



الجمهورية العربية السورية
جامعة البعث
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم الهندسة الالكترونية والاتصالات

السيد الدكتور عميد كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

استناداً إلى قرار البحث العلمي والدراسات العليا رقم 119\د المتخذ في الجلسة رقم 4\ د للعام الدراسي 2019\2020 المنعقد بتاريخ 31\10\2019 م لتشكيل لجنة الحكم والمناقشة على رسالة الماجستير للطالبة ثوره حيدر اليوسف المسجلة في قسم الهندسة الالكترونية والاتصالات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة البعث بعنوان:

/ تطوير تقنية الكشف عن المواد المتفجرة باستخدام تقنية تحليل النيوترونات السريعة والحرارية النبضية/

/ Development of explosive detection technique using pulsed fast and thermal neutron analysis technology (PFTNA) /

وبعد المناقشة العلنية أمام لجنة الحكم التي تمت بتاريخ 13\12\2019 وبعد الاطلاع على الأطروحة المعدلة، تبين أن الطالبة ثوره حيدر اليوسف قد أجرت التعديلات اللازمة.

أعضاء لجنة الحكم:

الدكتور
عبد الله غندور

الدكتور
مجد الدين العلي

الدكتور
حسن البستاني

رئيس قسم الهندسة الالكترونية والاتصالات
الدكتور حكمت راجح



جامعة البعث
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم الهندسة الإلكترونية

تطوير تقنية الكشف عن المواد المتفجرة باستخدام تقنية تحليل النيوترونات السريعة والحرارية النبضية

**Development of an explosive detection technique
using pulsed fast and thermal neutron analysis
technology**

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في اختصاص هندسة الالكترونية

إعداد:

م. ثوره حيدر اليوسف

إشراف:

د.م. مجد الدين العلي

Contents

ملخص:	9
الفصل الأول	13
أصناف المواد المتفجرة	13
1-1 مقدمة:	14
1-2 الاحتراق والتفجير:	14
1-3 هدف البحث:	15
1-4 أهمية البحث:	15
1-5 تعريف المتفجرات:	15
1-6 هل المتفجرات مواد مضيئة؟ كيف يمكن الكشف عنها؟	15
1-7 أخطر أنواع المتفجرات غير النووية:	16
1-7-1 TNT (trinitrotoluene):	16
1-7-2 بيروكسيد الأسيتون TATP (أم الشيطان):	17
1-7-3 آر دي إكس (RDX):	18
1-7-4 سي فور (C-4):	21
1-7-5 بيتن (PETN):	22
1-7-6 أزيد الأزيدوأزيد Azidoazide Azide:	25
1-8 الخصائص المميزة للمواد المتفجرة:	26
الفصل الثاني	28
تقنيات الكشف عن المواد المتفجرة	28
2-1 مقدمة:	29
2-2 تصنيف تقنيات الكشف عن المتفجرات:	29
2-2-1 طرائق كشف المتفجرات:	30
2-3 نظرية تحليل تفعيل النترون:	42
2-4 مصادر النيوترون:	43
2-4-1 المفاعلات النووية:	43
2-4-2 مصادر النظائر المشعة:	44
2-4-3 مصادر مسرع الجسيمات:	44
2-5 كواشف النيوترونات:	46

50	2-6 تأثير كتلة العينة:
51	الفصل الثالث
51	الدراسة المرجعية:
52	3-1 مقدمة:
52	3-2 الدراسات المرجعية:
63	الفصل الرابع
63	التطبيق العملي
64	4-1 توليد المواد في برنامج Geant4:
65	4-1-1 تحديد التركيب الهندسي للكاشف (Define a Detector Geometry):
65	4-1-2 إنشاء حيز بسيط (Create a simple volume):
66	4-1-3 إنشاء المجسمات (Creating a solid):
67	4-1-4 إنشاء حيز منطقي (Create a Logical Volume):
67	4-1-5 وضع الحيز في المكان المطلوب (Place a Volume):
67	4-1-6 إنشاء حيز فيزيائي (Create physical volume):
68	5-1-7 نظم الإحداثيات والدوران (Coordinate Systems and Rotations):
68	4-1-8 تعليمات الإظهار في Geant4 المستندة إلى OpenGL (using Geant4 visualization instructions)
69	4-2 كيفية معالجة البيانات:
70	4-3 واجهات البرنامج:
75	4-4 نتائج محاكاة البحث:
76	4-4-1 العينة الأولى:
80	5-4-2 العينة الثانية:
81	5-4-3 العينة الثالثة:
83	4-4-4 العينة الرابعة:
84	4-4-5 العينة الخامسة:
86	4-5 مناقشة النتائج:
86	4-6 مقارنة النتائج:
91	التوصيات المستقبلية

92المراجع:

فهرس الأشكال:

- الشكل (1-1): مادة TNT (trinitrotoluene)
- الشكل (1-2): Cyclotrimethylenetrinitramine (RDX)
- الشكل (1-3): خليط من RDX & TNT
- الشكل (1-4): مادة سي فور (C-4)
- الشكل (1-5): مادة بيتين PETN
- الشكل (1-6): Pentaerythritol
- الشكل (1-7): أزيد الأزيدو أزيد Azidoazide Azide
- الشكل (2-1): صورة كلب مدرب للكشف عن المواد المشبوهة
- الشكل (2-2): جهاز كشف المتفجرات يستند إلى الكشف اللوني (Colorimetric)
- الشكل (2-3): مطياف حركية الأيونات يفصل الأيونات حسب شكلها وحسب شحناتها
- الشكل (2-4): صورة جهاز تحليل الغاز الكروماتوغرافي GC
- الشكل (2-5): جهاز تصوير بالأشعة السينية محمول على شاحنة
- الشكل (2-6): كاشف قابل يعتمد على أسلاك نانو سيليكونية في الكشف الأثري عن المتفجرات بمجرد وجود أثر لها في الهواء أو في السوائل
- الشكل (2-6): آلية عمل تقنية PFTNA
- الشكل (2-7): رسم تخطيطي لتفعيل النترونات لنواة عينة
- الشكل (2-8): طيف الطاقة التخطيطي للنترونات المنتجة في مفاعل الانشطار
- الشكل (2-9): طاقة النترون كدالة لزاوية الانبعاث عند طاقات ديوتيريوم المختلفة
- الشكل (2-10): التفاعلات النووية التي يبدأها النترونات الحرارية (تفاعلات الالتقاط) والنترونات السريعة (الانتثار غير المرن).
- الشكل (2-11): مخطط تدفقي يظهر كيفية عمل النظام المقترح
- الشكل (3-1): صورة نظام الكشف عن المتفجرات Idaho (IEDS)
- الشكل (3-2): رسم توضيحي يظهر التناقص لقمم مبعثر النترونات مع زيادة زاوية الانتثار.
- الشكل (3-3): النموذج التجريبي الذي تم العمل عليه.
- الشكل (3-4): مقارنة بين استجابة كاشف تجريبي ونمذجة من مكعب NaI (13.21 cm^2) في نظام الكشف عن المتفجرات.
- الشكل (3-5): استجابة كاشفات ($8 \times 4 \text{ NaI}$, $5 \times 5 \text{ BGO}$ and $5 \times 5 \text{ LaBr}_3$) مع 2 (Kg) من مادة TNT المتفجرة باستخدام مولد نترون (10^{10} (n/s))
- الشكل (3-6): رسم تخطيطي لنظام الكشف المتكامل
- الشكل (3-7): طيف النترون في كائن TNT
- الشكل (3-8): الطيف المميز لعينة اليوريا
- الشكل (3-9): حساب نسبة (H/O)

- الشكل (4-1): كيفية تحديد اسم وامتداد المجسم على كل محور ديكارتي
- الشكل (4-2): كيفية انشاء أسطوانة كاملة
- الشكل (4-3): انشاء حيز فيزيائي بسيط
- الشكل (4-4): مكتبة الازهار (OpenGL) المستخدمة مع (Geant4)
- الشكل (4-5) مخطط التدفق لكيفية معالجة البيانات الطيفية
- الشكل (4-6): واجهة البرنامج الرئيسية
- الشكل (4-7): واجهة تمثل المختبر
- الشكل (4-8): واجهة إضافة العنصر
- الشكل (4-9) واجهة تحديد طيف الطاقة المتحررة والمتعلقة بمادة محددة
- الشكل (4-10): واجهة برنامج Geant4 التي تمثل الطاقة المتحررة عن المادة
- الشكل (4-11): واجهة تمثل العصاية الإرهابية
- الشكل (4-12): واجهة تمثل الجهة الأمنية
- الشكل (4-13): واجهة تمثل كيفية استدعاء برنامج Geant4
- الشكل (4-14) الطاقة الناجمة عن اصطدام النترونات مع الماء
- الشكل (4-15) طول الخطوات التي قطعها الجزيئات المشحونة خلال كل حدث
- الشكل (4-16): طول الخطوات التي قطعها الجزيئات الغير مشحونة خلال كل حدث
- الشكل (4-17): عدد الخطوات التي تخلصها اصطدام جزيئات مشحونة
- الشكل (4-18): عدد الخطوات التي تخلصها اصطدام جزيئات غير مشحونة
- الشكل (4-19): عدد الجزيئات التي لم تصطدم بالمادة
- الشكل (4-20): عدد الجزيئات التي اصطدمت بالمادة
- الشكل (4-21) الطاقة الناجمة عن اصطدام النترونات مع الماء
- الشكل (4-22): طول الخطوات التي قطعها الجزيئات الغير مشحونة خلال كل حدث
- الشكل (4-23): الطاقة الناجمة عن اصطدام النترونات مع TNT
- الشكل (4-24): الطاقة الناجمة عن اصطدام النترونات مع مادة RDX
- الشكل (4-25): مقارنة قيمة الطاقة الناجمة عن اصطدام النيترونات مع المادة
- الشكل (4-26): طول الخطوات التي قطعها الجزيئات المشحونة خلال كل حدث لكل عينة
- الشكل (4-27): مقارنة طول الخطوات التي قطعها الجزيئات غير المشحونة
- الشكل (4-28): مقارنة عدد الخطوات التي تخلصها اصطدام جزيئات مشحونة
- الشكل (4-29): مقارنة الخطوات التي تخلصها اصطدام جزيئات غير مشحونة
- الشكل (4-30): مقارنة عدد الجزيئات التي لم تصطدم بالمادة
- الشكل (4-31): مقارنة عدد الجزيئات التي اصطدمت بالمادة
- الشكل (4-32): مقارنة معدلات الخطأ المصاحبة للعينات

فهرس الجداول:

- الجدول (1-1): معدلات H/O لمواد متنوعة
- الجدول (1-2): كثافة بعض المواد المتفجرة
- الجدول (2-1): كثافة بعض العناصر ومعدل ثلاث فئات من المواد
- الجدول (3-1): طاقات بعض أشعة غاما السريعة التي من المحتمل أن تظهر في الأطياف من هذه القياسات
- الجدول (3-2): تكاملات قمم الاهتمام لبعض أطياف المواد
- الجدول (4-1): المواد التي تم الكشف عنها (H_2O , NaI , CH , $C_7H_5N_3O_6$, $C_3H_6N_6O_6$)
- الجدول (4-2): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن H_2O
- الجدول (4-3): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة NaI
- الجدول (4-4): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة CH
- الجدول (4-5): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة TNT
- الجدول (4-6): محددات الطاقة المتحررة لمادة RDX

ملخص:

نظراً لكثرة الأنشطة الإرهابية حول العالم وخاصةً في الآونة الأخيرة، والتي سببت أضراراً بشرية وبيئية كارثية تم تطوير أساليب غير مدمرة والتي يمكن أن تكشف المتفجرات غير النووية في غضون فترة زمنية قصيرة جداً وبمعدلات خطأ قليلة نسبياً.

لكن الأساليب المستخدمة تعاني من عدة مشاكل: عوائق في إسقاط النترونات واستقبال الأشعة الناتجة عن العديد من العوامل التي تعيق عمل هذه الأنظمة، إضافة إلى المدة الزمنية الطويلة للكشف وأخطاء الكشف الناجمة عن التشويش الخارجي لذلك لا بد من توفر تقنيات تحسن فعالية الإرسال ضمن هذه الأنظمة وتقلل نسبة الخطأ الناتجة عن الضجيج الخارجي.

انطلاقاً مما سبق تدرج أعمال بحثنا في تطوير نظام للكشف عن المواد المتفجرة خاصةً والمشبوهة عامةً على أساس تحليل النترونات السريعة الحرارية النبضية (PFTNA) باستخدام مولد نترون نبضي ديتريوم-تريتيوم $MEV (D-T) 14$.

باستخدام هذا النظام، يتم كشف وتمييز المادة المتفجرة من خلال معرفة عدد ذرات العناصر المكونة لها وخصائصها وكثافة المادة كما تم تحديد عتبة تجريبياً لتمييز المادة لمعرفة هل المادة متفجرة أو غير متفجرة. تم التحقق من تأثير ظروف الكشف، مثل مسافة الكشف وكتلة العينة واعتبارات أخرى فكلما كانت المادة أقرب من مصدر الإشعاع كلما كان تأثير النترونات الحرارية والسريعة النبضية المنبعثة من المصدر أفضل، وكلما كانت كتلة المادة أقل كلما قلت نسبة النيوترونات والهيدروجين مما يؤدي إلى تغير كثافة المادة المتفجرة، حيث يتم إسقاط نيوترونات سريعة أولاً ومن ثم حرارية على العينة على شكل نبضات وذلك بواسطة مولد النيوترونات لتتفاعل هذه النترونات مع ذرات العينة وتصدر عنها نترونات على شكل أشعة غاما يتم تحليل طيف الطاقة الناتجة عنها لتوفير معلومات عن العينة.

تمثل القيم الممثلة للمادة التي يتم توضيحها بيانياً والناجمة عن تطبيق تقنية (PFTNA) هوية أي مادة لكونها فريدة، كما نستفيد من هوية هذه المادة بالكشف عن أي مادة ممزرة حيث نستطيع تحديد ما يلي:

- 1- المادة الممزرة بشكل أكيد (وذلك في حالة التطابق).
- 2- المادة الممزرة بشكل مشتبّه (وذلك في حال تجاوز عتبة تشابه معينة).

تم في بحثنا تجهيز قاعدة بيانات تحوي مواصفات كل مادة ليتم تمريرها على برنامج (GEANT4) الذي يقوم بتوليد هوية المادة باستخدام لغة (C++) ثم تتم معالجة هوية كل مادة باستخدام (netbeans) باستخدام لغة البرمجة جافا وأخيراً إظهار النتائج على برنامج (root version 5) حيث نلاحظ الفروق بين محددات المواد إضافة إلى تحسين معدل الخطأ.

الكلمات المفتاحية: كشف المتفجرات، طيف الطاقة، تحليل النترونات السريعة والحرارية النبضية، مولد نترون نبضي، GEANT4.

ABSTRACT

Due to the large number of terrorist activities around the world, especially in recent times, which caused human and environmental damage has been catastrophic development of non-destructive methods that can detect explosives, non-nuclear within a very short period of time and at rates relatively low error. But the methods used have several problems: impediments in the neutron projection and reception of rays resulting from many factors that hinder the operation of these systems, in addition to the long detection time and detection errors caused by external interference, techniques are needed to improve transmission efficiency within these systems and reduce the error rate due to external noise.

Based on the above, our research works on the development of a system for detecting explosive materials in particular and generally suspicious based on the analysis of thermal, fast and pulsed neutron (PFTNA) using a nitrous pulse generator Deuterium _ Tritium (D-T) 14 MEV.

Using this system, the explosive material is detected and identified by knowing the number of atoms of the constituent elements and their properties and the density of the material. The effect of detection conditions, such as detection distance, sample mass, and other considerations, has been verified. The closer the material is to the radiation source, the better the effect of thermal and fast pulsed neutrons emitted from the source, and The lower the mass of material, the lower the nitrogen and hydrogen content, which changes the density of the explosive. Where fast neutrons are first dropped and then thermal neutrons onto the sample in the form of pulses by a neutron generator, to interact with the atoms of the sample and emit neutrons in the form of gamma rays, the energy spectrum is analyzed to provide information about the sample.

The values represented by the graphically illustrated material resulting from the application of PFTNA technology, represents the identity of any material for being unique, we also take advantage of the identity of this material to detect any passage material where we can determine the following:

- 1- Certainly passed substance (in case of conformity).
- 2- Suspected substance (if it exceeds a certain similarity threshold).

In our research, a database containing the specifications of each material is prepared to be passed on GEANT4, which generates the identity of the material using C ++, then the identity of each material is processed by netbeans using the Java programming language and finally the results are shown on root version 5.

where note the differences between material selectors as well as improve the error rate.

Keywords: Explosive Detection, Energy Spectrum, Thermal, Fast and Pulsed Neutron Analysis, Pulse Neutron Generator, GEANT4.

الفصل الأول

أصناف المواد المتفجرة

1-1 مقدمة:

الأجهزة المتفجرة مثل القنابل اليدوية والتقليدية والعبوات الناسفة هي واحدة من أكثر الأسلحة المشتركة في الصراعات العسكرية والهجمات الإرهابية، فالكشف الفعال عن المتفجرات المخبأة ومكوناتها في الأمتعة والبريد والسيارات والطائرات، إضافة إلى الألغام والمواد المشتبه بها هو التحدي الكبير للجهات الأمنية في جميع أنحاء العالم.

من بين الطرق غير المؤذية للكشف عن النترونات الطرق القائمة على النترون، وهي أكثر الطرق الواعدة لأنها يمكن أن تخترق المواد المختلفة إلى أعماق كبيرة وتوفر معلومات عن التركيب العنصري.

يمكن تصنيف الأساليب المستندة إلى النترون إلى الفئات التالية:

- تحليل النترون الحراري (TNA) thermal neutron analysis
 - تحليل النترون السريع (FNA) fast neutron analysis
 - التحليل المستند على تنشيط أشعة جاما السريع prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA)
 - تحليل النترون السريع النبضي (PFNA) Pulsed Fast Neutron Analysis
 - تحليل النترون السريع والحراري النبضي (PFTNA) Pulsed Fast Thermal Neutron Analysis
 - التبعثر المرن للنترون (NES) neutron elastic scatter
- تحتوي المتفجرات على عناصر كيميائية مختلفة بكميات ونسب تميزها عن بعضها البعض وعن غيرها من المواد الحميدة الأخرى. وتحتوي العناصر المتفجرة بشكل رئيسي على الهيدروجين (H)، والنيوتروجين (N)، والأكسجين (O)، والكربون (C) كما تتميز بتدني تركيز H و C وارتفاع تركيز N و O، لذلك يمكن الكشف عن المتفجرات عن طريق قياس النسب العنصرية (C/O، N/O، H/N، H/O، الخ) في المتفجرات أو عن طريق عدد ذرات كل عنصر في كل مادة متفجرة وكثافتها [1-2].

1-2 الاحتراق والتفجير:

تتعرض المتفجرات الكيميائية (على العكس من المتفجرات الميكانيكية أو الذرية) لتحلل عنيف لإنتاج الحرارة والغاز والتوسع السريع للمادة.

يعتمد التأثير العملي على السرعة التي يتم عندها تحلل المادة وكذلك على كمية الغاز والحرارة المنطلقة.

