# الفصل الخامس

# Chapter (5 )

## النتائج ومناقشتها

## Results and discussion

### (5-1) مقدمة (5-1)

**Introduction**

أجريت الحسابات لتفسير نتائج القياسات المعملية التي اجريت بواسطة ليو (Liu et al, 2005) لدراسة تغير عتبة شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار السيلكا المنصهرة مع نبضات أشعة الليزر في مدى القليل من البيكوثانية و الفيمتوثانية . استخدم لذلك نموذج عددي يعتمد على حل معادلة المعدل لكثافة الإلكترونات بأخذ في الاعتبار عمليات التأين الفوتوني والتأين التدريجي لزيادة نمو كثافة الإلكترونات بجانب عمليتي انسياب الإلكترونات خارج حيز التفاعل وإعادة اتحادها مع الفجوات كعمليات فقد لهذه الكثافة.

وطبق برنامج حسابي لحل هذه المعادلة يعتمد على طريقة رونج– كوتا ذات الرتبة الرابعة في تكامل معادلة المعدل تحت الشروط المعملية التي استخدمها ليو ومجموعته والتي فيها تم تشعيع حجم من السيلكا المنصهرة بأبعاد 10×5×3 mm بواسطة أشعة ليزر ذات طول موجي 800nm وطول نبضة يتراوح ما بين (240 fs-2.5 ps) . وقد استخدم نظامين بصريين لتجميع أشعة الليزر على العينة ذات فتحات عددية تساوي 0.126 و 0.255 والتي تعطي أنصاف أقطار لحيز التفاعل لحزمة جاوسية الشكل عند البؤرة مساوياً 2.0 µm و 0.95 µm على الترتيب . ويعطي خارج البرنامج الحسابي أولاً قيماً لتغير عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار مع طول نبضة الليزر لقيمتي الفتحة العددية تحت الاختبار كما سنوضح فيما يلي.

## (5-2) تعيين عتبة شدة الاستضاءة الـ 79 لانهيار – مقارنة مع القياسات المعملية

**(5-2) Determination of the breakdown threshold intensity–comparison with the experimental measurements**

للحصول على قيم محسوبة لعتبة شدة الاستضاءة بدأت الحسابات بتعيين تغير كثافة الإلكترونات في نهاية زمن النبضة مع شدة الاستضاءة لكل قيمة من أزمنة النبضة تحت الاختبار ، كما توضح الأشكال (5-1-a) لقيمة الفتحة العددية 0.126 و(5-1-b) للفتحة العددية 0.255 . وبمعلومية شرط الانهيار تم تحديد قيمة عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار لكل زمن من أزمنة النبضة تحت الاختبار.

يوضح الشكل (5-2) مقارنة بين القيم المحسوبة لعتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار والقيم المقاسة عملياً بواسطة ليو ومجموعته (Liu et al ,2005) كدالة في زمن النبضة (a) للفتحة العددية 0.126 .و(b) للفتحة العددية 0.255 . يتضح من هذا الشكل توافق بين القيم المحسوبة لعتبة شدة الاستضاءة والقيم المقاسة عملياً من حيث السلوك للنبضات التي تزيد عن ≤ 395 fs ، وذلك في حدود الانحراف المعياري للقياسات المعملية مما يؤكد صلاحية النموذج العددي المطبق . كما نلاحظ أيضاً انخفاض قيم عتبة شدة الاستضاءة بشكل ملحوظ على مدى أزمنة النبضة إلى 1.0 ps بعدها تبدأ عتبة شدة الاستضاءة في الانخفاض الطفيف يتبعها زيادة بسيطة عند زمن نبضة يزيد عن ≤ 2.0 ps . من هنا نجد أنه بغض النظر عن زمن النبضة القصير فإنه يمكن تقسيم سلوك عتبة شدة الاستضاءة مع الزمن إلى منطقتين ،حيث يمثل المدى 395 fs-1.0 ps أزمنة النبضة متناهية القصر والتي عندها تعاني عتبة الشدة من انحدار سريع مع زيادة الزمن المنطقة الثانية والمحصورة في المدى ما بين 1.0 ps-2.5 ps وفيها لا يحدث تغيراً ملحوظاً لعتبة شدة الاستضاءة مع الزمن.

ونظراً للترابط بين شدة الاستضاءة وطاقة أشعة الليزر وفقاً للعلاقة $E_{th} = I_{\mathrm{th}}\pi r_o\tau$ حيث$r_o$:نصف قطر الحزمة المجمعة.يمثل الشكل (5-3) مقارنة بين القيم المحسوبة لعتبة الطاقة اللازمة للانهيار وتلك المقاسة عملياً كدالة في زمن النبضة لقيمتي الفتحة العددية 0.126(a) ،و0.255(b) .نلاحظ من الشكل التوافق بين القيم المقاسة عملياً والمحسوبة عند

أزمنة نبضة تزيد عن 300 fs بينما عند 250 fs فنجد أن القيم المحسوبة تقع أدنى كثيراً عن تلك المقاسة عملياً لكلا قيمتي الفتحة العددية.

ويعزى هذا التغير في سلوك عتبة شدة الاستضاءة (الطاقة) مع زمن النبضة إلى تغير العمليات الفيزيائية التي تحكم ظاهرة الانهيار ( العمليات المسؤولة عن تكون كثافة الإلكترونات) . كما سنوضح فيما يلي.

## (5-2-1) التكون الزمني لكثافة الإلكترونات

## (5-2-1) Time evolution of the electron density

أعطت نتائج الحسابات قيماً توضح نمو كثافة الإلكترونات خلال زمن النبضة كما يوضح شكل (5-4) (a)عند الفتحة العددية 0.126 لأزمنة نبضة 395 fs (منحنى 1) و1400 fs (منحنى 2) وأيضاً 2200 fs (منحنى 3) ، و شكل (b)عند الفتحة العددية 0.255 لأزمنة نبضة 740 fs (منحنى 1) و1300 fs (منحنى 2) وأيضاً 2280 fs (منحنى 3) . نلاحظ هذا الشكل أن السلوك العام للتكون الزمني لكثافة الإلكترونات يتشابة في الحالتينa,b. كما أنه يبدأ بقيم ابتدائية تختلف باختلاف طول نبضة الليزر ليتزايد سريعاً في المراحل الاولى لزمن النبضة بعدها يزداد تدريجياً ، ثم ينتهي بحالة من الاستقرار خلال النصف الأخير من زمن النبضة . كما نلاحظ تطابق قيم كثافة الإلكترونات (منحنى 1و2و3) لجميع أزمنة النبضة في الحالتين a وb.

