially Ionized Magnetized Plasma", J. Phys. Plasmas, vol.12, no.8: pp.4506- 4512.

[5] Vidmar R. J., (1990). "On The Use of Atmospheric Pressure Plasmas as Electromagnetic Reflectors and Absorbers", J. IEEE Trans. Plasma Sci., vol.18, no.4: pp.733- 741.

[6] Laroussi M.K., Roth J. R., (1993). "Numerical Calculation of The Reflection, Absorption, and Transmission of Microwaves by a Nonuniform Plasma Slab", J. IEEE Trans. Plasma Sci., vol.21, no.4: pp.366- 372.

[7] Ginzberg V. L., (2004). "The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas". pp.187-229, 3rd Edition, New York: Pergamon.

[8] Heald M. A., Wharton C. B., (2002). "Plasma Diagnostics with Microwaves". pp. 88-105, 2nd Edition , New York: Krieger.

[٩] Shamrai K.P., Slobodyan V.M., Virko V.F., (2006). "Nonlinear Phenomena in Helicon Plasmas", J. Problems of Atomic Sci.
Technol. Ser., vol. 12, no.6: pp.84-88.

[10] Koch R.L., (2006). "The Coupline of Electromagnetic Powerto Plasmas", J. Trans. Of Fusion Sci. and Tech.., vol.49, no.3: pp.177-186.

[11] Ruch G.T., Barrick D. E., (1995). "Radar Cross Section Handbook". pp. 54-67, 3rd Edition, New York: Plenum.

[12] Yee K.S., (1966). "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media ", J. IEEE Trans on Antennas and Prop., vol.14, no.3: pp.302-307.

[13] Shamrai K.P., Slobodyan V.M., Virko V.F., (2005). ”Wave Stimulated Phenomena in Inductively Coupled Magnetized Plasmas”, J. Plasma Phys. Control. Fusion, vol. 47: pp.A307-315.

[14] Young J. L., (1994). “ A Full Finite Difference Time Domain Implementation for Radio Wave Propagation in a Plasma, J.Radio Sci., vol.29, no.6: pp.1513–1522.

[15] Taflove A.S., (1995). Computational Electrodynamics- The Finite-Difference- Time- Domain Method. pp.134-178, 2nd Edition, Norwood, MA: Artech House.

[16] Ikhlef N. A., Rezig A.M., (2007). “ Situation Cavity Effect on Power Absorbed by Plasma Microwave”, J. Engineering and Appl. Sci., vol. 2, no.7: pp.1157-1160.

[17] Destler W.W., DeGrange J.E., Fleischmann H.H., (1991). “Experimental Studies of High Power Microwave Reflection, Transmission, and Absorption from a Plasma-Covered Plane Conducting Boundary “, J. Appl. Phys., vol.69 , no.6: pp.313-319.

(تاريخ استلام البحث).....(٢٠٠٩/٩/٣٠)
(تاريخ قبول نشر البحث).....(٢٠١٠/٣/٢)