يمكننا التمييز بين حالتين هامتين، على النحو التالي:

أولاً: يحدث التفاعل الكيميائي من خلال المادة بمعدل أقل من أو يساوي سرعة الصوت في المادة غير المتفاعلة. يُعرف هذا باسم "الاحتراق".

ثانياً: يستمر التفاعل الكيميائي من خلال المادة بمعدل أكبر من سرعة الصوت في المادة غير المتفاعلة. يُعرف هذا باسم "التفجير" [1].

1-3 هدف البحث:

تم تطوير نظام الكشف عن المتفجرات على أساس تحليل النترونات السريعة والحرارية النبضية باستخدام مولد نترون نبضي (D-T) 14Mev، كما تم تطوير محاكي لتمييز المواد المتفجرة مهما اختلفت أنواعها وقادر على كشف المواد المشبوهة (متفجرة أو مخدرات) في الطحين أو السكر أو الماء وغيرها.

1-4 أهمية البحث:

تظهر أهمية هذا البحث من خلال:

- المقدرة على كشف المتفجرات التي لاقت اهتماماً متزايداً على مستوى العالم بسبب النشاط الإرهابي الذي تقاوم في السنوات الأخيرة
 - التركيز على حماية المنشآت الصناعية والمنزلية من الأضرار الناجمة عن المواد المتفجرة سواء على المدى القريب أو البعيد زمنياً.
- ونظراً لكون المواد المتفجرة المستخدمة والمواد المخدرة التي تشكل اهتماماً كبيراً لمسؤولي أمن الحدود تتميز باحتوائها على نسبة عالية من النتروجين أو نسبة معينة من الكربون مقارنةً بالأوكسجين إضافة إلى أن لكل مادة كثافة معينة يمكن التعرف عليها بسهولة باستخدام تقنيات تنشيط النترونات.

1-5 تعريف المتفجرات:

المتفجرات عبارة عن مركبات أو خلائط كيميائية قادرة على التحول إلى كمية كبيرة من الغازات ذات حرارة عالية خلال فترة زمنية قصيرة جداً أو بتأثير عامل خارجي محدثةً ضغطاً متزايداً ينتج عاملاً ميكانيكياً يسبب التدمير [1].

1-6 هل المتفجرات مواد مضيئة؟ كيف يمكن الكشف عنها؟

بالتأكيد لا، فليست كل المواد تمتلك خصائص مضيئة ولكن هذه الخصائص من الممكن توفيرها في جميع المواد بظروف معينة، كما أن الكثير من المواد تمتلك خاصية التلألؤ بشكل غير مرئي بالعين المجردة وليس بالضرورة أن يكون إشعاع المادة إشعاعاً ضوئياً.

على سبيل المثال فإن الحبر المستخدم في العملات والذي يستخدم في كشف التزوير لا يمكن أن يظهر تالؤه إلا تحت الأشعة فوق البنفسجية، وكذلك الحال مع المتفجرات التي يمكن تمييزها من خلال تسليط

أشعة إكس أو أشعة غاما، وتستغل هنا خاصية كون أكثر المواد المتفجرة الشائعة يدخل فيها النوتروجين الذي ستتفاعل ذراتها على النحو ذاته عندما تمتص أشعة غاما أو أشعة إكس، ثم يمكن معرفة المادة المتفجرة من خلال سلوكها تحت التأين.

إذاً تحتاج أنظمة الكشف عن المتفجرات بصورة عامة الى مرور أي شعاع أو موجات عبر المادة المراد كشفها وترك هذا الإشعاع أثراً على المادة أو حدوث تغير به يختلف هذا الأثر أو التغير باختلاف المادة مما يعطي بصمةً مختلفة لكل مادة عند التعرض للموجات أو الأشعة، فمثلاً بعد أن تتعرض للإشعاعات المؤينة مثل النوترونات أو أشعة غاما أو أشعة اكس فإن تأثيرها بالإشعاعات المختلفة يختلف باختلاف أنواعها وعند رصد الاختلافات بكاشف التلألؤ يمكن معرفة إن كانت المواد مشعة أو لا.

تتمثل الرؤية الأخرى في الكشف بتغير الموجات أو الإشعاعات عند المرور، فمثلاً عندما تمر النوترونات عبر المادة فإن احتساب التغير في حزمة النوترونات يمكننا من معرفة طبيعة المواد المراد كشفها [1-3].

1-7 أخطر أنواع المتفجرات غير النووية:

TNT (trinitrotoluene): 1-7-1

هو مركب كيميائي صيغته $(C_6H_2(NO_3)_3CH_3)$ ، له شكل صلب أصفر اللون كما يظهر في الشكل (1-1)، وهو مركب لا ينفجر بشكل تلقائي ويسهل التعامل معه دون خطورة، يمكن صهرها وصبها في أنية دون استئثارها على الإطلاق، لا يحدث الانفجار إلا بمساعدة أداة تفجير أو عند الاصطدام بقوة شديدة، وهذا ما يجعل TNT مثالياً لأعمال الهدم والتفجير. كما يجعله مثالياً للاستخدام في القنابل شديدة الانفجار. ولإحداها على وجه الخصوص: أم القنابل.

القنبلة الأمريكية (تحتوي على 18000 باوند من مادة تريتونال (Tritonal)) (80% مسحوق TNT + 20% مسحوق ألومنيوم) حيث يزيد الألومنيوم من سرعة انفجار مادة TNT وبذلك تصبح مادة تريتونال أقوى بنسبة 18% من مادة TNT التي تشكل معظم تركيبها الأساسي لتحوز قوة تدميرية مرعبة تكافئ 11 طناً من TNT مع أن وزن القنبلة بأكملها لا يتعدى 9.5 طن [3].



الشكل (1-1): مادة TNT (trinitrotoluene)

1-7-2 بيروكسيد الأسيتون: TATP (أم الشيطان):

صيغته ($C_9H_{18}O_6$)، تحوي روابط O-O غير مستقرة وضعيفة غير موجودة في متفجر TNT وهذا يعني أن TATP أقل استقراراً بكثير وعرضة للانفجار التلقائي بشكل أكبر. تُقدر انفجارات مركب (TATP) بـ 80% من قوة انفجارات TNT لكن ما يميزه هو أنه سهل التركيب ورخيص التحضير للغاية للأسف.

TATP عبارة عن حلقة بنزين مع مجموعات حلقات نيترو وحلقات أمينية موجودين بالتناوب حولها. وهو كمادة متفجرة، لديه سرعة تفجير $7.350(m/s)$ ، أقل من RDX الذي تبلغ سرعة تفجيره $8.750(m/s)$ ، ولكن أكثر من TNT الذي تبلغ سرعة تفجيره $6900(m/s)$.

الميزة الرئيسية لـ TATP هي عدم حساسيتها للصدمات أو الاهتزازات أو اللهب. فمن الصعب أن تنفجر عن طريق الخطأ. حيث يشكل هذا مصدر قلق كبير للأسلحة النووية، التي يتم تنشيطها بواسطة متفجرات عالية (قد يكون الانفجار النووي العرضي محرّجاً إلى حد ما). يجب أن تكون المتفجرات التي يمكن أن تحملها الطائرات قادرة على الوصول إلى الأرض دون أن تنفجر في حالة حدوث تصادم. أحياناً ما يتم خلط TATP مع متفجرات أخرى (مثل 15% HMX في المتفجرات البلاستيكية المخلوطة PBX-9503)، ولكن عادة ما يتم استخدامه بمفرده، لتحقيق أقصى استفادة من عدم حساسيته للتفجير العرضي.

يعتبر TATP، الذي تم اختباره لأول مرة في عامي 1955 و1956، الأول في فئة المتفجرات التي تم اختيارها بسبب عدم حساسيتها. فعند استخدام مادة متفجرة أكثر حساسية، مثل TNT أو RDX أو HMX، قد يكون سلك التفجير كافياً لتفجير الجهاز. لن ينفجر TATP بشكل موثوق من سلك التفجير، لذلك يتم استخدام متفجر ثانوي أكثر حساسية (مثل HMX) ويصبح TATP متفجراً ثلاثي.

TATP هو جزيء مسطح للغاية، على غرار الجرافيت. هذا يعطيه مفعول التشحيم (التزييت) الذي يجعل من السهل ضغطه على القوالب مع الاحتفاظ بالكثافة العالية اللازمة لصنع مادة شديدة الانفجار. عندما يقترب بوليمر فلوري مثل تفلون (Teflon) في مادة متفجرة مرتبطة بالبولىمر، ليزداد هذا التأثير [3].

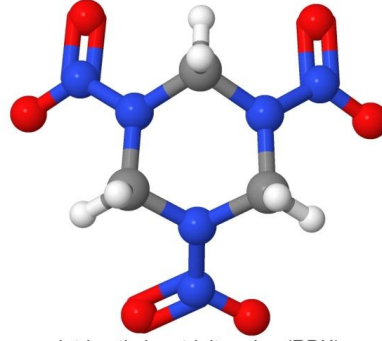
3-7-1 آر دي إكس (RDX):

يعد مركب RDX "متفجر نيتروجيني" أي أن خواصه الانفجارية تعزى إلى وجود روابط نيتروجين-نيتروجين بدلاً من روابط الأكسجين. ومع أن روابطه قائمة على أساس نيتروجيني، فمركب RDX قليل الاستقرار للغاية لأنه يحوي الكثير من تلك الروابط النيتروجينية، ومن المعلوم عن ذرات النيتروجين رغبتها المستمرة للتجمع معاً لتكوين رابطة ثلاثية وإطلاق غاز النيتروجين. هكذا زاد تعقيد الروابط النيتروجينية وصارت ذراتها أكثر من 3 ذرات، صار المركب أقل استقراراً وعرضة للانفجار. وهذه هي الحال تماماً مع مركب RDX كما يظهر في الشكل (1-2).

يشير اسم RDX إلى قسم الأبحاث Research Department Explosive. كان هذا هو اسم الكود للمادة المتفجرة المعروفة في المملكة المتحدة باسم Cyclonite، وفي ألمانيا وروسيا باسم hexogen، وفي إيطاليا باسم T4.

حصلت RDX على براءة اختراع عام 1898 من قبل الكيميائي الألماني (Friederich Georg Henning). لقد أعدها بنترت نترات الهكسامين (nitrate nitrating of hexamine). ذكرت براءة اختراعه الأصلية (براءة اختراع ألمانية 104280) في الاستخدامات الطبية، ولكن براءات الاختراع اللاحقة اقترحت استخدامه في المتفجرات عديمة الدخان. البراءة الأصلية هي باختصار: عملية صنع نترت (Nitro) من (Hexamethylenetetramine).

لا يمكن لنترت Hexamethylenetetramine استخدام طرق النترتة المعروفة، حيث يتحلل مركب التيترامين (tetramine) إلى الأمونيا (ammonia) والفورمالديهايد (formaldehyde). ومع ذلك، فمن الممكن، الحصول على مركب نيترو، له خصائص رائعة. يذوب (Hexamethylenetetramine) في 3 أجزاء من الماء ويبرد إلى 0 درجة مئوية، ويضيف هذا المحلول إلى حامض النيتريك المركز المبرد، وسرعان ما يبدأ تبلور الحمضي النيتريكي (Hexamethylenetetramine). يجب غسل هذا الملح بالماء المتلج والإيثانول البارد وتجفيفه على الفور. خلاف ذلك، فإنه يتحلل مشكلاً الفورمالديهايد (formaldehyde) [4].



cyclotrimethylenetrinitramine (RDX)

الشكل (1-2): Cyclotrimethylenetrinitramine (RDX)

أبسط صيغة هي $C_3N_6H_6O_6$ والتكوين على النحو التالي:

- 38.34% من النتروجين.
- 16.45% من الكربون.
- 2.81% من الهيدروجين.
- 42.40% من الأوكسجين.

في عام 1920، حصل النمساوي (Edmund von Herz) على براءة اختراع (US1402693) لتقديمه طريقة محسنة لصنع RDX. وخلال الحرب العالمية الثانية، تم تطوير عدة طرق جديدة لصنع RDX، وكان العديد منها في ألمانيا، وكذلك في كل من الولايات المتحدة وكندا والمملكة المتحدة. خلال الحرب، كانت بريطانيا تجد صعوبة في تدمير الغواصات الألمانية (U(U-boats) عن طريق الجو، وذلك باستخدام المتفجرات القائمة على مادة TNT فقط. تم استخدام (RDX) كونه أكثر قوة عند استخدامه في خليط يحتوي على مادة TNT ومسحوق الألمنيوم، مما أنتج قنبلة الأعماق (متفجرة معدة للاستخدام تحت سطح المياه وبخاصة ضد الغواصات) الأكثر قوة وأشد والتي عمقاً يمكن أن تسقطها الطائرات بعد رؤية غواصة معادية. كان الخليط الذي يطلق عليه (Torpex)، يستخدم أيضاً لتفجير السدود، في نوع من القنابل التي تتخطى المياه لتجنب شباك الطوربيد قبل أن تصل إلى السد لتنفجر تحت الماء وتنتج أعلى موجة صدمة.

في الولايات المتحدة، بلغ إنتاج (RDX) في زمن الحرب 15 ألف طن شهرياً. في ألمانيا، تم إنتاج 7 آلاف طن شهرياً. على الرغم من أن تصنيع (RDX) أغلى من مادة (TNT)، إلا أنه كان لديه ضعف القدرة المتفجرة بنفس حجم مادة (TNT).

تتميز (RDX) بسرعة تفجير عالية جداً، حيث يتم تفجير النموذج الأكثر كثافة بسرعة 8750 (m/s). أصبح RDX الدعامة الأساسية في المتفجرات العسكرية، تقريباً كما كان TNT قبله. لذلك تم خلطه في مجموعة متنوعة من الأشكال تحت عدد من الأسماء:

- Troplex : RDX 42% و TNT 40% و مسحوق الألمنيوم (powdered aluminum) 18%.

- Semtex : RDX 50% و PETN 50%.

- Cyclotol : مزيج متفجر قابل للصب من TNT و RDX بنسب مختلفة.

- التركيبة A (Composition A): RDX مع الشمع، تستخدم لإضعاف الحساسية وتصنيع مادة قابلة للانفجار.

- التركيبة B (Composition B): RDX 60% و TNT 40% مع إضافة الشمع لإضعاف الحساسية.

- التركيبة C (Composition C): RDX 91% ممزوجة مع الملدن، binder (مادة غلاف بلاستيكية) وزيت محرك (motor oil).

- PBX (Polymer-bonded explosive): المواد المتفجرة البوليميرية، وهي عدد كبير من الصيغ المتفجرة البلاستيكية.

تم تقسيم التركيبة C لاحقاً إلى عدة أنواع وهي: C-2، C-3، و C-4. نقطة الانطلاق في تصنيع RDX هي كحول الميثيل (methyl alcohol). كما رأينا مع التيتريل (tetryl)، كان كحول الميثيل (المنتج بواسطة تقطير الخشب) سلعة نادرة خلال الحرب العالمية الأولى، مما حد من توافر كل من التيتريل و RDX.

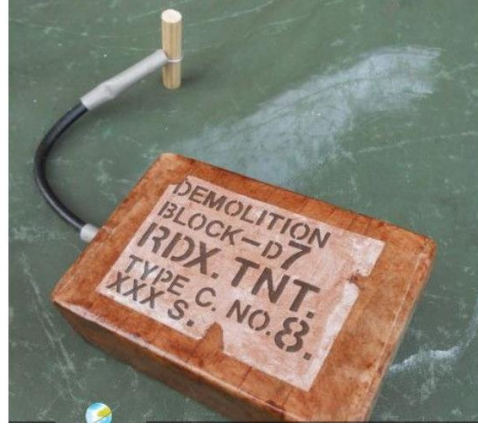
في عام 1921، حصل الكيميائي الفرنسي جورج باتارت (Georges Patart) على براءة اختراع لطريقة إنتاج كحول الميثيل من أول أكسيد الكربون والهيدروجين، باستخدام المحفزات والضغط العالي. سمحت المحفزات المطورة في ألمانيا بالإنتاج الصناعي لكميات كبيرة من كحول الميثيل، مما أدى إلى تدمير صناعة تقطير الأخشاب.

في نهاية العشرينات، كان يتم إنتاج كحول الميثيل في الولايات المتحدة بطرق أحدث، بدءاً من الفحم كقاعدة لكل من أول أكسيد الكربون والهيدروجين، الذي يتم عن طريق تمرير البخار على فحم الكوك الساخن (منتج ثانوي لتقطير الفحم).

بإضافة هيدروجين إضافي (من تفاعل البخار مع الحديد الساخن)، يمكن صنع كحول الميثيل من ثاني أكسيد الكربون بدلاً من أول أكسيد الكربون، وبما أن كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون كانت متاحة من مصانع التخمر الصناعية انخفض سعر الكحول، وأصبح متوفر بشكل كبير.

تفاعل كحول الميثيل مع شاشة نحاسية ساخنة كعامل حفاز ينتج الفورمالديهايد (formaldehyde)، وهي نقطة انطلاق لإنتاج (RDX).

بعد عام 1926، أصبح من الممكن تصنيع RDX من أي شيء آخر غير الفحم والماء والهواء. مع الوصول غير المحدود فعلياً إلى المواد الأولية، ولكن عملية التصنيع الطويلة فقط هي التي جعلت التيتريل و RDX أغلى من مادة TNT الأقل قوة.



الشكل (1-3): خليط من RDX & TNT

يملك مركب RDX قوة تدميرية وانفجارية أكبر من متفجر TNT بما أن الأخير لا يحوي أي روابط نيتروجين-نيتروجين غير مستقرة، ومع هذا ففي الغالب يتم خلطه بمواد كيميائية أخرى للحصول على تأثيرات مختلفة أخرى كما في الشكل (1-3)، كأن يجعل المتفجر أقل حساسية للصدمات. من الشائع استخدام RDX في عمليات الهدم بالتفجير حول العالم. الجدير بالذكر أخيراً هنا أن مركب آر دي إكس يمثل 91% من متفجر آخر سيء السمعة للغاية. وهو سي فور (C-4) [3-4].

1-7-4 سي فور (C-4):

C-4 وهي مادة شديدة الانفجار تصنع في المنشآت العسكرية. وهي ذات قدرة واسعة على تدمير الدروع الشكل (2-4)، وحسب الخبراء العسكريين فإن العبوة التي تزن (2Kg) من مادة C4 تعادل في حال انفجارها قوة (10Kg) من مادة TNT شديدة الانفجار. وهو مادة متفجرة لدنة سهلة التشكيل له لون رمادي فاتح، يذوب في مادة الأسيتون، ولا ينفجر بالاشتعال وإنما يحتاج إلى مفجر مباشر، وهو يتكون من أربع مواد:

poly Iso Butylene + RDX + MOTOR OIL + Diethyle hexyl
4 لإسمه.

C-4 أو المركب 4 واحد من المتفجرات البلاستيكية المتنوعة، الفكرة الأساسية من المتفجرات البلاستيكية، أو الباوندات البلاستيكية وهي دمج المواد الكيميائية المتفجرة مع مادة غلاف بلاستيكية (plastic binder) material هذا الـ binder له وظيفتين مهمتين:

- تغليف المواد المتفجرة، لتصبح أقل حساسية بالصدمة والحرارة، فيجعلها بمأمن نسبي من التفجير .
- يجعل المواد المتفجرة مرنة ومطاوعة بشكل فائق (highly malleable)، ويمكنك تشكيله بعدة طرق لجعل الانفجار باتجاهات مختلفة [4].