ويشير الاختلاف في كثافة الإلكترونات عند بداية زمن النبضة إلى اختلاف معدل التأين الفوتوني والذي يعتمد أساسا على قيمة عتبة شدة الاستضاءة المناظر لكل نبضة. لذلك نرى أنه عند النبضات القصيرة فإن التكون الزمني يبدأ بقيم مرتفعة ، بينما عند النبضات الطويلة فإن قيمة كثافة الإلكترونات عند بداية زمن النبضة تناظر فقط قيمة الكثافة الابتدائية التي تم فرض تواجدها عند بداية إشعال الليزر .أما التزايد السريع في كثافة الإلكترونات خلال النصف الأول من زمن النبضة فيرجع إلى عملية التأين التدريجي والتي يزيد معدلها في هذه الفترة الزمنية.

وتعزى حالة استقرار كثافة الإلكترونات خلال النصف الأخير من زمن النبضة إلى انخفاض كل من معدل التأين الفوتوني والتأين التدريجي نتيجة لانخفاض شدة الاستضاءة كما يوضح شكل (5-5) (a) 0.126 و(b) 0.255 . والذي يمثل التغير الزمني لشدة استضاءة جاوسية الشكل مع التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات خلال نبضة الليزر . ويشير هذا الاستقرار إلى المساهمة الضعيفة أو المهملة لعمليات الفقد التي غالباً ما تحدث خلال النصف الأخير من زمن النبضة لتؤدي إلى الانخفاض في كثافة الإلكترونات خلال هذه الفترة. وهذا ما تؤكده الجداول (5-1) لقيمتي الفتحة العددية 85 ،0.255(b) توضح هذه الجداول تغير كل من شدة الاستضاءة وكذلك كثافة الإلكترونات خلال زمن النبضة عند وجود وإهمال كل من عمليتي فقد الإلكترونات نتيجة للانسياب خارج حيز التفاعل وإعادة الاتحاد . نلاحظ التغير الطفيف في قيم كل من عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار وكذلك كثافة الإلكترونات عند إهمال هذه العمليات .

## (5-2-2) التغير الزمني لمعدل التأين

## (5-2-2) Temporal variation of the ionization rate

كما رأينا من شكل (5-4) أن نمو كثافة الإلكترونات يبدأ بزيادة سريعة في المراحل الأولى لزمن النبضة .يتبعها زيادة تدريجية ثم حالة من الاستقرار في نهاية زمن النبضة ، ويشير ذلك إلى اختلاف معدل التأين خلال مراحل نبضة الليزر. لذلك يوضح شكل (5-6) التغير الزمني لمعدل التأين كدالة في الزمن الموحد لأزمنة النبضة الموضحة في الشكل للفتحة العددية 0.126(a) . نلاحظ في هذا الشكل أن معدل التأين يتناقص تدريجياً مع زيادة الزمن كما أنه يزداد مع قصر نبضة الليزر. وتشير الزيادة في معدل التأين للنبضة (395 fs) إلى الدور الفعال الذي تلعبه عملية التأين الفوتوني في نمو كثافة الإلكترونات . كما يوضح التغير في سلوك معدل التأين خلال النصف الأخير من زمن النبضة للنبضة (2200 fs) مساهمة عملية التأين بالتصادم الإلكتروني جنباً إلى جنب لعملية التأين الفوتوني في زيادة نمو كثافة الإلكترونات خلال هذه الفترة.

ومع زيادة قيمة الفتحة العددية شكل0.255 (b) ، نجد أن معدل التأين يسلك نفس السلوك حيث تتناقص قيمته مع زيادة الزمن وكذلك طول نبضة الليزر. كما يوضح هذا الشكل أن عملية

التأين الفوتوني هي العملية السائدة في زيادة نمو كثافة الإلكترونات . ويؤكد ذلك التغير الطفيف في معدل التأين في النصف الأخير لزمن النبضة (منحنى 2) ويزداد هذا التغير مع زيادة طول النبضة (منحنى 3) . وفقاً للشكل الجاوسي لشدة الاستضاءة فإن الحجم البؤري يأخذ شكلاً اسطوانياً بنصف قطر $w_o$ وطول $2\ z_R$ وبناءً على ذلك فيما يلي نوضح توزيع كثافة الإلكترونات على امتداد كل من المسافة المحورية والمسافة القطرية للحجم البؤري .

## (5-2-3) توزيع كثافة الإلكترونات في الحجم البؤري

**(5-2-3) Distribution of the electrons density in the focal volume**

فيما سبق ارتكزت الدراسة على التغير الزمني لكثافة الإلكترونات خلال زمن النبضة واستكمالاً لهذه الدراسة أجريت الحسابات للحصول على التغير البعدي لكثافة الإلكترونات في الحجم البؤري . وذلك بأخذ في الاعتبار التغير الزمني والبعدي لشدة استضاءة أشعة الليزر في الحجم البؤري على شكل جاوسي . و أعطت نتائج الحسابات علاقة للتغير الزمني لكثافة الإلكترونات عند قيم مختلفة على امتداد كل من المسافة القطرية r و المسافة المحورية z لقيمتين من زمن النبضة لكل فتحة عددية. الأشكال (5-7)و(5-8) تمثل التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات للفتحة العددية 0.162 عند زمن نبضة 395 fs و 2200 fs على الترتيب لقيم المسافة المحورية.(I) z=0 ، (II)$z=1.57\times10^{-3}$ cm ، (III) $z=3.24\times10^{-3}$ cm . كما توضح الأشكال (5-9) و (5-10) نفس العلاقة ولكن للفتحة العددية 0.255 ولثلاثة قيم على المسافة المحورية z=0 ، $z=3.542\times10^{-4}$ cm ، $z=5.313\times10^{-4}$ cm لأزمنة نبضة 740 fs و 2280 fs على الترتيب.

يتضح من هذه الأشكال أن كثافة الإلكترونات التي تحقق شرط الانهيار تناظر فقط النقطة المركزية للحجم البؤريZ=0 و r=0 . وتحيط بهذه المنطقة مناطق تأين تنحدر فيها كثافة الإلكترونات على امتداد كل من المسافة المحورية والمسافة القطرية . ويتشابه هذا السلوك لجميع أزمنة النبضة ولكل من الفتحتين العدديتين مع اختلاف قيم كثافة الإلكترونات وفقاً لطول زمن النبضة .

وتوضيحاً لهذه الدراسة أجريت الحسابات لدراسة التوزيع الزمني والبعدي لشدة الاستضاءة على امتداد كلاً من المسافة القطرية والمحورية للحجم البؤري كما سنوضح فيما يلي.

## (5-2-4) التغير البعدي لشدة الاستضاءة فـ ، الحجم البؤري



**(5-2-4) Spatial variation of the intensity in the focal volume**

بأخذ في الاعتبار التغير البعدي لشدة الاستضاءة في الحجم البؤري، تم الحصول على علاقة توضح تغير شدة الاستضاءة على امتداد كل من المسافة القطرية والمحورية . شكل (5-11) يوضح تلك العلاقة للفتحة العددية 0.126 عند أزمنة نبضة (I) 395 fs و1400 fs(II) وأيضاً 2200 fs(III) ، و شكل (5-12) يعطي نفس العلاقة للفتحة العددية 0.255 ولأزمنة نبضة 740 fs(I) و1300 fs(II) وأيضاً 2280 fs(III) . حيث توضح هذه الأشكال تغير شدة الاستضاءة على امتداد المسافة المحورية عند قيم مختلفة للمسافة القطرية تبدأ من المركز (r=0) .نلاحظ من هذه الدراسة أن شدة الاستضاءة التي تحقق شرط الانهيار هي التي تناظر النقطة المركزية للحجم البؤري أي( r =0 و z=0 )، وهذا يشير إلى أن الانهيار يحدث كلية في حيز ضيق جداً حول مركز الحجم البؤري وتحيط به مناطق تأين لا تصل بالوسط إلى درجة الانهيار تمتد حتى نهاية قطر الحجم البؤري وعلى امتداد المسافة المحورية له.

ويوضح ذلك الشكل (5-13) والذي يمثل العلاقة بين الانحدار في شدة الاستضاءة على امتداد كل من (i)المسافة المحورية و(ii)المسافة القطرية عند نفس الشروط المعملية التي أخذت في الاعتبار.

يتضح من هذا الشكل أن شدة الاستضاءة تنخفض بطريقة أسية عن قيمة عتبة الشدة اللازمة للانهيار كلما ابتعدنا عن المركز على امتداد المسافة المحورية والمسافة القطرية للحجم البؤري. كما نلاحظ أن قيمة عتبة الانهيار تساوي حوالي ما يزيد عن سبعة أضعاف قيمتها عند نهاية المسافة المحورية للحجم البؤري. و يدل ذلك على الانحدار السريع لشدة الاستضاءة على امتداد هذه المسافة حيث تتكون البلازما فقط في منطقة محيطة بالمركز ،

وكذلك الحال بالنسبة لقيمة شدة الاستضاءة عند نهاية المسافة القطرية مما يؤكد الانحسار الملحوظ للبلازما المتكونة تحت هذه الشروط.

وبغض النظر عن قيمة قطر حيز التفاعل فنجد أن شدة الاستضاءة على امتداد كل من المسافة القطرية والمحورية تعاني أيضاً من انخفاض بطريقة أسية نظراً للتوزيع الجاوسي لشدة الاستضاءة في الحجم البؤري .

وتأكيداً لهذه الدراسة تم تمثيل مسارات توزيع شدة الاستضاءة وكذلك البلازما المتكونة عند نهاية زمن النبضة في الشكل (14-5) للفتحة العددية 0.126 لأزمنة نبضة 395 fs(I) و1400 fs(II) و 2200 fs(III) .وبد 100 (15-5) نفس العلاقة ولكن عند الفتحة العددية 0.255 ولأزمنة نبضة 740 fs(I) و1300 fs(II) وأيضاً 2280 fs(III) .

من هذه الأشكال يتضح أن قيم شدة الاستضاءة التي تحقق شرط الانهيار(الشكل العلوي) و البلازما المتكونة (الشكل السفلي) تشغل حيز ضيق جداً من الحجم البؤري ينحصر حول مركزه ،بغض النظر عن اختلاف طول نبضة الليزر أو النظام البصري المستخدم لتجميع الحزمة . يحيط بهذه المنطقة مناطق تنحدر فيها كلاً من قيم شدة الاستضاءة وكذلك كثافة الإلكترونات كلما ابتعدنا عن المركز على امتداد كل من المسافة المحورية والقطرية وتتكون منطقة الانهيار بشكل متماثل حول المركز تحيطها مسارات تمثل توزيع شدة الاستضاءة ومناطق التأين في الحجم البؤري.

## (5-3)تحديد عتبة شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الفيمتوثانية – مقارنة مع القياسات المعملية

## (5-3) Calculation femtosecond of the breakdown threshold intensity - comparison with the experimental measurements

أجريت الحسابات بتطبيق نموذج انهيار الفيمتوثانية والذي يأخذ في الاعتبار التغير الزمني والبعدي وطول الانتشار لنبضة الليزر عند حساب عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار. في هذه الحالة يتغير نصف القطر على امتداد المسافة المحورية للحجم البؤري كما يوضح شكل