المادة المتفجرة في (C-4) هي cyclotrimethylene-trinitramine ($C_3H_6N_6O_6$) أي مادة RDX يضاف لها مادة مركبة من polyisobutylene، الغلاف و sebacate di(2-ethylhexyl)، الملدن (the plasticizer) (عنصر يجعل المادة المتفجرة لينة ومرنة) وبالإضافة الى ذلك كمية من زيت المحركات (motor oil) و (dimethyl-2, 3-dinitrobutane (DMDNB-3))، بالحاصل العام مكونات ال C4:

- RDX بنسبة 91%.

- Di(2-ethylhexyl) sebacate بنسبة 5.3%.

- Polyisobutylene بنسبة 2.1%.

- Motor oil بنسبة 1.6%.



الشكل (1-4): مادة سي فور (C-4)

1-7-5 بيتن (PETN):

رباعي نترات خماسي ايرينثريتول أو ما يعرف بـ "PETN" اختصاراً لـ (pentrathritol tetranitrate) هو واحد من أشد وأقوى المتفجرات عالية القوة المعروفة لدى البشر بروابط نيتروجينية قريبة من تلك الموجودة في متفجرات TNT والنيتروجليسرين في الديناميت (الشكل (1-5)).

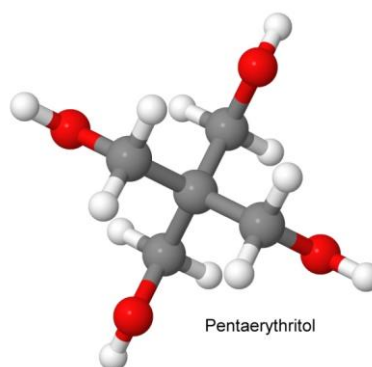
حضر البيتن لأول مرة الكيميائي الألماني Bernard Tollens عام 1891، حيث استخدمه الجيش الألماني في الحرب العالمية الأولى، ومن بعدها وبكثافة في الحرب العالمية الثانية وحتى الآن مع قرنه عادة بمتفجرات أخرى مثل TNT و RDX كذلك يستخدم البيتن كأداة تفجير بالقنابل النووية الأضخم والأشد

تدميراً ونظراً لخواصه الطبية والعلاجية التي تم اكتشافها به، كذلك يستخدم PETN موسع للأوعية الدموية مثل النتروجليسرين (nitroglycerin)، ويمكن استخدامه لعلاج الذبحة الصدرية. في شكل نقي تقريباً في عقار (Lentonitrat)، يمكن رشه تحت اللسان لتخفيف الأعراض وخفض ضغط الدم بسرعة.



الشكل (5-1): مادة بيتين PETN

تشبه Pentaerythritol الجليسرين، ولكن بدلاً من وجود ثلاثة كربونات وثلاث مجموعات OH، فإنه يحتوي على خمسة كربونات مرتبة بشكل متماثل، مع أربع مجموعات OH مرتبطة بالكربونات الطرفية الأربعة (الشكل (6-1)).



الشكل (6-1): Pentaerythritol

عند البحث عن مادة متفجرة أفضل من النتروجليسرين (Nitroglycerin)، من المنطقي أن نبدأ بشيء مشابه للجلسرين، ولكن مع المزيد من الكربون، لأن النتروجليسرين لديه توازن أوكسجين إيجابي، والوقود الإضافي سيجعل التوازن أقرب إلى الصفر. النتروجليسرين هو ما يسميه الكيميائيون إستر (ester). الإستر هو مزيج من حمض مثل حمض النيتريك (nitric acid) وكحول، وهو عبارة عن سلسلة كربون مع مجموعة (OH) متصلة. يفقد حمض النيتريك (HNO₃) في هذه الحالة الهيدروجين (يعطيه) إلى

مجموعة (OH)، لصنع HOH (ماء أو H₂O). يرتبط الجزء المتبقي من الحمض بالكربون الذي كان يستخدم لمجموعة (OH) المرافقة.

من خلال صب مسحوق بينتا إريثريتول (pentaerythritol powder) ببطء في مزيج بارد من أحماض الكبريتيك (sulfuric acid) والنيتريك (nitric acid) المركزة، يمكننا أن نعلق أربع مجموعات من (NO₃) على أرجل الجزيء. هذا بالضبط ما تم في مصنع الذخائر الألمانية في راينيش-ويستفاليش سبرينجستوف في كولونيا، ألمانيا في عام 1894.

PETN هو واحد من أكثر المركبات المتفجرة المعروفة، فهو أكثر انفجاراً بمقدار 1.66 مرة من مادة TNT. في عام 1912، حصلت الحكومة الألمانية على براءة اختراع أفضل طريقة لإنتاجه، في الوقت المناسب للاستخدام في الحرب العالمية الأولى (1914 إلى 1918). تتحلل PETN ببطء أكبر من النيتروجليسرين (nitroglycerin) أو النيتروسيليلوز (nitrocellulose)، لكنه لا يزال أقل استقراراً من مادة TNT. أنه أقل حساسية للصدمة من النيتروجليسرين، ولكنه أكثر حساسية من TNT. لهذه الأسباب، غالباً ما يتم خلطه مع مادة TNT أو غيرها من المتفجرات، مما ينتج عنه مزيج ذو قوة تدميرية عالية من PETN، ولكنه أقل حساسية ويمكن تخزينه بشكل أفضل.

PETN هو العنصر المستخدم في القنابل المتفجرة، وهو عبارة عن سلسلة متفجرة تستخدم لتفجير شحنات متفجرة أخرى. وهناك أيضاً ما يسمى (primacord أو detcord)، وهو عبارة عن أنبوب بلاستيكي ممتلئ بـ PETN. من خلال ربط الشحنات المتباعدة بشكل منفصل مع detcord، تؤدي سرعة التفجير العالية للغاية لـ PETN إلى تفجير شبه متزامن لجميع الشحنات.

تستطيع لفات قليلة من detcord حول شجرة أن تقطعها بشكل أسرع من المنشار، ويتم استخدامها بهذه الطريقة عسكرياً من قبل الفرق الهندسية لتمهيد الطريق للمعدات الآلية. يشكل PETN مع النيتروسيليلوز ما يسمى (Primasheet) و (Detasheet). هذه تستخدم لتطبيقات اللحام المتفجر، حيث يمكن لفها حول الأشياء المراد لحامها معاً.

مزيج من 50% من PETN و 50% من TNT يسمى البنتوليت (Pentolite). يمكن صب البنتوليت مثل مادة تي إن تي، وهو أكثر ثباتاً من PETN النقي، في حين لا يزال لديه سرعة تفجير تتراوح بين 7,400 و 7,800 (m/s). يتم استخدامه كمفجر معزز (داعم) في تفجير المتفجرات التي أساسها خلائط من نترات الأمونيوم.

غالباً ما يتم بلغمه PETN (المتفجرات البلغمية عبارة عن مادة متفجرة تحتوي على عامل يضاف إلى استقراره أو إزالة الحساسية منه. في بعض الأحيان يكون هذا أمراً مرغوباً فيه إما لتحسين خصائص التعامل مع مادة متفجرة أو لتقليل حساسيتها أو سرعتها أو تفجيرها) (يصبح أقل حساسية بإضافة مواد أقل انفجاراً أو غير متفجرة) بواسطة البارافين أو الشمع، أو عن طريق البوليمرات مثل المطاط أو السيليكون لصنع متفجرات بلاستيكية. في هذا النموذج، يمكن استخدامه في بعض قذائف المدفعية ذات العيار الأصغر. ونظراً لأن PETN لديه ضغط بخار منخفض (لا يتبخر بسهولة)، فإنه من الصعب اكتشافه، بواسطة أجهزة الكشف عن القنابل أو كلاب استنشاق القنابل. إلى جانب قوتها العالية وسهولة تصنيعها، مما جعلها المكان المفضل للعديد من المؤامرات الإرهابية سيئة السمعة.

حاول ريتشارد ريد (Richard Reid)، المسمى مفجر الأحذية (صاحب الحذاء الناسف) (shoe bomber)، استخدام PETN التي فُجرت من قبل TATP لإسقاط طائرة الخطوط الجوية الأمريكية الرحلة 63 (Flight 63). لقد نجحت تقريباً مؤامرة القاعدة الانتحارية لاغتيال الأمير السعودي محمد بن نايف في انفجار قنبلة تم إدخالها في المستقيم الانتحاري. قام بتفجير القنبلة بنجاح، لكن الهدف نجا. حاول "مفجر الملابس الداخلية" (Underwear Bomber) النيجيري دون جدوى تفجير قنبلة PETN مخبئة داخل ملابسه الداخلية عن طريق حقنه مع حقنة سائل يعتقد أنه النتروجليسرين. نشب حريق صغير بدلاً من التفجير المخطط له. تم العثور على خراطيش طابعة PETN في رحلة دبي، وذلك بفضل عمل المخابرات (وليس عن طريق الكشف عن القنابل). لو انفجرت هذه الخراطيش لكانوا أكثر قوة بما يكفي لإسقاط الطائرة [3-4].

1-7-6 أزيد الأزيدوآزيد Azidoazide Azide

من بين جميع المتفجرات النيتروجينية، يعد أزيد الأزيدوآزيد هو الأقل استقراراً على الإطلاق. يملك أزيد الأزيدوآزيد 14 ذرة نيتروجين مرصوصة بشكل متتال في روابط نيتروجين-نيتروجين، وهو جزيء لا يمكن رصده أو تكونه في الطبيعة مطلقاً نظراً لعدم استقراره الشديد، بل تم الكشف عنه أول مرة في مختبر كيميائي ألماني بقيادة مجموعة توماس كلابوتكي في عام 2011.

حيث أن أي محاولة للمس أزيد الأزيدوآزيد أو التعامل معه أو النظر إليه ستتسبب في تكسير الروابط غير المستقرة بين ذراته الأربع عشرة لتتحول إلى جزيئات عديدة تتفجر وتطلق غاز النيتروجين. هذا التفاعل يطلق كميات كبيرة من الحرارة، لذا لم يتم اختبار هذه المادة إلا بمقادير صغيرة للغاية، ومع هذا فقد انفجرت مرات عديدة داخل معدات وآلات تحليل كيميائية باهظة الثمن على الرغم من توخي الحذر. من الصعب

تماماً إنتاج أي كميات كبيرة من هذه المادة دون حدوث كارثة، لذا لم ينتجها أحد حتى الآن وعلى الأرجح لن ينتجها أحد. وبالطبع، فالمواد التي تم عرضها بالأعلى ليست شاملة، حيث يوجد الكثير من المتفجرات والمواد الكيميائية الخطرة الأخرى. ولكن المواد الخمسة السابقة تضم أشهر وأخطر تلك المواد الكيميائية غير النووية حتى الآن. ومن الجيد أن نعلم أن أغلبها يصعب تحضيره، ما عدا متفجر أم الشيطان TATP (الشكل (1-7)). [3-5].



الشكل (1-7): أزيد الأزيدوآزيد Azidoazide Azide

1-8 الخصائص المميزة للمواد المتفجرة:

تعتمد أغلب تقنيات الكشف عن المواد المتفجرة على نسب العناصر المكونة لها أو كثافتها، فكل مادة كثافة تميزها عن غيرها وتركيب كيميائي مختلف [6]. يعرض الجدول (1-1) نسب (H/O) للمواد المختلفة. ويمكن بسهولة ملاحظة أن نسب (H/O) في المتفجرات أقل بكثير من المواد الأخرى، ويمكن أن يميز قياس (H/O) المتفجرات من المواد الأخرى.

الجدول (1-1): معدلات H/O لمواد متنوعة

H/O ratios of various substances

Substance	Common materials			Explosives		
	Sugar	Water	Wood	PETN	TNT	C4
H/O	0.14	0.12	0.14	0.04	0.05	0.09
Substance	Narcotics		Other chemicals			
	Heroin	Cocaine	Urea	Polyethylene	Ammonium nitrate	
H/O	0.29	0.33	3.39	0	2.55	

كما يظهر في الجدول (1-2) كثافة بعض المواد المتفجرة حيث نلاحظ ان الكثافات تتدرج بقيم قريبة من بعضها البعض وتزداد الكثافة كلما زادت نسبة الهيدروجين الى الاوكسجين.

الجدول (1-2): كثافة بعض المواد المتفجرة

اسم المادة المتفجرة explosive	الكثافة density (g/ml)
Trinitrotoluene(TNT)	1.60
Semtex 1A(76% PETN+6% RDX) المتفجرات البلاستيكية	1.55
Nitroglycerin(NG) نتروغليسيرين	1.59
Hexogen(RDX) الهيكسوجين	1.78
مادة هيكسال: خليط بين RDX شديد الانفجار والمنيوم وشمع Hexal(76% Rdx+36% AL+4% wax)	1.79
مادة متفجرة بلاستيكية سي فور Composition C-4(91% RDX)	1.59
مادة خليط بين TNT&RDX CompositionB(63%RDX+36%TNT+1%WAX)	1.72

منسّق:علامات الجدولة: 16.01 سم, يمين + ليس عند 36.21 سم

منسّق:مسافة بعد: 5 نقطة

الفصل الثاني

تقنيات الكشف عن المواد المتفجرة

2-1 مقدمة:

لاقت أبحاث الكشف عن المواد المتفجرة (Explosive detection) في السنوات القليلة الماضية اهتماماً متزايداً على مستوى العالم بسبب النشاط الإرهابي الذي تقاوم في السنوات الأخيرة [7]، وسنستعرض في هذا الفصل التقنيات المستخدمة في الكشف عن المتفجرات بحيث نقدم الأرضية اللازمة لفهم ما تم إنجازه في الجانب العملي من هذه الرسالة.

2-2 تصنيف تقنيات الكشف عن المتفجرات:

تم تصنيف تقنيات الكشف عن المواد المتفجرة إلى تقنيات كتلية (bulk) وتقنيات أثرية (trace). تبحث هذه التقنيات الكتلية عن كتل لها خواص محددة تدل على كونها متفجرات، فمثلاً يستهدف كاشف المتفجرات المواد ذات الكميات الكبيرة من النتروجين (nitrogen) أو/و الأوكسجين (oxygen) كما يستهدف المواد ذات الكثافة الكتلية (bulk density) العالية [8].

لكن توجد في الطبيعة مركبات متفجرة لا تنطبق عليها هذه الخصائص المستهدفة، ونذكر مثلاً عن هذه المواد فوق أكسيد الأسيتون (triacetone triperoxide)، كما توجد مواد غير ضارة تنطبق عليها الخصائص المستهدفة المذكورة مثل السجق (sausage) [8].

أما التقنيات الأثرية فتقوم بالبحث عن وجود أثر ما لمادة كيميائية معينة (عادةً ما يتم التحسس لأبخرة المواد الكيميائية) من بين مكتبة من الكيميائيات المستهدفة (library of target chemicals) بدلاً من البحث عن خصائص المادة، وهذا يعني بأن احتمال الإنذارات الكاذبة (false alarms) أقل بكثير من ما هو عليه في الكشف الكتلي المستند إلى خصائص المواد.

ولكن من عيوب الطرق الأثرية بالمقابل أن هذه الطرق لا تعطي أية معلومات مكانية (spatial information) تسمح بتحديد مكان وجود المتفجرات، كما أن المواد التي يمكن الكشف عنها في مكتبة الكيميائيات المستهدفة محدودة وبالنتيجة لا يمكن للطرق الأثرية أن تفعل شيئاً حيال الابتكارات الجديدة للإرهابيين.

كما يمكن أن يدل كاشف المتفجرات الأثري على وجود متفجرات غير موجودة فعلاً، إذا كانت المتفجرات موجودة سابقاً وبقيت منها بعض الأبخرة. ومن الجدير بالذكر أننا نناقش في هذا البحث تقنيات كشف المتفجرات الكتلية بالتحديد، إلا أننا سنقدم في الفقرة التالية طرائق متعددة في الكشف عن المتفجرات منها كتلية ومنها أثرية [2].

1-2-2 طرائق كشف المتفجرات:

سنقدم في هذه الفقرة أهم طرائق كشف المتفجرات التقنية والتقنية الحيوية (biotechnology)، حيث نستعرض في البداية الطرق التقنية الحيوية والتي تشمل الكشف عن المتفجرات باستخدام الكلاب والنحل، ثم ننتقل الى عرض الكواشف اللونية وتقنيات الكشف الميكانيكي عن الروائح والتصوير بالأشعة السينية، وأسلاك النانو السيليكونية وتفعيل النترونات.

1-2-1-1 الطرق التقنية الحيوية في الكشف عن المتفجرات

من المعروف أن الكلاب تستخدم في الكشف عن المتفجرات، حيث يتم استخدام أنواع خاصة مدربة من الكلاب (الشكل (3-1)) للكشف عن المتفجرات باستخدام حاسة الشم الحساسة جداً للروائح، وعلى الرغم من فعالية هذه الطريقة إلا أن أداء الكلاب يتراجع بشكل كبير وتصبح غير موثوقة عندما تتعب.



الشكل (2-1): صورة كلب مدرب للكشف عن المواد المشبوهة

يتم تدريب الكلاب من قبل مدربين متخصصين بحيث يصبح الكلب قادراً على تمييز روائح العديد من المواد المتفجرة الشائعة وإعلام مدربه عند الكشف عن أي من هذه الروائح، ونشير إلى أن هذه الطريقة قديمة جداً وتعود إلى خمسينات القرن الماضي.

ومن الطرق التكنولوجية نذكر أيضاً استخدام النحل (honey bees) في الكشف عن المتفجرات، حيث تستند هذه الطريقة إلى النحل المدرب من جهة وإلى برنامج حاسوبي متطور يراقب ردات الفعل الاستراتيجية للنحل، وعلى الرغم من أن النحل أكثر حساسية للروائح من الكلاب إلا أن أحد أبرز مساوئ هذه الطريقة أن النحل المدرب يخدم لمدة يومين فقط [7-8].

2-2-1-2 الكواشف اللونية:

من أقدم وأبسط الطرق في الكشف عن المتفجرات الكواشف اللونية (Colorimetric)، وينطوي الكشف اللوني على مراقبة تغير لون كاشف كيميائي معين (chemical reagent) نتيجة وجود مادة كيميائية أخرى مجهولة (أو عينة من هذه المادة)، حيث تشير الأدلة اللونية المعروفة مسبقاً إلى وجود مادة متفجرة كما يحدد الكشف اللوني في كثير من الحالات مجموعة المتفجرات التي صنعت منها المادة المتفجرة. إن المجموعات الرئيسية من المتفجرات هي المتفجرات النتروعطرية (nitroaromatic) ومتفجرات استرات النترات (nitrate ester) ومتفجرات النترامين (nitramine) كما أن هنالك مجموعة متفجرات أخرى تشمل المتفجرات المستندة إلى مركبات النترات اللاعضوية (inorganic nitrate based explosives) والمتفجرات المستندة إلى الكلور (chlorate based explosives)، وقد أنتجت العديد من الشركات كواشف متفجرات لونية مؤتمتة منها يكشف كميات كتلية من المواد المتفجرة ومنها يكشف كميات أثرية من هذه المواد، ونبين في الشكل (2-2) جهاز كشف متفجرات يستند إلى الكشف اللوني المؤتمت، حيث تظهر الواجهة الأمامية للجهاز في الشكل (3-2-a) بينما يظهر الشكل (2-2-b) مجموعة من بطاقات الكشف اللوني المخصصة للاستخدام في هذا الجهاز، أما الشكل (2-2-c) يظهر الجهة الخلفية للجهاز ويتضح فيها مكان إدخال بطاقة الكشف اللوني المطلوبة [7-8].