(5-16) لقيمتي الفتحة العددية 0.126(a) و 0.255 (b) . نلاحظ في هذا الشكل أن الحجم البؤري يزداد مع صغر قيمة الفتحة العددية.كما نلاحظ أن قيمة القطر تساوي $2w_{\circ}=4.0\ \mu m$ وطول رايلي يساوي $z_R=3.36\ \mu m$ للفتحة العددية (a). بينما في للفتحة العددية(b) تكون قيمة القطر$2w_{\circ}=1.9\ \mu m$ ، وطول رايلي $z_R=1.6\ \mu m$ .بناء على ذلك فإن القيمة العظمى لشدة الاستضاءة تأخذ قيماً مختلفة على امتداد المسافة المحورية (طول رايلي).ونظراً لقصر نبضة الليزر يؤخذ في الاعتبار طول انتشار النبضة ،والتغير الزمني لشدة الاستضاءة وعليها نجد أن كل من التغير البعدي والتغير الزمني يعتمد على المسافة المحورية z . شكل (5-17) يوضح مقارنة بين القيم المحسوبة لعتبة شدة الاستضاءة والقيم المقاسة عملياً عند نفس الشروط المعملية لتجربة ليو ومجموعته (a) للفتحة العددية 0.126 و (b) للفتحة العددية 0.255 . نلاحظ في هذا الشكل أن القيم المحسوبة تقع أعلى القيم المقاسة عملياً على مدى أزمنة النبضة التي تزيد عن 400 fs ، بينما يحدث توافق معقول عند النبضات القصيرة وتكون أكثر توافقاً للفتحة العددية 0.255 أي في حالة الحجم البؤري الصغير. وربما يعزى الارتفاع في عتبة شدة الاستضاءة للنبضات التي تزيد عن 400 fs إلى زيادة قيم $N_z$ عن الواحد الصحيح ، وذلك لاستخدام فتحات عددية تعطي أقطاراً صغيرة للحجم البؤري والذي يترتب عليه قصر طول رايلي $Z_R$ مما يؤدي إلى زيادة Nz . وهذا ما يؤكده شكل (5-18) الذي يمثل العلاقة بين تغير عتبة شدة الاستضاءة على امتداد المسافة المحورية للقيم المختلفة لأزمنة النبضة (a) للفتحة العددية 0.126 و (b) للفتحة العددية 0.255 . نلاحظ من هذا الشكل أنه مع زيادة طول نبضة الليزر فإن قيمة عتبة شدة الاستضاءة التي تحقق شرط الانهيار وجد أنها تتحقق عند مسافة تقترب من مركز الحجم البؤري.أما للنبضات القصيرة فإن الانهيار يحدث عند نقطة على امتداد المسافة المحورية تبعد عن المركز. وتزيد قيمة عتبة شدة الاستضاءة في هذه الحالة عن تلك المصاحبة للنبضات الطويلة. ونظراً لأن التوافق بين القيم المقاسة عملياً والمحسوبة وجد فقط عند قيمتي النبضة القصيرة لكل فتحة عددية، لذلك تم تمثيل التغير الزمني لكل من شدة الاستضاءة وكثافة الإلكترونات عند النقطة المحورية التي تحقق عندها الانهيار لهاتين القيمتين وذلك عند قيمتي الفتحة العددية تحت الاختبار.

يتضمن شكل (5-19) كلاً من (I)التغير الزمني لشدة الاستضاءة لزمن نبضة 250 fs (منحنى1) و395 fs (منحنى 2) للفتحة العددية 0.126. وكذلك التكوين الزمني عند النقطة المحورية z التي تحقق شرط الانهيار(منحنى 1 ) وعند مركز الحجم البؤري (منحنى 2)

لزمن نبضة 250 fs (II) ولزمن نبضة 395 fs شكل (III) . أما شكل(5-20) يعطي نفس العلاقة ولكن للفتحة العددية 0.255 ولأزمنة نبضة 250 fs و420 fs.

توضح هذه الأشكال قيم شدة الاستضاءة على امتداد المسافة المحورية z كما يمكن منها تحديد قيمة z التي يحدث عندها الانهيار. نلاحظ أن قيمة الشدة عند مركز الحجم البؤري أي عند z=0 تتخطى بشكل واضح قيمة عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار في حالة النبضة 250 fs بينما تقترب قيمة عتبة الشدة اللازمة للانهيار من القيمة العظمى لشدة الاستضاءة عند مركز الحجم البؤري بالنسبة للنبضة 395 fs . يوضح هذا الفرق شكل (II) حيث تزداد كثافة الإلكترونات كثيراً عند نهاية زمن النبضة في مركز الحجم البؤري (منحنى 2) عن القيمة التي تحقق شرط الانهيار (منحنى1) بينما تقترب قيم كثافة الإلكترونات بالنسبة للنبضة 395 fs كما يوضح (منحنى 1و2) . وكذلك بالنسبة للفتحة العددية 0.255 شكل(5-20) مع ملاحظة اقتراب النقطة المحورية من المركز في حالة النبضة 250 fs وهذا ما يؤكده شكل (II) للتكوين الزمني لكثافة الإلكترونات عند النقطة التي حدث عندها الانهيار (منحنى 1) ومركز الحجم البؤري (منحنى 2) بينما عند زمن النبضة 420 fs نجد أن كثافة الإلكترونات عند قيمتي z تكادا أن تكونا منطبقتين.



من هذه الدراسة يمكن الحصول على علاقة بين طول نبضة الليزر وحجم البلازما المتكونة والذي يوضحه شكل (5-21) و(5-22) للفتحة العددية 0.126 و0.255 على الترتيب ، حيث يمثل شكل (5-21) تغير كثافة الإلكترونات على امتداد المسافة المحورية ويشير السهم إلى كثافة الإلكترونات التي تحقق شرط الانهيار وموضع حدوثه على المسافة Z ومنها يمكن تحديد طول البلازما المتكونة ، وذلك لزمن نبضة 250 fs (I) ولزمن نبضة 395 fs(II). نلاحظ في هذا الشكل أن طول البلازما يزداد مع قصر نبضة الليزر وصغر قيمة الفتحة العددية كما هو واضح من شكل (5-22) ،(I) عند زمن نبضة 250 fs و(II) عند الزمن 420 fs .