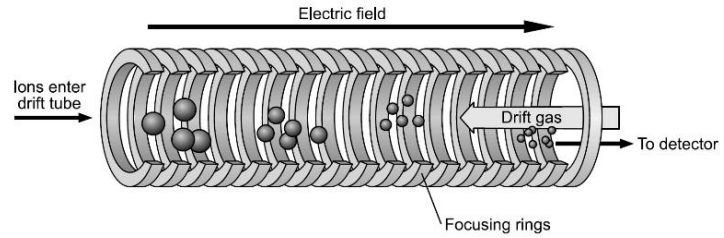


الشكل (2-2): جهاز كشف المتفجرات يستند إلى الكشف اللوني (Colorimetric)

2-2-1-3 الكشف الميكانيكي عن الروائح (Mechanical scent detection)

تم تطوير العديد من الآلات المخصصة للكشف الأثري عن المواد المتفجرة، ومن أكثر هذه الطرق شيوعاً في التطبيقات العملية هي تقنية مطياف حركية الأيونات (Ion-Mobility Spectrometry) IMS، وهذه الطريقة مشابهة لمطياف الكتلة (Mass Spectrometry) MS حيث يقوم مطياف الكتلة بتأيين الجزيئات ومن ثم ترسل الجزيئات المؤينة (ionized molecules) إلى حقل كهربائي ضمن وسط مفرغ من الهواء،

أما مطياف حركية الأيونات فيعمل بشكل مشابه باستثناء أنه يعمل تحت الضغط الجوي الطبيعي بدلاً من الأوساط المفرغة من الهواء، ويبين الشكل (3-3) كيف يفصل مطياف حركية الأيونات بين الأيونات تبعاً لشكلها و لشحنتها [8].



الشكل (2-3): مطياف حركية الأيونات يفصل الأيونات حسب شكلها وحسب شحنتها

إن الزمن الذي يستغرقه أيون ما في IMS ليقطع مسافة معينة ضمن الحقل الكهربائي هو مقياس لمقدار نسبة حجم الأيون إلى شحنته (Size to charge ratio)، فالأيونات ذات المقطع العرضي الأكبر ستتصادم أكثر مع الهواء تحت الضغط الجوي الطبيعي وبالتالي ستكون أبطأ، وبالطبع فالأيونات ذات الشحنة الأكبر ستسرع بشكل أكبر ضمن الحقل الكهربائي وهذا هو مبدأ مطياف حركة الأيونات.



الشكل (2-4): صورة جهاز تحليل الغاز الكروماتوغرافي GC

وعادةً ما يستخدم جهاز التحليل الكروماتوغرافي للغاز (GC (Gas Chromatography مع تقنيات الكشف الميكانيكي عن الروائح، والهدف من استخدامه هو فصل الجزيئات قبل الكشف. ومن الجدير بالذكر أن تكامل جهاز التحليل الكروماتوغرافي للغاز مع مطياف حركية الأيونات لا يحسن فقط من أداء الكاشف،

إنما يضيف بعداً إضافياً للبيانات، حيث يمكن استخدام الزمن الذي يستغرقه الجزيء ليعبر جهاز التحليل الكروماتوغرافي للغاز كمؤشر على هوية الجزيء، ونبين في الشكل (4-2) صورة لجهاز التحليل الكروماتوغرافي للغاز [8] .

4-2-1-2 التصوير بالأشعة السينية (X-ray imaging)

يتم استخدام أجهزة تصوير بالأشعة السينية مصممة بشكل خاص للكشف عن المتفجرات وذلك بالبحث عن كثافات معينة للمواد التي يتم فحصها. حيث يتم بالتحديد استخدام أجهزة تصوير طبقي محوري (scan CT) (Computed axial tomography) مزودة ببرامج خاصة تمتلك إمكانية الكشف عن المتفجرات بالاستناد إلى مكتبة أكواد لونية (color coding) للمواد المتفجرة، كما تفيد هذه التقنية في الكشف عن أدوات التفجير بمعزل عن المادة المتفجرة.

يوضح في الشكل (5-2) جهاز تصوير بالأشعة السينية اسمه (CX3800M) محمول على شاحنة تُستخدم لفحص المركبات وما تحمله من حاويات، وتبلغ استطاعة الأشعة التي يرسلها هذا الجهاز (3 MeV) وهذه الأشعة قادرة على اختراق 25(cm) من الفولاذ، ويُنتج الجهاز صورة عالية الدقة يمكن مقارنتها بقوائم الحمولات التي يفترض أن تكون موجودة ضمن المركبات المفحوصة.

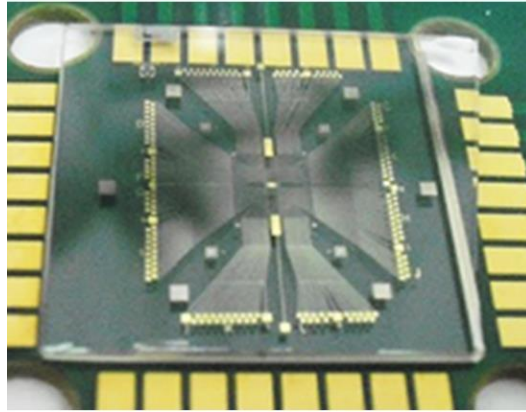


الشكل (5-2): جهاز تصوير بالأشعة السينية محمول على شاحنة

4-2-1-2 استخدام الأسلاك النانوية السيليكونية في الكشف الأثري عن المتفجرات (Silicon nanowires for trace detection of explosives)

بيّنت الأبحاث الحديثة أن استخدام أسلاك نانوية (nanowires) مصنوعة من السيليكون على شكل ترانزستورات حلقية (FET (field effect transistors يحقق كفاءة عالية في الكشف الأثري عن المتفجرات

وبحساسية تتفوق على حاسة شم الكلاب المدربة حيث تشمل المواد الممكن اكتشافها بهذه التقنية العديد من المتفجرات مثل TNT و RDX و PETN وغيرها، ويبين الشكل (6-2) كاشف متفجرات يستند إلى أسلاك النانو السيليكونية قادر على كشف المتفجرات بمجرد وجود أثر لها في الهواء أو في السوائل المفحوصة [7-8].



الشكل (6-2): كاشف قنابل يعتمد على أسلاك نانو سيليكونية في الكشف الأثري عن المتفجرات بمجرد وجود أثر لها في الهواء أو في السوائل

في هذه الطريقة يتم الكشف عن المتفجرات بتمرير سائل أو بخار يحوي المادة المتفجرة المستهدفة فوق سطح شريحة تحوي عشرات أو مئات عناصر التحسس المصنعة من الأسلاك النانوية السيليكونية (Silicon nanowire sensing elements)، حيث تتفاعل جزيئات المادة المتفجرة مع سطح أسلاك النانو وينتج عن ذلك تغييراً في الخصائص الكهربائية لسلك النانو وهذا التغير قابل للقياس (measurable). إن القدرة العالية للأسلاك النانوية السيليكونية في الكشف عن الكميات الأثرية من أبخرة المتفجرات تدفع العديد من مراكز الأبحاث في العالم إلى تطوير هذه الأنظمة للوصول بها إلى مرحلة متكاملة تسمح بإنتاجها كمنتجات تجارية (commercial systems) تخدم التطبيقات الأمنية [8].

6-2-1-2 تفعيل النيوترونات (Neutron activation):

النيوترونات هي جسيمات غير مشحونة، لذلك عندما تنتشعب المواد فإنها تتفاعل عن طريق التفاعلات النووية مع النيوترونات والبروتونات في نواة ذرات المادة المستهدفة. بالنسبة لمعظم المواد المستهدفة، يكون المقطع العرضي للنترون، أو احتمال التفاعل، أصغر بكثير من الفوتون الذي يحيط به ذرة إلكترونية. وبالتالي فإن النيوترونات لديها نطاق اختراق أكبر. بسبب هذه القدرة على الاختراق العميق في المواد الكثيفة، تم اقتراح

استخدام النيوترون للكشف عن المتفجرات في أشياء صغيرة، مثل أكياس الركاب، وكذلك بالنسبة لحاويات الشحن الكبيرة. عندما تتفاعل النيوترونات مع المواد، فهي حساسة لهيكل النواة، وبالتالي لا تبحث النيوترونات فقط عن المحتوى الأولي للمادة المستهدفة، ولكن أيضاً للخليط النظائري.

عادةً ما يتم الإشارة إلى الذرة المستهدفة على أنها (A_ZX) حيث X هي رمز العنصر الهدف، Z هو الرقم الذري (عدد الإلكترونات/البروتونات في الذرة المستهدفة)، A هي الكتلة الذرية (مجموع الفوتونات والبروتونات في نواة). قد يكون الانتثار مرناً، حيث يتم إضافة طاقة النيوترون الساكنة إلى الطاقة الحركية للنيوترون الخارج إلى الذرة المستهدفة حيث يتم حفظ كل الطاقة والزخم، أو عدم المرونة، حيث يتم تحفيز الذرة المستهدفة وتركها في حالة طاقة أعلى.

هنالك أجهزة مصممة بشكل خاص لنقوم بإمطار المتفجرات المشتبهة بالنيوترونات (neutrons)، من ثم تقوم هذه الأجهزة بقراءة شكل إشعاع غاما الناتج (gamma radiation decay signatures) لتحديد التركيب الكيميائي للمادة المفحوصة، حيث تحوي المتفجرات عادةً على نسب معينة من الكربون والهيدروجين والأوكسجين وهذه النسب قابلة للكشف باستخدام الأجهزة المذكورة.

على الرغم من كون تقنية تحليل تفعيل النيوترونات (NNA neutron activation analysis) من التقنيات التقليدية المستخدمة في الكشف عن المتفجرات، إلا أن هذه الطريقة تواجه صعوبات في التمييز بين المواد العضوية المتفجرة والمواد العضوية غير المتفجرة، والسبب في ذلك يعود إلى أن جميع هذه المواد لها نفس المكونات وهي الكربون والهيدروجين والنتروجين والأوكسجين [8-9].

لقد تطورت تقنيات الكشف المعتمدة على النيوترونات وسنستعرض في الفقرة التالية هذه التطورات.

1-6-2-2 تفعيل النيوترون الحراري (TNA):

واحدة من التقنيات الأولى المعتمدة على النيوترون والمقترحة للكشف عن المتفجرات كانت تنشيط النيوترون الحراري (TNA). هذا أيضاً أحد أكثر تقنيات الكشف عن المتفجرات النووية تفصيلاً [8-9]. تستخدم هذه التقنية مصدراً نترونيا للطاقة الحرارية لفحص عينة، على سبيل المثال، حقيبة ركاب في المطار. نظراً لأن توليد النيوترونات عالية الطاقة أسهل من توليد نيوترونات الطاقة الحرارية، غالباً ما تستخدم تطبيقات هذه التكنولوجيا مصدراً نترونيا سريعاً ومواد مبعثرة لتبدد طاقة النيوترون الصادر قبل توجيهها إلى العينة. عندما يمر النيوترون الحراري عبر المادة الموجودة في العينة، يمكن أن يكون هناك تفاعلات التقاط/امتصاص مع العناصر الموجودة في العينة. يحتوي النيوتروجين على مقطع عرضي حراري كبير (75 mb) بالنسبة إلى المقطع العرضي لالتقاط العناصر الأخرى الموجودة في المتفجرات.

ينبعث عن تفاعل النقاط النيتروجين أشعة غاما بطاقة (MeV) 10.8292 مميزة للغاية (إلى جانب أشعة جاما الأخرى). تأخر الانلحاق الحراري وانبعثت أشعة غاما بطاقة (MeV) 10.8292 بسبب وقت التسخين النتروني، مما يسهل اكتشافه بوجود العديد من أشعة غاما الأخرى المنتشرة بشكل غير طبيعي. تقوم كاشفات جاما بقياس (eV) 10.8292 من أشعة غاما الملتقطة وإنتاج مقياس لمحتوى النيتروجين في القسم من العينة الذي يتم فحصه بواسطة شعاع النترون. في التجربة العملية، يتم موازنة شعاع النترون ومسحها ضوئياً على الحقيبة. يتم استخدام خريطة النيتروجين الناتجة لتحديد احتمال وجود متفجرات. الميزة الرئيسية لتقنية (TNA) أنها يمكن أن تنتج خريطة تحدد نسبة النيتروجين في العديد من المتفجرات الهامة التي تحتوي على نسبة عالية من النيتروجين. سوف تخترق النترونات المستخدمة في هذه التقنية بسهولة الشاشات المعدنية التي قد تحمي طرق الأشعة السينية التقليدية. المشكلة الأكثر أهمية في هذا النهج هي أن محتوى النيتروجين، في حد ذاته، ليس متميزاً بدرجة كافية لمنع حدوث معدل كبير من الخطأ. تشمل العيوب الأخرى لهذا النظام وزنه الكبير وتكلفته العالية ووجود مصدر مشع. تم توضيح نماذج TNA الأولية التي لا تمنع أي من هذه المشكلات تطبيق التكنولوجيا، فهي تشير فقط إلى أن التقنيات الأخرى هي الأفضل. يمثل معايرة شعاع النيوترون الحراري تحديات كبيرة لهذه التكنولوجيا. تم اقتراح تحسينات في النموذج الأولي لـ (TNA)، والذي يعالج النقصان في الحجم والوزن [10].

2-2-1-6-2 تفعيل النترونات السريع (FNA):

كانت تقنية التنشيط السريع للنترونات (FNA) بمثابة أسلوب متطور للحصول على معلومات أكثر عن نسبة النيتروجين من المادة. في (FNA)، يتم استخدام النترونات عالية الطاقة، بدلاً من النترونات الحرارية. تنتج أشعة غاما من النترونات غير المرنة المنتشرة عن ذرات الأكسجين بطاقة (eV) 6.13 وعن ذرات الكربون بطاقة (eV) 4.44 وعن ذرات النيتروجين بطاقة (eV) 5.11، 2.31، 1.63 في الحاوية ويتم قياسها بالكاشفات التي تحيط بالحاوية. النترونات عالية الطاقة مطلوبة لإثارة ردود الفعل غير المرنة، ببساطة مصدر نترون أحادي الطاقة تحليل توافيق غاما غير المرنة.

تستخدم معظم تطبيقات FNA تفاعل $^3\text{H}(\text{d},\text{n})^4\text{He}$ (Deuterium-tritium) لإنتاج مصدر نيوتروني أحادي الطاقة بطاقة (MeV) 14. إن التفاعل (D-T) هو واحد من أسهل التفاعلات (طاقة جسيمية منخفضة الحوادث، عادةً تكون حوالي 150(kev) للديوتيريوم وهي نواة الديوتيريوم على هدف ثلاثي، وبمقطع عرضي مرتفع) لإنتاج نيوترون أحادي الطاقة. تفاعل آخر يستخدم هو تفاعل (Deuterium- $^2\text{H}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$ (Deuterium) الذي يمكن أن ينتج نيوترونات أحادية الطاقة مع طاقات تتراوح مع طاقة (MeV) 2.5.

يشار إلى نهج واحد FNA كاستجابة نيوترونات نبضية وأشعة غاما [18]. في هذا النهج، يستخدم المسرع لإنتاج 14 نيوترون من تفاعل (D-T). يتم تسريع المسرع عند حوالي 8 (KHZ) مع نبضة ديترسيوم خلال 7 (ms). بالإضافة إلى النيوترونات، تم الكشف عن الكبريت عند الطاقة (MeV) 5.42 والكلور عند طاقة (MeV) 6.111 باستخدام أشعة غاما الناتجة عن الفحص الحراري النبضي للنيوترونات. قد يكون اكتشاف الكلور مهماً في اكتشاف بعض المتفجرات التي لا تحتوي على النيوترونات وفي اكتشاف بعض الأدوية، مثل الكوكايين. يمكن أن يكون الكبريت مهماً في اكتشاف بعض عوامل الحرب الكيميائية.

تنتج أنظمة (FNA) فقط عرضاً ثنائي الأبعاد بدون أي عمق جانبي. عادةً ما يكون للأنظمة حجم كبير من البيكسل وبالتالي صورة سيئة. يرتبط حجم البيكسل بحجم شعاع النيوترون الساقط المنتشر. وهذه تعتبر من مساوئ هذا النظام [10-11].

3-6-2-1-2 الجسيمات المرتبطة بسرعة النيوترون:

هذه التقنية هي تحسين لمصدر النيوترون (D-T) ذو الأنابيب المغلق. في الجسيمات المرتبطة بالنيوترونات السريعة، يتم اكتشاف ارتداد جسيمات ألفا المصاحبة لتحديد وقت واتجاه انبعاث النيوترون. يستخدم مصدر النيوترون DT تفاعل $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$. ويتكون التفاعل من نيوترون ذو طاقة (MeV) 14 وجسيم ألفا (MeV) 3.5. في تصوير الجسيمات المرتبطة Associated Particle Imaging (API)، تم الكشف عن جسيم ألفا بواسطة كاشف حساس للموضع. يمكن دمج موقع جسيم ألفا مع اعتبارات حركية بسيطة لتحديد اتجاه النيوترون المنبعث.

يمكن الجمع بين توقيت اكتشاف أشعة ألفا وأية أشعة غاما لاحقة من التبعثر غير المرين للنيوترونات الناتجة وسرعة النيوترونات والفوتونات لتقدير عمق العينة الذي حدث فيه تفاعل غير مرين.

يشار إلى تنفيذ واحد من هذه الطرق باسم مولد النيوترونات مختوم الانبوب بالجسيمات المرتبطة Associated particle sealed-tube neutron Generator (APSTNG) [10-11].

تم دمج بعض المقترحات بين معلومات صور (3D) ثلاثية الأبعاد المرتبطة بـ APSTNG وبين مجموعات النقاط النيوترون البطيئة و"غير المرتبطة بالصورة". تتضمن هذه الأساليب مجموعة من كاشفات النيوترون بحيث يمكن إجراء التحليل الطيفي لنقل النيوترونات. لسوء الحظ، لم يتم تطوير تفاصيل التنفيذ حول كيفية تطبيق نهج الكشف هذه بأي درجة من التأزر أو دمج البيانات، بدلاً من إدراكها بشكل صارم.

ونظراً لأن اتجاه النيوترون معروف، فإن نهج (PFNA) لا يتطلب استخدام الموازنات لتركيز الحزمة العارضة وليس هناك حاجة لنبذ المصدر. ومع ذلك، نظراً لأن النيوترونات تنبعث في توزيع موحد الخواص

بشكل أساسي، فإن العديد من منها لا تزال تقشّر في التأثير على العينة المستهدفة ونحتاج إلى حماية النترونات في الاتجاهات الداخلية المحيطة بمناطق المصدر والأوكياس. بالإضافة إلى ذلك، فإن نشر النترونات في المادة المحمية جنباً إلى جنب مع غاما الناتجة غير المرنة ينتج خلفية مهمة قد تتداخل مع اكتشاف غاما العاجلة من الأحداث غير المرنة الناتجة في المادة المستهدفة [10,11].

4-6-2-2 تحليل النترون السريع النبضي (PFNA):

أحد التحسينات الأكثر شعبية في (FNA) ينطوي على استخدام مصدر نيوتروني نابض. هناك العديد من الخيارات لمسرعات النيوترونات المستخدمة في (PFNA). تتمثل إحدى الطرق التمثيلية في استخدام حاقن سعة (300 mA/h) مع مسرع ديوتيريوم (6 MeV) كمصدر (D-D) للنترونات.

تم تقديم اقتراح نظام قائم على PFNA مصمم للكشف عن المواد غير المشروعة لفحص الشحن الجوي (Ancore Cargo Inspector) (ACI). يشار إلى هذا النظام باسم (PFNA ACI). يتم موازنة شعاع النترون في إطار مسح ضوئي يركز على السطح الأمامي للحاوية. وقد تم إجراء الاختبار على حاوية LD3 على متن الطائرات فضلاً عن مقطورات شحن البضائع.

تتمثل الخطوة الأولى في خوارزمية الكشف في استخدام أشعة غاما المكتشفة لإنتاج "ملفات صور" تحتوي على كثافة المسح الضوئي الأساسية والأكسجين والنيوتروجين في كل فوكسل (في النمذجة المستندة إلى الكمبيوتر أو المحاكاة الرسومية، تدعى كل مجموعة من عناصر حجم الصوت التي تشكل مساحة ثلاثية الأبعاد افتراضية بالفوكسل)، ثم يتم استخدام التوهين النتروني الإشعاعي وصور الكثافة الأولية لاستخلاص ملف صورة هيدروجين. يتم تجميع جميع العناصر التي تنتشر ولكن لا تمتص النيوترونات في ملف صورة الهيدروجين. ثم يتم تحسين ملفات الصور باستخدام التجانس والتنعيم وإزالة التباين. نظراً لأن قياسات الرسوميات الراديوية تقارب تركيبة الشحن المعتمد على الحجم، يتم تغذية هذه المعلومات مرة أخرى في الخوارزمية لتتقيد تقديرات الكثافات الأولية في وحدات الفوكسل، والفحص النموذجي ينتج كمية كبيرة من البيانات [10-12].

استخدمت أنظمة النموذج الأولي لـ PFNA تحليلاً تمييزياً، خوارزمية شبكة عصبية، وصور كثافة المدخلات الأولية تحدد إذا كان كل فوكسل قد يشكل منطقة إنذار. يمكن وضع علامات على كل فوكسل إما "حميدة" أو "متفجرة" أو "غير شفافة". تشمل القيم الموجودة في التحليل التمييزي كثافات عنصرية مختلفة بالإضافة إلى ميزات أكثر تعقيداً تمثلها المنتجات والكثافات النسبية. العتبات التي تميز العوامل (الكثافة، نسب الكثافة، والأهمية الإحصائية المقدرة) يتم أخذها في الاعتبار في خوارزميات التحليل. تحتوي خوارزميات التحليل أيضاً على خوارزمية "اتصال" يمكنها وضع متطلبات الاتصال بناءً على تشابه الميزات الأولية في وحدات

البكسل المجاورة، يتم استخدام اتصال البكسل لربط التهديد المحتمل بأدنى كميات التهديد التي يتم أخذها في الاعتبار لمواد التهديد المحددة. يتم دمج كثافة المواد والنسب الأولية وميزات اتصال البكسل قبل رفع إنذار المنطقة الذي يستند إلى الخوارزمية. تشتمل خوارزمية "الاتصال" على ميزات (الحد الفاصل والتمييزات) التي يتم تحديد مساحتها عبر وحدات البكسل المتصلة. يتم موازنة المرشحات في بعض الأحيان من اختبارات معايرة شحنات الاختبار لتحسين الكشف عن المتفجرات [12].

5-6-1-2-2 تحليل غاما لتنشيط النترون الفوري (PGNAA):

تحليل تنشيط غاما الفوري لالتقاط النترون أو باختصار يسمى تحليل تنشيط نترون غاما الفوري PGNAA الذي يتضمن قياس أشعة غاما المنبعثة خلال تفاعل النقاط النترون، أي يتم قياس أشعة غاما حيث يتم إشعاع العينة باستخدام شعاع نتروني. هذه الطريقة هي أداة قوية غير مدمرة ومتعددة المستويات لتحليل العينات السائبة ومعرفة العناصر التي لا تلتقط نترونات وتأخر انبعاثات أشعة غاما. العناصر التي تحددها هذه الطريقة هي التي تملك نفس العدد الذري المنخفض (Z) مثل H و N و S و P و Si، وهذه العناصر لا يمكن اكتشافها بسهولة في الطرق الأخرى، بينما المواد المشعة مثل B و Cd و Sm و Gd قادرة على التقاط النترونات العالية للغاية وإنتاج أشعة جاما عالية وتعتبر مثالية أيضاً للتصميم باستخدام هذه التقنية (PGNAA). يُطبق على العناصر التي تتحلل بسرعة كبيرة، وهي العناصر التي تنتج فقط نظائر مستقرة وأيضاً عناصر ذات كثافة أشعة جاما ضعيفة التحلل [10-12].

4-6-1-2-2 تحليل تنشيط نترونات غاما المتأخر (DGNA):

تحليل تأخر تنشيط جاما النيتروجين (DGNA) delayed gamma neutron activation analysis يُطلق عليه أيضاً (NAA) التقليدي هو أسلوب تتبع فيه قياسات أشعة جاما الانحلال الإشعاعي ومفيد للغالبية العظمى من العناصر التي تنتج نويدات مشعة. يتكون من ثلاث خطوات رئيسية، وقت عينة الإشعاع، وقت الاضمحلال وفترة العد. إن DGNA مرن فيما يتعلق بالوقت بحيث يمكن تحسين حساسية النويدات المشعة طويلة العمر التي تتأثر بالتداخل من النويدات المشعة القصيرة العمر عن طريق انتظار انحلال النويدات المشعة القصيرة العمر [11-12].

4-6-1-2-2 تحليل تنشيط النترونات الظهارية (ENAA):

في تحليل تنشيط النترونات الظهارية ENAA (epithermal neutron activation analysis) يُسمح فقط للنترونات الظهارية من مصدر النترون بالبحث على (تفاعلات الالتقاط).

يتم تحقيق هذه النتروونات الظهارية عن طريق إبطاء النيوترونات السريعة وفي نفس الوقت حماية النتروونات الحرارية باستخدام دروع الكادميوم (cd) أو البورون (B) [12].

8-6-1-2-2 تقنية PFTNA:

هنالك تقنية مطوّرة عن التقنيات السابقة وهي تقنية تحليل النتروونات الحرارية (أي التي تتحرر عند طاقات منخفضة) والسريعة المرسلّة على شكل نبضات PFTNA (Pulsed Fast Thermal Neutron) (Analysis). تتميز هذه الطريقة بإمكانية دمج طيف أشعة غاما (gamma-ray spectrum) للنتروونات السريعة مع الطيف لأشعة غاما ناتجة عن النتروونات الحرارية، مع العلم أن كلا الطيفين يحوي مناطق مميزة للعناصر الأربعة المذكورة، وعند توظيف الميزات الناتجة عن كلا الطيفين يمكن التمييز بين المواد العضوية المتفجرة وغير المتفجرة [13].

ومن الجدير بالذكر أن تقنية (PFTNA) أصبحت واسعة الانتشار في المنتجات الصناعية نظراً لحساسيتها العالية ودقتها، ومن الممكن استخدام هذه التقنية في تحليل التركيب والنسب المئوية من المواد H, C, N, O بغرض الكشف عن الألغام والمتفجرات الأخرى، وبالأخص الألغام غير المعدنية [14].

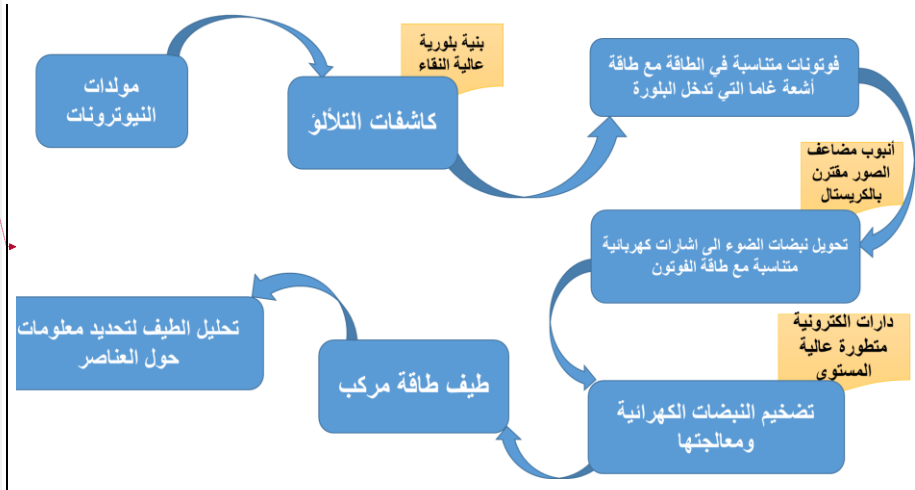
يستند تحليل تنشيط غاما النتروني السريع وتحليل النتروونات الحرارية والسريعة النبضية إلى تفاعل بين نترون منخفض الطاقة ونواة ذرة. عندما يقترب نترون حراري أو منخفض نسبياً من الطاقة (eV) 0.025، أو يصطدم بنواة ذرة، يحدث تفاعل بين النترون والنواة. يتم نقل الطاقة من النترون إلى النواة وترفعه مؤقتاً إلى حالة طاقة مثارة، ثم يتم إطلاق الطاقة فوراً على شكل أشعة غاما.

تتمتع أشعة غاما الصادرة بطاقة مميزة مرتبطة بالذرة التي تم إطلاقها منها، ففي جوهها أشعة غاما المنبعثة هي مثل "بصمة" للعنصر. لذلك يتم الكشف عن أشعة غاما المنبعثة وطيف الطاقة المولدة ومن ثم يمكن تحليلها من أجل التركيب العنصري [14].

الآلية عمل PFTNA:

تعتمد (PFTNA) في الكشف على أشعة غاما باستخدام كاشفات التلألؤ. تتكون هذه الكواشف من بنية بلورية عالية النقاء، عندما تتعرض لأشعة جاما، تنتج فوتونات متناسبة في الطاقة مع طاقة أشعة غاما التي تدخل البلورة. يقوم أنبوب مضاعف الصور المقترن بالكريستال بتحويل نبضات الضوء إلى إشارات كهربائية متناسبة مع طاقة الفوتون. تعمل الدارات الإلكترونية المتطورة عالية السرعة على تضخيم النبضات الكهربائية ومعالجتها، مما يؤدي إلى طيف طاقة مركب. يتم تحليل الطيف لتحديد معلومات حول عناصر محددة [14].

لكل عنصر نزعة مختلفة للتفاعل مع النترونات، التي لديها نزعة كبيرة يمكن قياسها. يجب أن يكون هناك أيضا كمية كافية من العنصر للتفاعل مع النترونات. إن المصطلح "عتبة الكشف" لعنصر ما هو دالة كمية المواد التي يتم تحليلها، النسبة المئوية للعنصر في تلك العينة واتجاه هذا العنصر للتفاعل مع النترونات. يتم توفير النترونات المستخدمة في تقنية التحليل إما عن طريق النظائر المشعة (252Cf)، أو من نظام مولد النترون.



الشكل (2-6): البنية عمل تقنية PFTNA

تتمتع تقنية PFTNA بعدة ميزات وهي:

- التحديد السريع للكميائية المستهدفة للمواد التي تمكّن من التحكم في العمليات القوية.
- بيانات تمثيلية عالية
- السلامة البيئية والمشغل
- فرص توفير التكاليف

يتم إجراء التحليل على الفور، مما يتيح لعديد من تغييرات التحكم خلال فترات زمنية قصيرة لتحقيق الهدف الكيميائي، على عكس الوحدات المشعة القائمة على النظائر المشعة، يمكن إيقاف تشغيل مصدر النترون

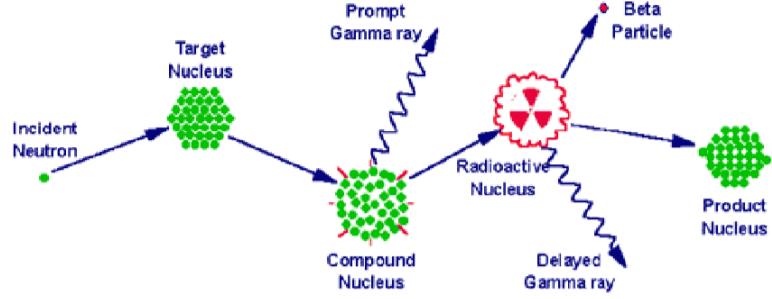
بحيث يمكن معالجته بدون مخاطرة ويمكن نقله وتخزينه واستبداله بسهولة عند الضرورة دون مقاطعة عملية الإنتاج [13-14].

3-2 نظرية تحليل تفعيل النترون:

يمكن تنشيط النظائر الموجودة في عينة المواد بعدة طرق عن طريق الجزيئات المشحونة والفوتونات والنيوترونات. في تحليل تنشيط النيوترونات، تستخدم النيوترونات كجزيئات القصف. يتم تحديد العناصر المشعة المنتجة في هذه العملية من خلال مراقبة التلاشي الإشعاعي وانبعثات طاقة أشعة غاما حيث أن النظائر المشعة تتحلل من الحالات المثارة وتعود إلى حالات أرضية مستقرة. أثناء عملية تلاشي الإشعاع، تتبعث النويدات المشعة لهذه العناصر من أشعة غاما التي لها طاقات مميزة لنواة الانبعاث. من خلال حساب عدد أشعة غاما لكل طاقة تتبعث من مادة عينة منشطة ومعرفة العمر النصفى لكل النويدات المشعة المنبعثة، يمكن كشف عدد النوى المشعة ونوع النويدات المشعة التي أنتجت أشعة غاما وبالتالي يمكن تحديد التركيبة الأولية للمواد النموذجية الأصلية.

في تحليل تنشيط النيوترونات، يتم إشعاع مادة العينة بتدفق النيوترونات. تتفاعل النيوترونات المرتدة مع النظائر المستقرة لعناصر العينة المستهدفة وتحولها إلى نظائر مشعة غير مستقرة عند التقاط نترون. يوضح الشكل (2-7) عملية تنشيط النترون (ENAA) لنواة المركب حيث تتبعث أشعة غاما على الفور بعد التقاط النترون. تتحلل نواة المركب المشع في معظم الحالات وتنبعث منها جسيمات بيتا المصحوبة بأشعة غاما المحددة للطاقات المميزة.

أهم تفاعل يتم استخدامه في تحليل تنشيط النيوترونات هو تفاعل الالتقاط (γ, N) ، الأنواع المشعة التي تشكلت أثناء تفاعل الالتقاط تبقى في حالة من الإثارة لمدى محددة. تنزع الأنواع من الإثارة بعد ذلك اعتماداً على طاقة الإثارة بعدة طرق، بيتا ناقص، بيتا زائد، التقاط الإلكترون، انبعاث البوزيترون أو الانشطار التلقائي. إن أشعة غاما المميزة للنظير المشع هي التي توفر معلومات محددة حول عنصر الاهتمام، وليس غاما من تفاعل (γ, N) . يمكن تحديد كل من المعلومات النوعية والكمية من طاقة وكثافة أشعة غاما المنبعثة [15-14].



الشكل (2-7): رسم تخطيطي لتفعيل النيوترونات لنواة عينة

الخطوات الرئيسية المشاركة في إجراء تحليل تنشيط النيوترونات لأي مادة عينة هي:

1. اختيار تقنية تحليلية مناسبة للتحليل. ستحدد التقنية المختارة نوع مصدر النيوترون المطلوب.
2. إعداد العينة التي قد تشمل وزنها، الفحص، والاغلاق المحكم في وعاء اشعاع.
3. اشعاع العينة.
4. قياس طيف أشعة غاما بعد الاشعاع.

لإجراء تحليل ناجح لعينات المواد باستخدام تحليل تنشيط النيوترونات، يلزم توفر مصدر للنيوترونات، وأجهزة مناسبة للكشف عن أشعة جاما ومعرفة مفصلة بالتفاعلات التي تحدث عندما تتفاعل النيوترونات مع النواة المستهدفة.

2-4 مصادر النيوترون:

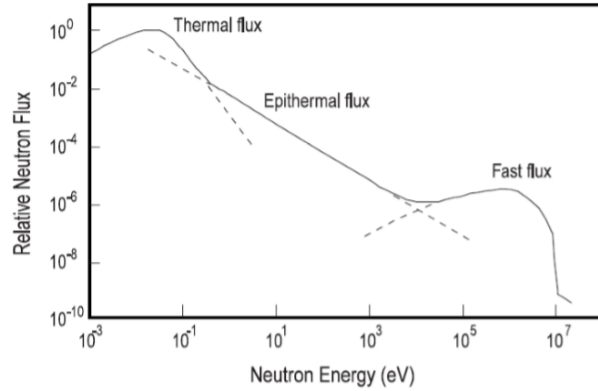
هناك ثلاثة مصادر رئيسية للنيوترونات يمكن استخدامها في تحليل تنشيط النيوترونات، يعتمد اختيار كل منها على نوع التحليل الذي يجري لأن مصادر نيوترونيه مختلفة تولد نيوترونات ذات طاقات مختلفة وكذلك مع تدفقات نيوترونيه مختلفة. أدى الاهتمام المتزايد بتحليل تنشيط النيوترونات إلى تصميم واستخدام مصادر نيوترونيه أصغر وأرخص وأكثر قابلية للنقل يمكن استخدامها في تطبيقات تحليلية أكثر [16-17].

2-4-1 المفاعلات النووية:

المفاعلات النووية هي المصدر المفضل للنيوترونات في تحليل تنشيط النيوترونات بسبب تدفقات النيوترونات الحرارية العالية والجوية. قد تختلف المواضع المختلفة داخل المفاعل وخارجه اختلافاً كبيراً من حيث توزيعات الطاقة النيوترونية وتدفقاتها بسبب المواد المستخدمة لتخفيف النيوترونات الأولية الانشطارية. يوضح المخطط في الشكل (2-8) المكونات الرئيسية الثلاثة لتوزيع الطاقة النيوترونية الواسعة التي يمكن للمفاعلات النووية

إنتاجها، النترونات الحرارية، الظهارية والسريعة. تدفق النيوترون الحراري النموذجي من مفاعل في حدود 10^{12} – 10^{14} نترون (الشكل (2-8)).

نظراً لحجم المفاعل النووي الضخم وتعقيده وتكاليف تشغيله وصيانته المرتفعة، يقتصر تطبيقه في تحليل التنشيط على الأماكن التي تقدم فيها المفاعلات الحالية هذه الخدمة. ومع ذلك، هناك عدد من منشآت NAA الراسخة القائمة على المفاعلات في جميع أنحاء العالم والتي تقدم تحليلات عالية الدقة لمجموعة واسعة من أنواع العينات. على سبيل المثال، يوجد مرفق NAA تجاري NAA مرفق بمفاعل SAFARI-1 في مؤسسة الطاقة النووية في جنوب إفريقيا، ويقع في بيليندابا، بالقرب من برينوريا [16].