ولدراسة تأثير التغير الموضعي Z على التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات شكل (5-23) يمثل مقارنة بين كثافة الإلكترونات المحسوبة باستخدام النموذج الكلاسيكي ونموذج الفيمتوثانية لطول نبضة 250 fs ، (a) للفتحة العددية 0.126 و (b) للفتحة العددية 0.255 .يظهر هذا الشكل الاختلاف في كثافة الإلكترونات عند بداية زمن النبضة المحسوبة بواسطة النموذجين حيث تبدأ الكثافة للنموذج الكلاسيكي بقيم منخفضة تتزايد سريعاً إلى منتصف

النبضة بعدها تعاني من زيادة تدريجية تنتهي بحالة من الاستقرار . أما الكثافة المحسوبة بنموذج الفيمتوثانية فنجد أنها تبدأ بقيم مرتفعة نسبيا لتتزايد تدريجياً حتى منتصف النبضة وتنتهي بحالة من الاستقرار خلال النصف الأخير منها . من هنا نجد أن الانهيار يحدث بطريقة أكثر واقعية باستخدام نموذج الفيمتوثانية حيث تعمل عملية التأين الفوتوني على الحصول على كثافة عالية من الإلكترونات منذ المراحل الابتدائية لزمن النبضة.

## (5-3-1) توزيع شدة استضاءة أشعة الليزر وكثافة الإلكترونات

121

**(5-3-1) Distribution of laser intensity on density**

كما رأينا من الدراسة السابقة أن شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار وكذلك كثافة الإلكترونات المناظرة لها تتغير مع تغير كل من زمن نبضة الليزر وقيمة الفتحة العددية أي النظام البصري المستخدم لتجميع حزمة الليزر ،بالإضافة إلى ذلك أشارت الدراسة أن منطقة الانهيار تتغير بتغير كل من هذين العاملين .لذلك أجريت دراسة لمقارنة توزيع كل من شدة الاستضاءة وكثافة الإلكترونات في الحجم البؤري عند أزمنة نبضة 250 fs و 395 fs عند نفس الفتحة العددية وبنفس قيمة نبضة الليزر عند قيمتين مختلفتين للفتحة العددية.

شكل (5-24) يمثل توزيع شدة الاستضاءة في الحجم البؤري للفتحة العددية 0.126 لنبضة الليزر 250 fs(I) و 395 fs(II) .نلاحظ من هذا الشكل أن المنطقة التي تتحقق فيها قيم عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار تتزايد مع قصر نبضة الليزر . بالإضافة إلى أن قيمة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار تتزايد مع قصر نبضة الليزر . وتكون أعلى قيمة لشدة الاستضاءة في كلا الحالتين على امتداد المسافة القطرية المناظرة لمركز المسافة المحورية . وتنحدر قيمة الشدة كلما ابتعدنا على جانبي المركز أي تأخذ شكلاً متماثلاً حول المركز وفقاً للتوزيع الجاوسي لشدة الاستضاءة . ويتبع ذلك توزيع كثافة الإلكترونات كما يوضح شكل (5-25) حيث يمثل شكل (I) توزيع كثافة الإلكترونات في الحجم البؤري على امتداد كل من المسافة المحورية والقطرية لزمن نبضة 250 fs ، بينما شكل (II) يمثل نفس العلاقة ولكن

لزمن نبضة 395 fs . نلاحظ هنا أيضاً أن كثافة الإلكترونات التي تحقق شرط الانهيار تقع على مسافة تقترب من المركز لزمن النبضة 395 fs شكل (II) كما يوضح السهم بينما تبتعد عن المركز مع قصر نبضة الليزر 250 fs شكل (I) ، ويشير ذلك إلى أن البلازما المتكونة بنبضات قصيرة تأخذ حجماً أكبر من تلك المتكونة بنبضات طويلة. وكذلك الحال بالنسبة للفتحة العددية 0.255 عند مقارنة توزيع كل من شدة الاستضاءة وكثافة الإلكترونات المناظرة لقيمتي أزمنة النبضة بطول 250 fs و420 fs كما توضح الأشكال (5-26) (5-27) (II) ,(I) على الترتيب حيث نجد أنه مع قصر نبضة الليزر فإن شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار تتكون على مسافة محورية تبتعد عن مركز الحجم البؤري شكل (5-26-I) عن تلك المتكونة بواسطة النبضة 420 fs شكل (5-26-II) وتُمثل توزيع كثافة الإلكترونات المناظرة لهذه الشدة في شكل (5-27-I , II) حيث نجد أيضاً أن كثافة الإلكترونات التي تحقق شرط الانهيار تتكون على مسافة محورية أطول للنبضة 250 fs عنها في حالة النبضة 420 fs كما توضح الأسهم المبينة في كل من شكل (I),(II) . من هنا نجد أن حجم البلازما المتكونة للنبضة 250 fs يزيد عن حجمها في حالة النبضة 420 fs .

بالإضافة إلى ذلك أوضحت مقارنة توزيع كثافة الإلكترونات في الحجم البؤري لنفس طول النبضة عند قيمتي الفتحة العددية ،أن البلازما المتكونة بواسطة الفتحة العددية الصغيرة تكون أكبر حجماً عنها للفتحة العددية الكبيرة. وهذا يتفق مع قطر حيز التفاعل في كلا الحالتين حيث أن قيمتة للفتحة العددية 0.126 يساوي 4µm بينما يساوي فقط 1.9µm في حالة الفتحة العددية 0.255 .

وتأكيداً لهذه الدراسة يمثل شكل(5-28) التغير في طول البلازما المتكونة مع نبضة الليزر عند الفتحة العددية 0.126(a) و 0.255(b) نلاحظ من هذا الشكل أن طول البلازما يزداد مع قصر نبضة الليزر لكلا الفتحتين ويزداد طول البلازما أيضاً مع صغر قيمة الفتحة العددية كما يوضح شكل (a).

من هذه الدراسة يتضح أن اختيار طول نبضة الليزر يحدد حجم البلازما وفقاً للتطبيقات المختلفة لها ، حيث يتحدد هذا الحجم وفقاً لطول نبضة الليزر وكذلك النظام البصري المستخدم لتجميع الحزمة.

ولدراسة الاختلاف في شكل البلازما المتكونة عند استخدام النموذج الكلاسيكي ونموذج الفيمتوثانية أجريت مقارنة بين توزيع كثافة الإلكترونات في الحجم البؤري لكلا الحالتين عند

نفس طول نبضة الليزر 395 fs كما يوضح شكل (5-14) .نلاحظ في هذا الشكل أن البلازما المتكونة وفقاً للنموذج الكلاسيكي تأخذ شكلاً كروياً وتتكون فقط عند المركز . بينما تأخذ شكلاً اسطوانياً على امتداد المسافة القطرية في حالة نموذج الفيمتوثانية. وعندما تنتشر هذه البلازما فإنها تمتد على امتداد المسافة المحورية لتأخذ شكل قطع ناقص كما توضح المشاهدات المعملية . بينما في الحالة الأولى تنتشر البلازما على امتداد المسافة المحورية والقطرية لتحتفظ بشكلها الكروي.