الشكل (2-8): طيف الطاقة التخطيطي للنترونات المنتجة في مفاعل الانشطار

2-4-2 مصادر النظائر المشعة:

قد تكون مصادر النظائر المشعة مفيدة للتركيبات الثابتة التي تعمل بشكل مستمر ولكنها ليست مناسبة للتطبيقات التي تتطلب نترونات نبضية. كما أنها تتأثر بالجيل المستمر من النترونات التي تشكل مخاطر المناولة والسلامة. المصادر الأكثر استخداماً للنظائر المشعة هي ^{252}Cf أو α -emitter مضمن في البريليوم. ينتج مصدر ^{252}Cf النترونات تلقائياً أثناء الانشطار ولديه طاقة متوسطة تبلغ (2.35 MeV)، في حين يتراوح طيف النترون من مصادر Am-Be من الحراري إلى حوالي (8 MeV).

2-4-3 مصادر مسرع الجسيمات:

تختلف مصادر النترونات في مسرع الجسيمات من حيث التركيبات الكبيرة إلى الأجهزة المحمولة حسب الاستخدام المفضل. هناك نوعان من مصادر النترونات القائمة على مسرع الأيونات في شكل مضغوط هما مولدات النترونات (D-D) و (D-T) التي توفر مصدراً نترونيا منخفض التكلفة نسبياً وموفاً للصيانة، هذه المولدات النترونية المدمجة قادرة على إنتاج نترونات من (2.5 MeV) إلى (14 MeV) على التوالي.

يمكن استخدامها في النمط النبضي لإنتاج النترون الذي يسمح باستخدام طرق الصدف لفصل توقيعات أشعة جاما السريعة والمتأخرة المنبعثة من التفاعلات النووية المستحثة بالنترون. يستخدم مولد النترون الأنبوبي المدمج المختوم على نطاق واسع في الصناعة لتحليل المواد. يتكون هيكل مولد النترون المدمج المختوم من:

1. مصدر أيون ذو تردد لاسلكي الذي يولد أيونات موجبة الشحنة، والأكثر استخداماً هو مصدر المهبط البارد (cold cathode).

2. هيكل تسريع أيون يتم فيه تسريع شعاع أيون بواسطة الحقل الكهربائي إلى حوالي 120(KV) من الطاقة باستخدام تيار عالي (350 mA) وإمداد طاقة تيار مستمر عالي الجهد (120(KV).

3. هدف الهيدريد المعدني الذي تؤثر عليه شعاع الأيون المتسارع لإنتاج النترونات، يمكن أن يكون هدف الهيدريد المعدني عبارة عن لوحة من التيتانيوم أو الزركونيوم أو سكانيديوم وفقاً للتطبيق المرغوب فيه لمولد النترون. تخلق التفاعلات النووية الناتجة عن الانصهار (D-D) و (D-T) المحفز في أهداف هيدريد المعدن نترونات أحادية الطاقة سريعة. تعد مولدات النترونات (D-T) هي مصدر النترون المفضل لأنها تُصدر نترونات ذات طاقات أعلى، عادةً تصل إلى 14.1 (MeV)، وتصدر هذه النترونات نظيراً متساوياً تقريباً [17]. يتم إنتاج مولدات النيوترون (D-D) عندما يتم تحميل الألواح المستهدفة لهيدريد المعادن بغاز الديوتيريوم بحيث تنتج الحزمة الأيونية المتسارعة التي تؤثر على الهدف نترونات من خلال تفاعل D-D



حيث Q له قيمة 3.27(MeV) تتطلب مصادر نيوترونات الديوتيريوم - الديوتيريوم تيارات الديوتيريوم العالية لتحقيق عوائد النترون (D-D) [12].

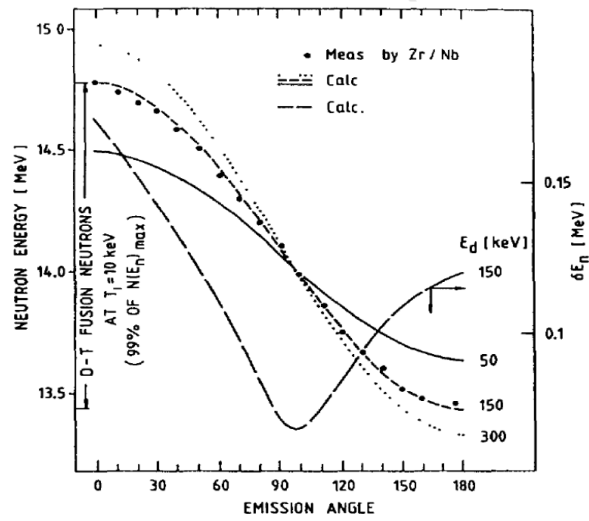
يُفضل استخدام مولدات النترون في التطبيقات التي تتطلب نترونات منخفضة الطاقة فقط وقد تسبب النترونات ذات الطاقة العالية حدوث تداخل في التحليل نظراً لوجود العديد من قنوات التفاعل المفتوحة لنترونات الطاقة العالية، كما تتراوح طاقة النترونات الصادرة حوالي 10^6 نترون في الثانية. عندما يتم تحميل الألواح المستهدفة من هيدريد المعادن مسبقاً بالترينيوم أو بمزيج من غاز الديوتيريوم - التريينيوم، يتم إنتاج مولد نتروني (D-T).

تنتج مصادر الديوتيريوم - التريينيوم نترونات ذات طاقة أعلى تنبعث منها نظائر متساوية تقريباً عندما تؤثر شعاع الأيون المتسارع على أهداف المعدن المهدرج. يتم إنتاج النترونات في التفاعل:



حيث Q له قيمة تساوي 17.59 (MeV) التي يتم تقاسمها بين منتجات التفاعل، مع اختلاف طاقات استقبال النيوترون في حدود 13.4 (MeV) إلى 14.7 (MeV) كما هو موضح في الشكل (9-2).

عند تشغيله في الوضع النبضي، ينتج مولد النيوترون رشقات نيترونية مكثفة قصيرة في فترة زمنية محددة أو تردد، وتكون الترددات النمطية عادةً عند 10 كيلو هرتز وتتبع فترة نبضة قدرها 10 μ عندما لا يكون هناك إنتاج للنيوترونات. الناتج النيتروني من هذه المولدات عادة ما يكون في نطاقات تتراوح من 10^8 – 10^9 n/s [16-17].



الشكل (9-2): طاقة النيوترون كدالة لزاوية الانبعاث عند طاقات ديوتيريوم المختلفة

2-5 كواشف النيوترونات:

يستخدم كاشف النيوترونات في فيزياء الجسيمات للكشف عن النيوترونات وقياس طيفها في المجال العلمي. وتستخدم تلك الأجهزة أيضاً للوقاية من الإشعاع بالنسبة للعاملين في المراكز النووية وفي المفاعلات النووية. ونظراً لأن النيوترون متعادل الشحنة فهو لا يؤين الوسط المار فيه، ولذلك يكون قياس النيوترونات بطريقة غير مباشرة وذلك عن طريق تشتتهم على نوى الذرات المكونة للوسط أو عن طريق تفاعلهم النووي حيث ينتج عن التشتت وكذلك عن التفاعل أيونات أو جسيمات مشحونة يمكن التعرف منها عن النيوترونات الداخلة في التفاعل.

عادةً ما تستخدم طرق الكشف عن المتفجرات جزيئات لفحص نواة المادة المستهدفة. ينطوي إجراء الفحص على قياس ثقل إشعاعات غاما المنبعثة من النيوترونات. يمكن أن يكون اختيار كاشف الإشعاع المناسب جزءاً مهماً جداً في تقنية الكشف. تشمل المقايضات في اختيار الكاشف على حساسية الكاشف، وردود

الفعل المتداخلة، وتكلفة مواد الكاشف، والمسائل اللوجستية مثل الحاجة إلى التبريد، واحتمالية ضرر إشعاع الكاشف أثناء عملية القياس من أنواع أخرى من الإشعاع في البيئة التشغيلية. تُقسم كاشفات النيوترونات عادةً إلى نوعين، نيوترون منخفض الطاقة وكاشفات نيوترونية سريعة. يستخدم الاكتشاف السريع للنيوترونات في بعض الأحيان منظماً هيدروجينياً لإبطاء النيوترونات، ثم يستخدم كاشف نيوتروني منخفض الطاقة [18]. بالنسبة للنيوترونات ذات الطاقة التي تزيد عن 1(KV)، يمكن استخدام رذات الفعل الناتجة عن التفاعلات المرنة كأساس للكشف عن التأين من تفاعل نيوتروني. الهيدروجين هو المادة المستهدفة الأكثر شيوعاً للكشف السريع عن النيوترونات باستخدام طاقة رذات الفعل المرنة. وغالباً ما يشار إلى هذه الكواشف باسم كاشفات البروتونات المرتدة. عادةً ما يقيس اكتشاف النيوترونات المنخفضة الطاقة فقط حدوث حدث أو تفاعل نيوتروني، بينما تقدم أجهزة الكشف عالية الطاقة ($E_n > 10 \text{ KeV}$) غالباً ما تقدم معلومات عن طاقة النيوترون المتزامن. أما بالنسبة للنيوترونات غير النسبية ذات الطاقة الواردة (E_n) التي تنتشر بزاوية (Θ) في مركز نظام إحداثيات الكتلة (θ) من أجل نواة الارتداد في نظام الإحداثيات المختبرية) من ذرة مستهدفة برقم ذري (A)، يتم إعطاء طاقة النواة المعالجة بالمعادلة:

$$E_R = \frac{2A}{(1+A)^2} (1 - \cos \Theta) E_n = \frac{4A}{(1+A)^2} (\cos^2 \theta) E_n \quad (2.3)$$

غالباً ما يتم قياس الارتداد البروتوني بواسطة التلألؤ المحتوي على الهيدروجين. تتعلق المضاعفات الناجمة عن استخدام هذا النوع من الكواشف باستجابة النيوترونات (الصادرة على شكل أشعة غاما) لمادة التلألؤ وإخراج الضوء اللاخطي لجهاز التلألؤ، والضيايح في الطاقة للنيوترونات القريبة من حافة مادة التلألؤ بسبب نطاق البروتون، وتأثيرات الانتثار المتعددة، والتي تؤثر على شكل النبضة المقابل لأشعة جاما. أساس (PFTNA) هو مولد نيوتروني نبضي يستخدم تفاعل (D-T) يوفر مولد النيوترون (D-T) النبضي نيوترونات بطاقة 14(MeV)، والتي بدورها تسبب عدة أنواع من التفاعلات النووية على الكائن الموجود قيد الفحص. يتم الكشف عن أشعة غاما الناتجة من هذه التفاعلات من خلال مجموعة مناسبة من أجهزة الكشف، يتكون طيف الأشعة غاما الناتجة من التفاعلات النووية على عناصر مثل C و O و N و H ويتم تخزينها في موقع ذاكرة معين داخل نظام الحصول على البيانات [19]. تفقد بعض النيوترونات السريعة التي ما زالت داخل الجسم الطاقة عن طريق الاصطدام مع عناصر التي تشكل المادة وذلك يتم بين النبضات.

عندما يكون للنيوترونات طاقة أكبر من 1(eV)، يتم التقاطها بواسطة عناصر مثل H، N، و Fe خلال تفاعلات النيوترونات، يتم الكشف عن الأشعة السينية من مجموعة التفاعلات هذه بواسطة نفس مجموعة الكاشفات، ولكن يتم تخزينها في عنوان ذاكرة مختلف داخل نظام الحصول على البيانات. يتكرر هذا الإجراء

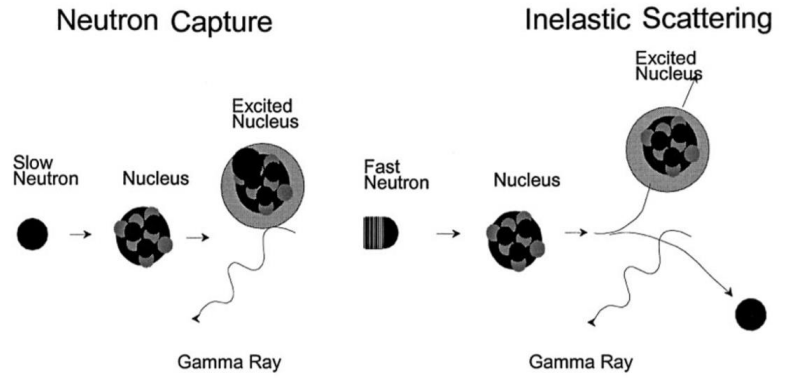
بتردد (10(KHz). بعد عدد محدد مسبقاً من النبضات، هناك فترة توقف أطول تسمح باكتشاف الأشعة غاما المنبعثة من عناصر، مثل Si و P التي تم تنشيطها.

الجدول (2-1) كثافة بعض العناصر ومعدل ثلاث فئات من المواد

الكثافة المعدل	H	C	N	O	CL	C\O	C\N	CL\O
المخدرات	عالية	عالية	منخفضة	منخفضة	متوسطة	عالية < 3	عالية	عالية جداً
المتفجرات	منخفضة امتوسطة	متوسطة	عالية	عالية جداً	متوسطة أغير موجودة	منخفضة 1>	منخفضة 1>	منخفضة امتوسطة

منسّق:مسافة قبل: 5 نقطة، بعد: 5 نقطة

منسّق:مسافة بعد: 5 نقطة



الشكل (2-10): التفاعلات النووية التي يبدأها النيوترونات الحرارية (تفاعلات الالتقاط) والنيوترونات السريعة (الانتثار غير المرئي).

في حالة عدم وجود أي عينة توضع أمام الكاشف، يسجل الكاشف الأشعة غاما الصادرة من المواد المحيطة بالكاشف، وكذلك من المواد الموجودة داخل مولد النيوترون وحوله، هذا الطيف يسمى طيف الخلفية. يمكن تمثيل التعدادات في القناة i من طيف عينة S ، الممثلة بالمعادلة:

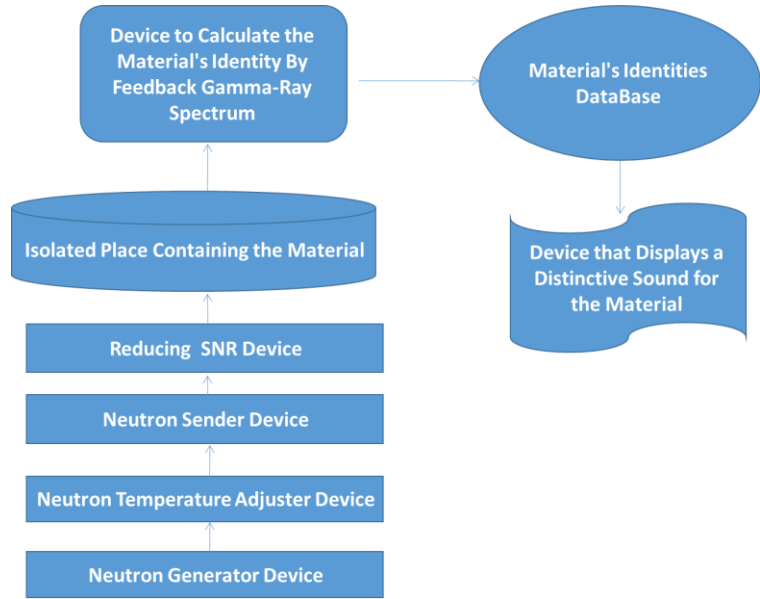
$$S_i = k * B_i + \sum_{j=1}^n c_j * E_{i,j} \quad (2.4)$$

حيث B_i هي طيف الخلفية في القناة i و k هي معامل $E_{i,j}$ هي استجابة العنصر j في القناة i و c_j هي اختصارها و n هو العدد الإجمالي للعناصر اللازمة للطيف.

في المقام الأول، يتم إجراء تحديد للمادة بواسطة (PFTNA) من خلال فحص النسب الذرية، على سبيل المثال نسبة ذرات الكربون إلى ذرات الأكسجين (C/O) يتم إجراء قياس (C/O) من خلال أخذ نسبة كثافة الأشعة غاما الناتجة عن الكربون والأكسجين ومن ثم حساب كثافة المادة وإظهار النتائج على شكل مخططات تحدد واصفات المادة.

يظهر الشكل (11-2) كيفية عمل النظام حيث يتم أولاً توليد النيوترونات من جهاز مولد للنيوترونات الذي يقوم بإطلاق النيوترونات السريعة والحرارية على شكل نبضات ومن ثم تنتقل هذه النيوترونات لجهاز يضبط درجة حرارة النيوترونات، بعد ذلك يتم إرسال النيوترونات عن طريق جهاز إرسال النيوترونات الذي يقوم بإسقاط النيوترونات على العينة بعد تمريرها على جهاز تقليل التشويش من أجل تقليل الضجيج الخارجي والتشويش الناتج عن المواد الموجودة في الوسط الخارجي.

بعد أن يتم إسقاط النيوترونات على العينة يتم حساب هوية المادة من خلال طيف الأشعة غاما الناجمة عن النيوترونات السريعة أولاً والنيوترونات الحرارية ثانياً، ومنهم تتكون قاعدة بيانات تحوي خصائص المادة ليتم عرض النتائج من خلال جهاز يصدر صوتاً باسم المادة المتفجرة في حال كانت النتائج مطابقة لقاعدة البيانات الموجودة لدى المختبر، أما في حال كانت النتائج ليست مشابهة تماماً لقاعدة البيانات المخزنة ولكنها تجاوزت عتبة الأمان يصدر صوتاً بأن المادة مشبوهة ولكنها غير محددة (Explosive material) [18-19].



الشكل (11-2): مخطط تدفقي يظهر كيفية عمل النظام المقترح

6-2 تأثير كتلة العينة:

هناك سببان للحصول على نسبة (N/H) أصغر عندما تكون كتلة العينة أقل. أولاً: يقلل الأكسجين الموجود في الكاشف بتركيز عالي نسبة إلى عينة الكتلة الدنيا من نسبة (H/O) الفعالة. ثانياً: بالنسبة للعينة الأقل كثافة، يصعب قياس تفاعل الالتقاط بسبب انخفاض كثافة النترونات الحرارية [19].

الفصل الثالث

الدراسة المرجعية:

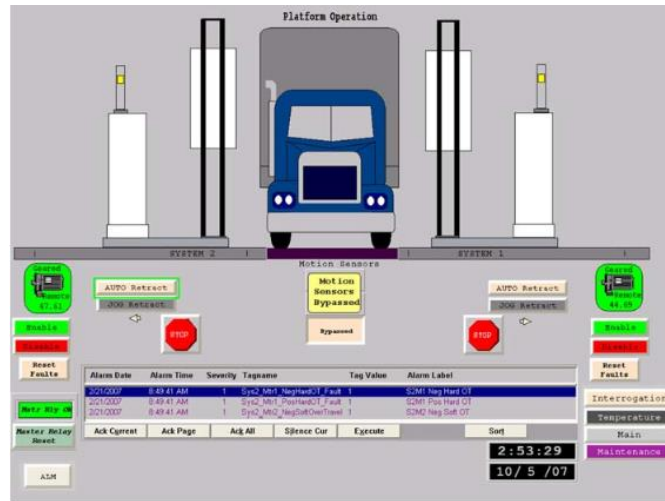
3-1 مقدمة:

يقدم في هذا الفصل لمحة عن بعض الدراسات السابقة التي تناولت موضوع الكشف عن المواد المشبوهة باستخدام تقنية تحليل النترونات السريعة والحرارية النبضية "PFTNA".