يتضح من هذه الدراسة أن البلازما تتكون في جزء صغير من الحجم البؤري تحيط بها مناطق تأين تمتد لتشمل الحجم البؤري بأكمله، ومع قصر نبضة الليزر تكون عملية التأين هي تأين فوتوني مفرد ، ومع زيادة طول النبضة فإن التأين يتم بمشاركة عملية التأين بالتصادم الإلكتروني مع التأين الفوتوني.

وحيث أن الإلكترونات الناتجة عن هاتين العمليتين تكتسب طاقة من المجال الكهربي لأشعة الليزر لذلك فهي تمتلك توزيعاً لـ 130 ـ باختلاف طول نبضة الليزر وكذلك الحجم البؤري المناظر للفتحة العددية المستخدمة وهذا ما سنقدمه خلال النتائج التالية .

## (5–4) عتبة شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار فوكر– بلانك – مقارنة مع القياسات المعملية

**(5-4) Calculation Fokker-Plank of the breakdown threshold intensity – comparison with the experimental measurements**

أجريت الحسابات لتعيين شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار السيلكا المنصهرة كدالة في زمن النبضة وذلك بتطبيق معادلة فوكر بلانك لدالة توزيع طاقة الإلكترونات . تحت نفس الشروط المعملية التي أعطيت بواسطة ليو ومجموعته (Liu et al, 2005). يوضح شكل (5-29) مقارنة بين القيم المحسوبة لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار والقيم المقاسة عملياً (a) عند الفتحة العددية 0.126 .(b) عند الفتحة العددية 0.255 يتضح من هذا الشكل التوافق النسبي بين القيم المحسوبة لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار مع القيم المقاسة عملياً لكلا النظامين البصريين .

وهذا يؤكد صلاحية النموذج في تفسير ظاهرة انهيار السيلكا المنصهرة تحت الشروط المعملية المستخدمة في هذه الدراسة.

ولدراسة العمليات الفيزيائية المسؤولة عن الانهيار تم حساب دالة توزيع طاقة الإلكترونات ومعاملاتها لكل فتحة عددية كما سنوضح فيما يلي .

## (5-4-1) دالة توزيع طاقة الإلكترونات

**(5-4-1) Electrons energy distribution function**

يمثل الشكل (5-30) القيم المحسوبة لدالة توزيع طاقة الإلكترونات عند منتصف النبضة لثلاث قيم من أزمنة نبضة الليزر عند كل فتحة عددية وهي على التوالي 395 fs,1400 fs, 2200 fs للفتحة العددية 0.126(a) و 420 fs, 1300fs, 2280 fs للفتحة العددية 0.255 (b)، نلاحظ أن سلوك دالة توزيع طاقة [illegible] لا يختلف باختلاف الفتحة العددية ولا باختلاف زمن النبضة حيث تبدأ الدالة بقيم مرتفعة لتنحدر تدريجياً حتى طاقة 5 eV يزيد هذا الانحدار مع زيادة زمن النبضة . كما أن قيم الدالة تنخفض بزيادة زمن النبضة .



وهذا يؤكد زيادة معدل عملية التأين الفوتوني عند النبضات القصيرة لأشعة الليزر . بينما للنبضات الطويلة فنجد أن التأين يتم خلال عملية تصادم إلكتروني حيث تعمل عملية التأين الفوتوني فقط في هذه الحالة للحصول على الإلكترونات الابتدائية اللازمة لعملية التأين التدريجي.

عند نهاية زمن النبضة شكل (5-31) نجد تطابق لقيم دالة التوزيع على المدى من eV(0-9) أي أن معظم الإلكترونات موزعة على مدى فجوة الطاقة . وتمثل كثافة الإلكترونات التي تغطي هذا المدى بنسبة مئوية حوالي %(56) من الكثافة الكلية للإلكترونات.

ويدل الانحدار في دالة توزيع طاقة الإلكترونات عند طاقة إلكترون تزيد عن 9 eV على زيادة معدل فقد طاقة الإلكترونات نتيجة للتصادم غير المرن مع الإلكترونات المجاورة المقيدة لتعمل على تحريرها و زيادة كثافتها . ويؤدي التصادم المتتابع مع الإلكترونات المجاورة لفقد معظم طاقة الإلكترون على المدى المرتفع من الطاقة والذي يزيد عن طاقة

الفجوة وعليها فإن معظم الإلكترونات تظل عند طاقة يقع في المدى المنخفض لطاقة الإلكترون والذي يساوي أو يقل عن 9 eV .

من هذه الدراسة يتضح أن ظاهرة الانهيار تحت هذه الشروط المعملية يحكمها عمليتي التأين الفوتوني والتأين بالتصادم الإلكتروني وأكد ذلك دراسة التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات كما سنوضح فيما يلي.

## (5-4-2) التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات

## (5-4-2) Time evolution of the electron density

تم تمثيل التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات بيانياً لكل فتحة عددية عند ثلاث قيم لأزمنة النبضة . شكل (32-5) يوضح مقارنة التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات مع التغير الزمني لشدة الاستضاءة عند أزمنة نبضة (I)395 fs,(II)1400 fs, (III)2200 fs للفتحة العددية 0.126(a) أما الشكل (33-5) فيمثل 134 قة ولكن للفتحة العددية 0.255(b) عند أزمنة نبضة (I)420 fs,(II)1300 fs, (III)2280 fs ولدراسة تأثير شدة الاستضاءة على التكوين الزمني تم تمثيل التغير الزمني لشدة الاستضاءة عند كل نبضة على نفس الشكل . نلاحظ أن التغير الزمني لشدة الاستضاءة يأخذ شكلاً 131 ياً وتمثل القيمة العظمى للشدة عند منتصف زمن النبضة أما التكوين الزمني لكثاف- ،إسرونات فنجد أنه يبدأ بقيم منخفضة نسبياً عند بداية زمن النبضة ويتزايد بشكل سريع خلال المراحل الأولى منها يتبعه تزايد تدريجي حتى نهاية الزمن وينتهي بقيمة من كثافة الإلكترونات تحقق شرط الانهيار.ويتكرر ذلك مع أزمنة النبضة المختلفة لكل فتحة عددية مع اختلاف قيم كثافة الإلكترونات وسلوكها عند بداية زمن النبضة حيث تنخفض قيمة الكثافة الابتدائية للإلكترونات مع زيادة طول نبضة الليزر كما هو موضح في شكل II . نلاحظ أن الكثافة التي تحقق شرط الانهيار تتكون فقط عند نهاية زمن النبضة بعكس ما يحدث عند النبضات القصيرة . وعلى الرغم من أن سلوك التكوين الزمني لا يختلف باختلاف الفتحة العددية المستخدمة إلا أن معدل تكون كثافة الإلكترونات خلال نبضة الليزر يختلف وفقاً لطول النبضة كما هو واضح منحنى (1) الاشكال ,(I)395 fs (II)1400 fs, (III)2200 fs للفتحة العددية 0.126 ،وفي الشكل (33-5) تمثل نفس العلاقة ولكن

للفتحة العددية 0.255 عند أزمنة نبضة (I)420 fs, (II)1300 fs, (III)2280 fs حيث نجد أن كثافة الإلكترونات تبدأ عند النبضات القصيرة بقيمة تصل إلى $10^9$ إلكترون وتتناقص هذه القيمة مع زيادة زمن النبضة إلى $10^2$ كما أنه عند منتصف زمن النبضة نجد أن كثافة الإلكترونات عند النبضة القصيرة تقترب من القيمة اللازمة للانهيار وتكون أدنى منها عند النبضة الطويلة ، أما في نهاية زمن النبضة فتتطابق قيم كثافة الإلكترونات للنبضات المختلفة مع قيمة الكثافة التي تحقق شرط الانهيار. من هذه الدراسة يتضح أن التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات تحكمه بشكل فعال عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات . وفيما يلي سنوضح الدور الذي تلعبه هذه العملية في نمو كثافة الإلكترونات.

نلاحظ في هذا الشكل انه بشكل عام تزايد سريع في كثافة الالكترونات في المرحلة الأولى لزمن النبضة بنسب متفاوتة تعتمد على طول نبضة الليزر وهي على التوالي 0.2% و 9% شكل II و 13% شكل III

بعدها تبدأ الكثافة في التزايد التدريجي حتى منتصف زمن النبضة مع ملاحظة انه مع قصر نبضة الليزر يزداد معدل نمو كثافة الالكترونات في هذه المرحلة وهذا يمكن الاستدلال به من قيم كثافة الالكترونات المناظرة للقيمة العظمى لشدة الاستضاءة بعد منتصف النبضة تتزايد الكثافة حتى تصل في نهاية الزمن 137 ، تحقق شرط الانهيار و عند النبضة القصيرة نجد أن هذه القيمة يمكن الوصول إليها مبكرا قبل انتهاء نبضة الليزر بينما للنبضات الطويلة فنجد أن الانهيار يحدث فقط عند نهاية الزمن.

ومع اختلاف النظام البصري المستخ 135 ند الفتحة العددية 0.255 نجد أن نمو كثافة الالكترونات يتبع نفس السلوك للأزمنه المحسسة لنبضة الليزر كما يوضح الشكل ( 5-33 ) (b).

## (5-4-3) تأثير عملية التأين الفوتوني

**(5-4-3) Effect of photo ionization process**

لدراسة تأثير عملية التأين الفوتوني على كثافة الإلكترونات شكل (5-34) يمثل مقارنة بين التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات في وجود وإهمال عملية التأين متعدد الفوتونات لأزمنة نبضة مختلفة ولتسهيل المقارنة تم توحيد الزمن . وقد أجريت هذه الدراسة لكل من الفتحتين العدديتين كما يوضح شكل a للفتحة العددية 0.126 ، وشكل (b) للفتحة العددية 0.255 . نلاحظ من هذا الشكل الانخفاض الملحوظ في كثافة الإلكترونات عند إهمال عملية التأين متعدد الفوتونات والذي يزيد مع قصر نبضة الليزر كما هو موضح بالمنحنى '(1) في هذا الشكل . ويقل هذا الانخفاض مع زيادة نبضة الليزر كما توضح المنحنيات'(2) و'(3) بالإضافة إلى ذلك نجد أنه في المراحل الأولى لزمن النبضة عند إهمال عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات تتقارب المنحنيات '(1) و'(2) و'(3) وهذا ما يؤكد أن هذه العملية هي المسؤولة تماماً عن تكون الكثافة الابتدائية من الإلكترونات والتي تؤدي إلى التأين التدريجي خلال العملية العكسية لبرمشتراهلنج لتصل في النهاية إلى تكون البلازما وإحداث الضرر في السيلكا المنصهرة عند منطقة الانهيار.

**(5-4-4) التغير الزمني لمتوسط طاقة [illegible]**

142

**(5-4-4) Time variation of the electron mean energy**

وللتأكد من أن الإلكترونات الابتدائية تنتج أساساً عن عملية تأين بالامتصاص متعدد الفوتونات شكل (5-35) يمثل مقارنة بين التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترون عند القيم المختلفة لزمن النبضة للفتحة العددية 0.126(a) والفتحة العددية 0.255(b) نلاحظ في هذا الشكل أن متوسط طاقة الإلكترون يبدأ بقيم صغيرة جداً عند بداية زمن النبضة وتتزايد قيمتها للنبضة القصيرة لتستقر عند نهاية زمن النبضة عند قيمة 3.5 eV . بينما للنبضات الطويلة فنجد أن متوسط طاقة الإلكترون يسلك سلوكاً مختلفاً فعند طول نبضة 1400 fsشكل II نجد أنه يبدأ بقيم منخفضة يستمر عليها لفترة تقترب من نصف زمن النبضة عندها يبدأ متوسط

طاقة الإلكترون في الزيادة السريعة ليصل عند منتصف زمن النبضة إلى 2.5 eV مع استمرار الزيادة إلى أن يصل لأقصى قيمة له حوالي 5 eV فيتناقص بعدها حتى نهاية زمن النبضة منتهياً بقيمة تصل إلى 4.1 eV . وعند زيادة زمن النبضة فإن متوسط طاقة الإلكترون بعد منطقة الثبات المنخفضة يزداد بمعدل أسرع بالقرب من منتصف النبضة لقيمة تساوي 3.36 eV تتزايد قيمته بعدها وتصل إلى أقصى قيمة 5 eV ثم تنخفض تدريجياً لتصل في نهاية زمن النبضة إلى 4.25 eV .