3-2 الدراسات المرجعية:

_ في عام 2006 تم تطوير نظام الكشف عن المتفجرات (IEDS) في Idaho في مختبر ايداهو الوطني (INL) للرد على التهديدات المفروضة من قبل شاحنات التسليم التي تحمل متفجرات. يتكون النظام من منصتين، موضوعتين على كل جانب من السيارة. كل منصة تتضمن مولد النيوترون ومجموعة من كاشفات يوديد الصوديوم كما تم استخدام مولدان للنترونات متزامنان. يتصل جهاز الكمبيوتر بالنظام عبر Ethernet ويكون قادراً على التحكم في النظام عن بُعد [20]. تم تطوير النظام للكشف عن المتفجرات السائبة في شاحنة متوسطة الحجم في غضون 5 دقائق من وقت القياس كما يظهر في الشكل (3-1).

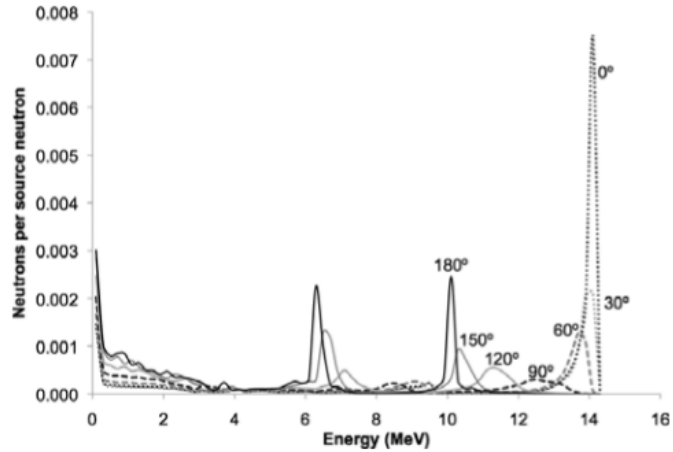
_ في عام 2004، تم بناء نموذج أولي كامل الصنع للتفتيش ومواصلة التطوير. تم اختبار أداء النظام بنجاح في INL من تشرين الأول 2005 إلى شباط 2006 باستخدام أنواع مختلفة من المتفجرات الحقيقية مع مجموعة متنوعة من البضائع. كما تم تركيب أول نظام نموذجي للنشر في قاعدة رايت باترسون الجوية في أوهايو منذ مايو 2007، وتم إضافة القدرة على الكشف السلبي عن المواد الإشعاعية داخل شاحنة التسليم [20].



الشكل (3-1): صورة نظام الكشف عن المتفجرات (IEDS) Idaho

- في عام 2008، أنشأت وزارة الأمن الداخلي (DHS) البرنامج التجريبي للكشف عن المتفجرات الجوية (ACEDPP) من أجل توفير الدراسة الاقتصادية لمساعدة إدارة أمن النقل (TSA) في اتخاذ القرارات المستقبلية بشأن كيفية التعامل مع الشحن الجوي، قامت ACEDPP بذلك من خلال المساعدة في التخطيط التكنولوجي للبحث والتطوير للبنية التحتية لأمن الشحن الجوي في البلاد. تم جمع البيانات لتحديد تدفق الشحن الجوي ومدى سرعة فحصه. كانت إحدى اهتمامات وزارة الأمن الوطني الحصول على البيانات التي توضح الآثار الاقتصادية والتشغيلية لتعزيز مستويات فحص البضائع في شركات النقل الجوي. في قسم العلوم والهندسة الحاسوبية بمختبر أوك ريدج الوطني (ORNL)، قام الدكتور Glenn Allgood بمساعدة فريقه بجمع بيانات تدفق الشحن الجوي، ثم طور لاحقاً نموذجاً في ماتلاب (Simulink) لمحاكاة واستنباط عوامل تصف ديناميكية تدفق الشحن الجوي استناداً إلى متغيرات مختلفة مثل عدد مسؤولي أمن النقل (TSA)، وعمال خدمات المطارات الطرفية (ATS)، والنسبة المئوية للتوزيع بين أنظمة اكتشاف المتفجرات (ETDs) المختلفة، مثل جهاز كشف تتبع المتفجرات (ETD). خلال صيف عام 2008، وتحت إشراف الدكتور Allgood، قام طالب من جامعة فلوريدا الدولية بدعم واستمرار البحث. ساعد المتدرب على تطوير تحليلات نموذجية مختلفة لجعل النموذج أكثر واقعية ليكون عملاً أساسياً للتطورات المستقبلية للنظام مثل واجهة المستخدم الرسومية (GUI) للتحكم فيه والتحسين التلقائي للنظام لتقليل عوامل الوقت والتكلفة، وتجميع المتغيرات الأخرى (جنباً إلى جنب مع تجميع البرنامج في حزمة واحدة) بحيث يمكن توفيره لمطارات أخرى [21].

_في عام 2010، تم تطوير تطبيقات نثر النترونات السريع في اكتشاف المتفجرات، حيث تم الكشف عن بعض العناصر (C و N و O و Fe) ومادة (RDX) باستخدام عمليات محاكاة (MCNPX) بوجود مصدر نترونات (D-T) حيث تم اعتبار تغير طاقات الذروة كدالة لزواية التبعثر النتروني، كما هو مبين في الشكل (2-3). كانت ذروة الانتثار أكثر شيوعاً في النترونات المبعثرة من 165 إلى 180 درجة، حيث تناقص حجم الذروة مع تناقص زاوية التبعثر باستثناء التبعثر المرن بزواية منخفضة، والذي زاد مع اختراق النترونات التي اصطدمت بالهدف بشكل ضعيف [22].



الشكل (2-3): رسم توضيحي يظهر التناقص لقيم النيوترونات المبعثرة مع زيادة زاوية الانتثار.

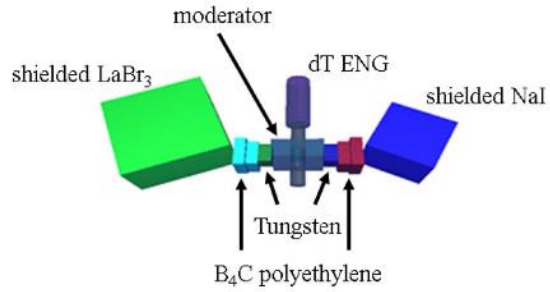
_ في عام 2012، تم تحليل المشاريع البحثية في ذلك الوقت المرتبطة بأجهزة استشعار المواد المتفجرة. حيث تم وصف المستشعرات المخصصة لإشعاع غاما، وأجهزة استشعار الإشعاع البصري، بالإضافة إلى أجهزة الكشف المطبقة في أجهزة التحليل الكروماتوغرافي للغاز، وأجهزة الاستشعار الكهروكيميائية والكيميائية. علاوة على ذلك، تم تحليل تقنيات النيوترون وأجهزة الرنين المغناطيسي، كما تم اكتشاف بعض المتفجرات المخفية والتعرف عليها، فموجات التيراهيرتز تخترق العديد من المواد بصرف النظر عن المعادن أو الوسائط القطبية (مثل الماء). لذلك يمكن لإشعاع التيراهيرتز أن يستشعر المواد الموجودة ضمن الملابس والأحذية والحقائب. العامل الرئيسي الثاني الذي ساهم في هذا البحث هو أن إشعاعات THz ليست مؤينة وأنها تمثل الحد الأدنى من المخاطر الصحية للشخص المشتبه به أو تشغيل النظام لأن طاقة الفوتون صغيرة جداً (4.4 MeV لكل 1THz) العامل الرئيسي الذي حد من الانتشار عبر الهواء هو رطوبته بسبب الامتصاص القوي من بخار الماء. بلغ التوهين حوالي (10dB/ Km) عند ترددات أقل من (1THz) وأكثر من (100 dB/km) على ترددات أعلى من (1THz) [23].

_ في عام 2013، تم استخدام عمليات محاكاة (MCNPX) لتوجيه تطوير نظام تفتيش محمول للمخدرات والمتفجرات والكشف عن المواد النووية الخاصة (SNM) يسعى النظام إلى معالجة هذه التهديدات للأمن القومي من خلال استخدام مصدر نيوتروني مكلف جداً لكشف التهديدات بشكل فعال وإنتاج توقعات مميزة يمكن الكشف عنها بعد ذلك بواسطة كاشفات الإشعاع.

تتيح إمكانية نقل النظام إمكانية جعله قريباً من التهديدات المخبأة في المساحات الصغيرة. حيث تم استخدام كل من مولدات النيوترونات الإلكترونية (ENG) (D-D) و (D-T) لكشف زيت وقود نترات الأمونيوم

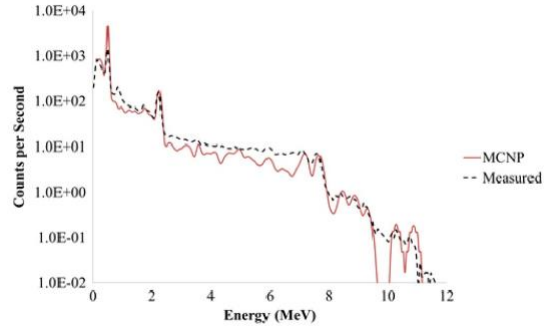
(ANFO) وهيدروكلوريد الكوكابين، وتمت مقارنة استجابة كاشف (LaBr₃:CsI:NaI)، كما تم دراسة تأثير التدرج بالتغستن على تدفق النترون في كاشفات أشعة غاما، بينما تم تحسين المواد المشبعة للكربون والبريليوم والبولي إيثيلين من خلال تحديد كثافة معدل التفاعل في التهديدات، من أجل قياس نتائج النمذجة، واستخدمت النتائج التجريبية لقياس نتائج محاكاة (MCNPX) في المجموعة التجريبية، تم استخدام مولد النترون الإلكتروني (D-T) لاستجابة تهديد (ANFO)، واستخدم كاشفات NaI وLaBr₃ للكشف عن أشعة غاما التي يتم التقاطها، حيث يظهر الشكل (3-3) النموذج التجريبي الذي تم العمل عليه.

منسّق:مسافة قبل: 50.01 نقطة، بعد: 5 نقطة



الشكل (3-3): النموذج التجريبي الذي تم العمل عليه.

يقارن الشكل (3-4) طيف NaI التجريبي من ANFO الذي تم كشفه بواسطة النترونات مع الطيف المحاكى، والذي كان غير طبيعي لخط الحديد التجريبي (7.64 MeV) - يمثل الطيف المنطقة الزمنية للنيوترون الحراري فقط بعد نهاية نبضة النترون. ذروة الهروب (10.83 MeV) - والإفراج عن الذروة المفاجئة من الاستيلاء على النيوترونات وكذلك ذروة (2.22 MeV) - تدل على طاقة التقاط الهيدروجين المرئية في كلاهما. الفرق في شدة ذروة (10.83 MeV) - يكون بسبب التباينات الصغيرة في تركيبة التهديد الأولي. بسبب النشاط الإشعاعي الطبيعي في كاشف LaBr₃، لا تزال الجهود المبذولة لمقارنة الأطياف المقاسة والمحسورة بدقة جارية [24].

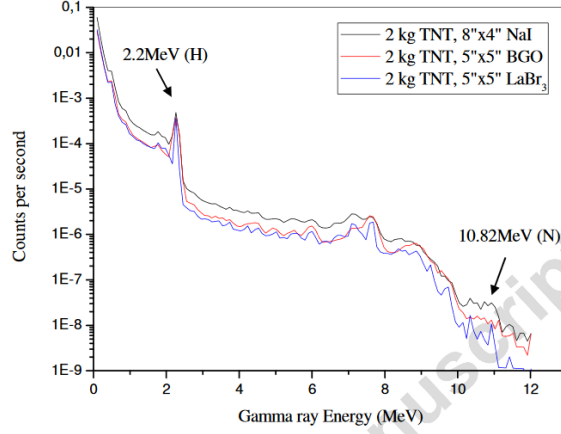


الشكل (3-4) مقارنة بين استجابة كاشف تجريبي ونمذجة من مكعب NaI 13.21cm^2 في نظام الكشف عن المتفجرات.

_ أما في عام 2014، تم محاكاة نظام الكشف عن المتفجرات المرتكز على مولد النترونات (D-T) باستخدام كود النقل مونتّي كارلو بـ n جسيم (MCNP5). يمكن لطرق الكشف عن المتفجرات ذات الأساس النووي اكتشاف المتفجرات من خلال تحديد مكوناتها الأولية وخاصة النيتروجين، لذلك تم استخدام تفاعلات النقاط النترون الحرارية للكشف عن انبعاث غاما الفوري (MeV) 10.82 بعد النقاط النترون الإشعاعي بواسطة 14 نواة.

تم بناء نظام الكشف عن المتفجرات بناءً على مولد نتروني (D-D) محوري عالي الجهد ومحمي بالكامل مع مصدر أيون مدفوع بتردد لاسلكي (RF) ومصدر ترشيح لإسقاط النترونات يبلغ حوالي 10^{10} نترون سريع في الثانية ($E = 2.5 \text{ MeV}$). تم استخدام البولي إيثيلين والبارافين كمعدلين للسرعة مع البولي إيثيلين المشبع والرصاص كدرع نتروني وأشعة غاما، على التوالي.

يتم تحسين شكل وسماكة آلات تعديل السرعة والدروع لإنتاج أعلى تدفق نتروني حراري في موضع العينة المتفجرة (TNT) والجرعة الكلية الدنيا على الأسطح الخارجية لجدران نظام الكشف عن المتفجرات (الشكل (3-5)). بالإضافة إلى ذلك، تم وصف محاكاة وظائف الاستجابة لكاشفات الأشعة السينية المستندة إلى NaI و BGO و LaBr3 إلى متفجرات مختلفة [25].



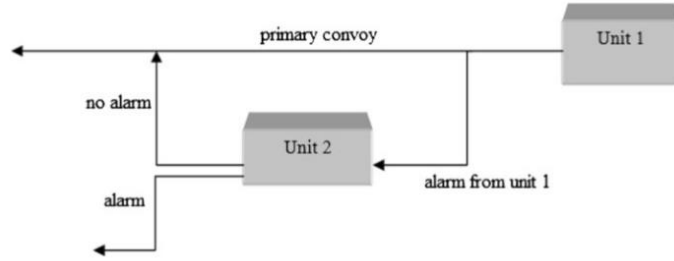
الشكل (3-5): استجابة كاشفات (8x4 NaI, 5"x5" BGO and 5x5 LaBr₃) مع 2(Kg) من مادة TNT المتفجرة باستخدام مولد نوترون 10^{10} (n/s)

_ وفي دراسة أخرى تم إجرائها في 2014 قام باحثون بالوصف الهندسي لأنظمة تنشيط النوترونات من خلال تصميم نظام للكشف عن المواد المشبوهة وتمت محاكاة النظام القائم على النوترونات باستخدام كود (MCNP).

تكون نظام الكشف من وحدتين:

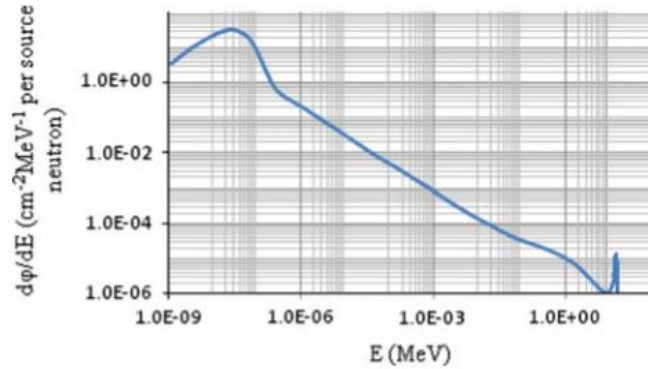
الوحدة الأولى هي جهاز الأشعة السينية الذي يشير إلى موقع المادة والوحدة الثانية هي نظام النوترون لتحديد نوع المادة. تمثل الدافع وراء المشروع في أن التصميم اعتمد على تحديد موقع الكائن المشبوه داخل الأمتعة بواسطة الوحدة الأولى. حيث كان الموقع هو نقطة الاهتمام لنظام الكشف النوتروني. نظراً لأن عمليات الفحص التي قام بها النظام القائم على النوترونات تم إجراؤها فقط للأمتعة المشبوهة التي يتم فحصها بواسطة نظام فحص الأشعة السينية، كان لابد من أن تكون التأخيرات العرضية في نظام الكشف عن النوترونات مقبولة.

تعتمد منهجية الكشف أولاً على إنذار من الوحدة 1. يقوم هذا التنبيه بتشغيل حركة الأكياس إلى الوحدة 2 من خلال ذراع الفصل. ثم يتم وضع الكيس في الوحدة 2 بينما تقوم المحركات الخطوة بمعالجة مصدر النوترون ومجموعة من كاشفات NaI الموجودة في موضع الاهتمام كما يظهر في الشكل (3-6).



الشكل (3-6): رسم تخطيطي لنظام الكشف المتكامل

يعطي الشكل (4-7) طيف النيوترون المحسوب في كائن (TNT) حيث يتكون الطيف من: (1) نوترون منخفض الطاقة (نوترونات حرارية) تم تعديله بالكامل، (2) نوترونات ظاهرية خاضعة للإشراف الجزئي بواسطة البولي إيثيلين، ونوترونات سريعة. تم إجراء العمليات الحسابية لحساب طيف أشعة جاما المتولدة في كاشفات (NaI) [26].

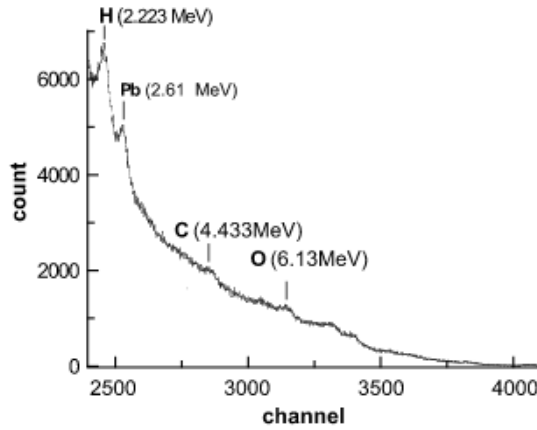


الشكل (3-7): طيف النيوترون في كائن TNT

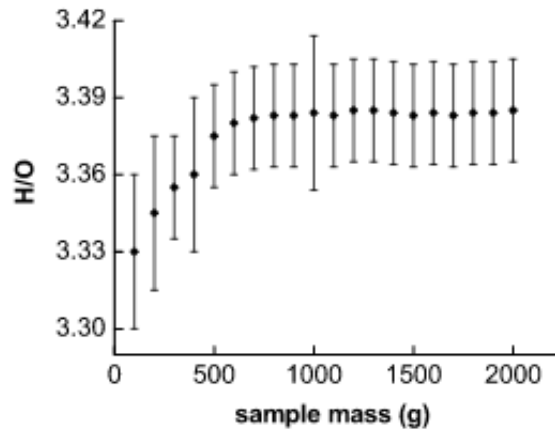
_ في عام 2015، قام باحثون في الصين بتطوير نظام الكشف عن المتفجرات على أساس تحليل النوترونات الحرارية والسريعة النبضية (PFTNA) يستخدم هذا النظام مولد النوترونات النبضية 14 MeV (D-T) ووحدة التحكم وكاشف البزموت الجرمانى (BGO) والمضخم الرئيسي ومحل متعدد القنوات 4096 (MCA). تم تصميم جهاز موازنة النوترون وجهاز تصفيح للحماية أيضاً للحد من التداخل الخارجي غير الضروري وتحسين كفاءة الكشف. باستخدام هذا النظام، يتم اكتشاف وتمييز المادة المتفجرة (اليوريا) عن طريق حساب نسبة ذرات الهيدروجين إلى ذرات الأكسجين (H/O) [27].