ويعزى هذا التغير في متوسط طاقة الإلكترون إلى أنه عند النبضات القصيرة حيث يتزايد معدل نمو كثافة الإلكترونات خلال عملية التأين متعدد الفوتونات فإن الإلكترونات تتولد بطاقات منخفضة جداً وتتزايد طاقتها تدريجياً خلال عملية تصادم مرن مع الإلكترونات المقيدة أو الشبيكة لتمتص مقداراً من طاقة المجال الكهربي لأشعة الليزر خلال عملية الامتصاص العكسية لبرمشتراهلنج ،ولقصر طول نبضة الليزر فإن معدل امتصاص الطاقة يتزايد تدريجاً خلال زمن النبضة ، ويتزايد هذا المعدل مع زيادة طول نبضة الليزر كما هو واضح من شكلي II و III حيث أن هذه العملية تتطلب فترة زمنية أطول . وتتراكم هذه الطاقة حتى تصل إلى أقصى قيمة لها بالقرب من نهاية زمن النبضة حيث تفقد الإلكترونات طاقتها خلال عملية تأين خلال تصادم غير مرن مع الإلكترونات المقيدة لتعمل على تحريرها ، ويتفق هذا السلوك مع التكوين الزمني لنمو كثافة الإلكترونات شكل (5-32) حيث تزداد الكثافة بشكل سريع عند نهاية زمن النبضة مع زيادة طول نبضة الليزر. كما نلاحظ في هذا الشكل أيضاً أن اختلاف الفتحة العددية لا يؤثر بشكل ملحوظ في سلوك التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترون عند القيم المـ [144] لليزر.

## (5-4-5) التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات

## (5-4-5) Time evolution of the electrons energy distribution function

يوضح الشكل(5-36) القيم المحسوبة لدالة توزيع طاقة الالكترونات عند أزمنة مختلفة من نبضة الليزر (I)395 fs, (II)1400 fs, (III)2200 fs للفتحة العددية 0.126..كما أمكن من دراسة توزيع طاقة الالكترونات خلال زمن النبضة تحديد الفترة الزمنية و كذلك الطاقة التي تتواجد

عندها اكبر كثافة للالكترونات بالإضافة إلى مناطق التأين المحيطة بها. في هذه الأشكال يمثل الجزء العلوي التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات بينما الجزء السفلي فيمثل مناطق توزيع كثافة الالكترونات المحيطة بمنطقة الانهيار و زمن تكونها و الطاقة التي تمتلكها غالبية الالكترونات خلال زمن النبضة . نلاحظ من هذه الأشكال أن دالة توزيع طاقة الالكترونات تبدأ بقيم منخفضة و تتزايد مع زيادة الزمن بطريقة سريعة في المراحل الأولى لزمن النبضة ، وينخفض معدل تزايدها بعد منتصف النبضة حيث تتقارب قيم الدالة إلى نهايتها مع ملاحظة أن الدالة تنتهي بقيم مرتفعة خلال النصف الأخير من زمن النبضة و هذا يدل على أن الالكترونات الابتدائية نتجت عن عملية تأين فوتوني. بينما عند نهايتها تنخفض انخفاضا ملحوظا على مدى من الطاقة $\leq 10$ أي تقريبا طاقة الفجوة . و يشير هذا الانخفاض السريع في نهاية دالة التوزيع إلى زيادة معدل فقد طاقة الالكترونات خلال تصادم غير مرن يؤدي إلى زيادة الكثافة التي تصل بالوسط إلى حالة الانهيار و تكون البلازما ، كما يوضح الجزء السفلي من الشكل مناطق تكون البلازما ومناطق التأين المحيطة بها والفترة الزمنية التي تتكون عندها البلازما وكذلك منطقة الطاقة التي تتواجد فيها الالكترونات . نلاحظ أن منطقة البلازما و منطقة التأين المحيطة بها تنحصر مع زيادة طول نبضة الليزر و تكون منطقة البلازما صغيرة جداً بالنسبة لمناطق التأين المحيطة بها . كما أن تكون البلازما يبدأ مبكراً عند النبضات القصيرة ،كما نلاحظ في شكل I بالإضافة إلى ذلك فان مناطق التأين تظهر عند مدى من الطاقة مابين eV (9-0) . أما أعلى منطقة أي منطقة البلازما فيختلف موضعها بالنسبة لطاقة الالكترونات وذلك وفقاً لطول نبضة الليزر فنجد أنه عند النبضة القصيرة تتواجد معظم الالكترونات عند طاقة منخفضة جداً تقترب من الصفر مما يدل على أن هذه الالكترونات نتجت عن عملية تأين فوتوني. ومع زيادة طول نبضة الليزر نجد أن منطقة البلازما تناظر طاقة تتغير مابين eV (3-2) ، ويوضح الانحدار اللوني في هذه الأشكال التدرج في كثافة الالكترونات في مناطق التأين المحيطة بمنطقة الانهيار .

وكذلك الشكل (37-5) يوضح القيم المحسوبة لدالة توزيع طاقة الالكترونات عند أزمنة النبضة المختلفة fs 2280(III) ,fs 1300(II) ,fs 420(I) للفتحة العددية 0.255 خلال زمن النبضة. نلاحظ من هذه الأشكال التشابه في كل من سلوك التغير الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات وكذلك زمن و موضع مناطق التأين و منطقة تكون البلازما .

وفي الفصل التالي سوف نستعرض ملخصاً لما ورد في هذه الرسالة ونظرة مستقبلية للموضوع.