كما هو معروف، ترتبط قيمة منطقة الذروة H مع تفاعل النقاط النوترون الحراري، وبالتالي فإن المنتجات التي ينتجها الهيدروجين تصبح أقل، مما يؤدي إلى انخفاض نسبة (H/O) ويبين الشكل (3-8) الطيف

المميز لعينة اليوريا عندما تكون كتلة العينة 800 غرام. يمكن أن يكون من الواضح أن قمم H و O تظهر بوضوح في الطيف. تتم معالجة البيانات الطيفية باستخدام الكمبيوتر لتأكيد نسبة (H/O) وتحسب نسبة H/O إلى 0.02 ± 3.38 ، كما هو مبين في الشكل (3-9).



الشكل (3-8): الطيف المميز لعينة اليوريا



الشكل (3-9): حساب نسبة (H/O)

على الرغم من أن النظام يمكن أن يكون مناسباً للتحاليل المخبرية في الوقت الحاضر، إلا أن هناك طريقاً طويلاً قبل تطبيقه في التطبيق الصناعي.

أولاً: سرعة الكشف بطيئة جداً، على سبيل المثال، سوف يستغرق حوالي 8 دقائق لتمييز العينة. ثانياً: تكون حساسية الكشف منخفضة، ومن ثم يجب وضع العينة بالقرب من مصدر النترون. ثالثاً، بما أن الإشعاع النتروني يمكن أن يسبب ضرراً للبشر، فإن ممارسة الحماية من الإشعاع لديها الكثير من الأسئلة التي يجب حلها. ولكن يمكننا أن نتخيل أن هذه الطريقة يمكن أن تستخدم كمرحلة ثانية عندما يتم اعتبار مادة معينة مشبوهة ثم لكشفها بعيداً عن البشر.

_ في عام 2016، تم استخدام تقنية (PFTNA) لتحليل التربة وما تحويه من عناصر وذلك من قياسات كربون التربة بواسطة تحليل النترونات في أوضاع ساكنة والمسح الضوئي (يستند التطبيق الموصوف هنا لطريقة تثبتت النترون غير المرن (INS) لتحليل كربون التربة من خلال تسجيل وتحليل أشعة غاما التي تنشأ عندما تتفاعل النترونات مع عناصر التربة) وتظهر النتائج في الجدول (1-3).

• توافر المنتجات التجارية:

مولدات نبضة النترون المحمولة، وكاشفات غاما عالية الكفاءة، والإلكترونيات الموثوقة، وبرامج معالجة القياس.

• معرفة تفصيلية بتفاعلات النترونات مع النوى (العمليات، قاعدة بيانات النترونات للمقاطع العرضية)

[27].

الجدول (1-3): طاقات بعض أشعة غاما السريعة التي من المحتمل أن تظهر في الأطياف من هذه القياسات

Energy (keV)	Element
803	Pb
834	Ge
844	Al
847	Fe
931	Fe
1014	Al
1095	Pb
1238	Fe
1590	Pb
1720	Al
1770	Pb
1809	Al
2211	Al
2615	Pb
3004	Al
4439	C
6130	O

_ في عام 2017 استخدم الباحثون تقنية PFTNA وكاشف جسيمات ألفا للكشف عن عدة أنواع من المواد المتفجرة، لكن تقليل التشويش فيها سبب فقدان في كثافة إشارة الأشعة غاما وبالتالي عدم الدقة في الكشف إضافة إلى المدة الزمنية الطويلة للكشف [28].

كما تم في نفس العام البحث في طيف الطاقة الناتج عن الفوتونات الناتجة من مولد نترون ديوتيريوم _تريتينيوم (API-DT) لتصوير الجسيمات المرتبط بكشف اليورانيوم المحمي. وكان الهدف من ذلك هو معرفة ما إذا كان يمكن استخدام قيمة الفوتونات داخل طيف الطاقة سيساعد على تمييز اليورانيوم المحمي بطريقة غير مباشرة عندما يتم تخفيف قيمة النترون.

من خلال استخدام مخروط النترونات المترابط المرتبط بكل بكسل في مولد النيوترون API-DT، يمكن تعريف بعض المواد وتحديد موقعها عن طريق الطيف المرتبط بالمصدر لأشعة غاما لتنشيط النترون الفوري.

يتم إجراء تحقيق لتحديد ما إذا كانت النترونات الموجودة تحفز قيمة كافية داخل طيف طاقة أشعة غاما المستحث بالنترون الفوري في مادة التصفية لتكون مفيدة لتوصيف المواد النووية غير المباشرة. كانت القيم المستمدة من النترونات المستحثة المتفاعلة مع مادة التصفية مرتفعاً بدرجة طفيفة في اليورانيوم المُصفّح بالبولي إيثيلين، لكنه كان أكثر وضوحاً في بعض القمم المميزة لدروع الألومنيوم المحيطة باليورانيوم المستنفد.

فقد تم تحديد نقاط القوة والضعف في استخدام القمم من الأطياف المرتبطة بالمصدر مقابل تلك الموجودة في الأطياف الكلية كما يظهر في الجدول (2-3). تكون نسبة الذروة إلى نسب الخلفية أعلى بدرجة كبيرة بالنسبة إلى الأطياف المرتبطة بالمصدر، وهذا أمر منطقي بالنظر إلى مدى فعالية هذه الطريقة في تقليل الخلفية. عند مقارنة معدلات العد، يكون الوقت اللازم لإمكانية الكشف دائماً أقصر بكثير للقمم في الطيف الكلي بسبب إحصائيات العد الأعلى. ومع ذلك، فإن العديد من القمم في طريقة ارتباط المصدر لا تزال قابلة للاكتشاف في أقل من 10 دقائق. كانت قمم الأكسجين في الماء هي الأصعب في تلك التي تمت دراستها. ومع ذلك، من المهم أن نذكر أن مجال الرؤية كان صغيراً (حوالي 3 درجات)، والتوهين مرتفع لهذا القياس [28].

الجدول (2-3): تكاملات قمم الاهتمام لبعض أطيف المواد

Energy (MeV)	CPM	Peak to BG Ratio	Time Until Detectable (min)	CPM	Peak to BG Ratio	Time Until Detectable (min)
	Source Correlated Spectra			Total Spectra		
Pixel 8 - Aluminum (Figure 4)						
1.81	4.4 ± 0.4	9.00	3.7	233.6 ± 4.4	2.65	0.2
2.21	4.2 ± 0.4	6.44	3.3	NA - Hydrogen interference		
3.00	2.9 ± 0.3	8.06	5.7	107/8 ± 3.7	1.69	0.7
Pixel 7 - Graphite (Figure 4)						
3.93	1.1 ± 0.3	6.48	48.0	34.1 ± 4.7	1.24	12.3
4.44	2.6 ± 0.3	12.18	5.6	83.5 ± 4.2	1.51	1.6
Pixel 6 - Water (Figure 4)						
5.61	0.3 ± 0.1	12.86	73.1	20.6 ± 1.5	1.97	3.0
6.13	0.5 ± 0.1	19.64	22.4	23.1 ± 1.4	2.59	2.1

_ في عام 2018 تم استخدام كاشف النترون الحراري مع كاشف نترون سريع للكشف عن المواد المشبوهة التي تحوي نسب عالية من الهيدروجين وإطلاق إنذار تم اختباره تجريبياً باستخدام حسابات مونت كارلو (MCNP). وكانت النتيجة بأنه لا يمكن الاعتماد على تفعيل النترون الحراري في الكشف عن المواد غير المشروعة لأن كمية صغيرة من امتصاص النترون الحراري تجعل التدرج الذاتي للنترونات مرتفعاً جداً مما يؤدي إلى اكتشاف خطأ.

تتمثل إحدى طرق التغلب على هذا الضعف في تجنب استخدام تنشيط النترون الحراري في الكشف عن التنشيط النتروني السريع والاعتماد عليه فقط، ولكن هذا سيحد من عدد العناصر التي سيتم تحديدها. ويتمثل الحل الثاني في الكشف عن وجود سموم نترونية باستخدام كاشف نتروني حراري مرسل والذي سيؤدي إلى تشغيل نظام الإنذار في حالة وجود درع نتروني.

علاوة على ذلك، تحتوي المواد غير المشروعة عادة على كثافة ذرة عالية من الهيدروجين وبالتالي يمكن للكشف أن يساعد في اكتشاف المواد غير المشروعة عندما تكون نظيفة أو موجودة ضمن مواد أخرى، كطريقة فحص ثانية [29].

نلاحظ من الدراسة المرجعية أن جميع الأبحاث السابقة لم تستطع الكشف عن جميع المواد المتفجرة بسبب اعتمادهم على محدد وحيد للطاقة الناجمة عن المادة، لذلك قمنا في بحثنا بتطوير تقنية تحليل النترونات الحرارية والسريعة النبضية وربط المحاكى بواجهات تمثل الواقع المدروس لتحديد هوية أي مادة سواءً متفجرة أو آمنة من خلال دراسات جميع محددات الطاقة الناجمة عنها بعد إسقاط النترونات الحرارية السريعة عليها بشكل نبضات من خلال تقنية PFTNA.

الفصل الرابع

التطبيق العملي

1-4 توليد المواد في برنامج Geant4:

تتكون المواد (materials) في الطبيعة من عناصر (elements) وتتكون العناصر من نظائر (isotopes)، لذلك نرى في Geant4 ثلاثة صفوف رئيسية لتمثيل المواد هي G4Element و G4Material و G4Isotope.

يمتلك كل صف من هذه الصفوف جدولاً بصيغة عضو بيانات ستاتيكي (static data member) وهو مخصص لمتتبع الحالات (instances) التي يتم انشاؤها من هذا الصف.

حالياً يتم التصريح عن كائن (object) من أي صف من هذه الصفوف الثلاثة يقوم التابع البناء (constructor) للصف المعني بتسجيل الكائن في الجدول الستاتيكي (أي أن الكائن يسجل نفسه حال بنائه في الجدول الستاتيكي)، ويجب على المستخدم ألا يحاول حذف هذه التسجيلات من جدول تسجيل الظهورات يدوياً.

يوصف الصف G4Element خصائص الذرات (atoms) وهي:

- العدد الذري (atomic number)
- عدد النويات (number of nucleons)
- الكتلة الذرية (atomic mass)
- طاقة التكافؤ (shell energy) وغير ذلك.
- بينما يوصف الصف (G4Material) الخواص المجهرية للمادة (macroscopic properties) وهي:
- الكثافة (density)
- الحالة (state)
- الحرارة (temperature)
- بعض الكميات المجهرية مثل طول الإشعاع (radiation length) وغير ذلك.

من بين الصفوف الثلاثة المذكورة فإن الصف (G4Material) هو الصف المرئي في Geant4، ويتم استخدامه في عمليات التتبع (tracking) والعمليات الهندسية (geometry) والعمليات الفيزيائية (physics)، ويحوي هذا الصف على كامل المعلومات المتعلقة بالعناصر والنظائر التي تتكون منها المادة وفي الوقت نفسه يغلف هذا الصف تفاصيل الكود المستخدم لبناء المادة، بمعنى أننا نستخدم صفوف العناصر والنظائر في بناء المادة ولكن بعد الفراغ من عملية البناء هذه يتعامل برنامجنا مع المادة الجاهزة.

4-1-1 تحديد التركيب الهندسي للكاشف (Define a Detector Geometry):

يتكون التركيب الهندسي للكاشف (detector) في Geant4 من مجموعة من الحيزات (volumes)، ويدعى أكبر حيز بحيز العالم الخارجي أو اختصاراً حيز العالم (world volume)، ويجب أن يحوي حيز العالم جميع الحيزات (أي التي لا تدخل في البناء الهندسي للكاشف) فيجب أن يتم إنشاؤها ووضعها داخل الحيزات التي تشكل التركيب الهندسي للكاشف بما في ذلك حيز العالم.

إن أبسط الأشكال وأكثرها فعالية للتعبير عن حيز العالم هو الصندوق (box)، ويتم إنشاء كل حيز بتوصيف شكله (shape) وخواصه الفيزيائية (physical characteristics) ومن ثم يتم وضعها في حيز حاوي لها (containing volume)، وعندما يتم وضع حيز ما في حيز آخر حيث ندعو الأول بالحيز الأبنة (daughter volume) والحيز الثاني بالحيز الأم (mother volume).

إن نظام الإحداثيات (coordinate system) المستخدم لتحديد مكان وضع الحيز الإبنة هو نظام إحداثيات الحيز الأم، ولتوصيف شكل الحيز نستخدم مفهوم الجسم (solid).

الجسم هو كائن هندسي (geometrical object) له شكل (shape) وقيم محددة لكل بعد من أبعاد الشكل. من الأمثلة على المجسمات مكعباً طول ضبعه 10 cm مثلاً وأسطوانة نصف قطره قاعدتها (30 cm) وارتفاعها (75 cm). لتوصيف الحيز بشكل كامل نستخدم الحيز المنطقي (logical volume) التي تتضمن الخصائص الهندسية للجسم (solid geometrical properties) بالإضافة الى المواصفات الفيزيائية (physical characteristics) وتشمل هذه المواصفات الفيزيائية بدورها ما يلي:

- المادة (material) التي تشغل الحيز.
- هل تحوي هذه المادة أية عناصر كشف حساسة (sensitive detector elements).
- الحقل المغناطيسي ضمن الحيز، وغير ذلك.

إن إنشاء حيز منطقي ما هو فقط لتجهيز استخدامه في المحاكاة، ويقتضي الاستخدام الفعلي لحيز منطقي أن نضع نسخة منه في المكان المطلوب، وتسمى هذه العملية إنشاء حيز فيزيائي (physical volume)، فالحيز الفيزيائي إذاً هو نسخة عن حيز منطقي ما يتم وضعه في حيز أكبر منه أي يحتويه (containing volume).

4-1-2 إنشاء حيز بسيط (Create a simple volume)

ما نحتاجه فعلاً لإنشاء حيز ما هو ما يلي:

- إنشاء مجسم (Create a solid)

- إنشاء حيز منطقي (logical volume) باستخدام الجسم المذكور وإضافة بعض المواصفات.

ويمتلك كل نمط من أنماط الحيزات الثلاثة (المجسمات والحيزات المنطقية والحيزات الفيزيائية) سجلاً مرافقاً هو (Volume store) والذي يحوي على قائمة بجميع الكائنات (objects) التي تم انشاؤها من ذلك النمط، وتقوم هذه السجلات بحذف الكائنات عند اللزوم، ويجب على المستخدم ألا يحاول حذف كائنات البناء الهندسي (geometry objects) يدوياً.

4-1-3 إنشاء المجسمات (Creating a solid):

لإنشاء صندوق بسيط، يكفي أن نحدد اسمه وامتداده على كل محور ديكارتي،

```
G4double world_hx = 3.0*m;
G4double world_hy = 1.0*m;
G4double world_hz = 1.0*m;
G4Box* worldBox = new G4Box("World", world_hx, world_hy, world_hz);
```

الشكل (4-1): كيفية تحديد اسم وامتداد الجسم على كل محور ديكارتي

حيث يقوم الكود المسرود في الشكل (4-1) بإنشاء صندوق اسمه "World" يمتد على المحور x من 3.0 m إلى -3.0 m ويمتد على المحور y من 1.0 m إلى -1.0 m ويمتد أيضاً على المحور z من 1.0 m إلى -1.0 m، ونلاحظ هنا أن التابع البناء (constructor) للصف G4Box يأخذ كمعاملات دخل (input arguments) أنصاف قيم أبعاد الصندوق (أي أنصاف الطول والعرض والارتفاع). من السهل أيضاً أن ننشئ أسطوانة، حيث نستخدم الصف G4Tubs.

```
G4double innerRadius = 0.*cm;
G4double outerRadius = 60.*cm;
G4double hz = 25.*cm;
G4double startAngle = 0.*deg;
G4double spanningAngle = 360.*deg;
G4Tubs* trackerTube
= new G4Tubs("Tracker",
    innerRadius,
    outerRadius,
    hz,
    startAngle,
    spanningAngle);
```

الشكل (4-2): كيفية إنشاء أسطوانة كاملة

حيث يقوم الكود المسرود في الشكل (4-2) بإنشاء أسطوانة كاملة اسمها "Tracker" نصف قطر قاعها 60 cm وارتفاعها 50 cm (لاحظ هنا أن المقدار hz يمثل نصف ارتفاع الأسطوانة).

4-1-4 إنشاء حيز منطقي (Create a Logical Volume):

لإنشاء حيز منطقي (logical volume) يجب أن ننطلق من مجسم ومادة، فإذا استخدمنا الصندوق الذي أنشأناه في الفقرة السابقة يمكننا مثلاً أن ننشئ حيزاً منطقياً بسيطاً مملوء بغاز الأرجون (gas argon) ويتم ذلك باستخدام التعليمة التالية:

```
G4LogicalVolume* worldLog = new G4LogicalVolume(worldBox, Ar, "World");
```

حيث يسمى الحيز المنطقي worldLog الذي تم إنشاؤه بـ "World"، وبشكل مشابه يمكن أن ننشئ حيزاً منطقياً من مجسم أسطواني مملوء بالألومنيوم كما يلي:

```
G4LogicalVolume* trackerLog = new G4LogicalVolume(trackerTube, Al, "Tracker");
```

حيث يسمى الحيز المنطقي trackerLog الذي تم إنشاؤه بـ "Tracker".

4-1-5 وضع الحيز في المكان المطلوب (Place a Volume):

لوضع الحيز في المكان الذي نريده، ننطلق من الحيز المنطقي (logical volume) ثم نحدد حيزاً من الحيزات الموجودة مسبقاً ليتم وضع الحيز المنطقي داخلها، بعد ذلك نحدد موقع مركز الحيز المنطقي داخل الحيز الأم وزوايا دورانها، وحالما نحدد المعلومات المذكورة يمكننا إنشاء حيز فيزيائي يعبر عن حالة (instance) للحيز المنطقي في موضع معين، وبالطبع فإن الحيز الفيزيائي يجسد جميع مواصفات الحيز المنطقي.

4-1-6 إنشاء حيز فيزيائي (Create physical volume):

يمكن إنشاء حيز فيزيائي بالانطلاق من حيز منطقي، والحيز الفيزيائي هو ببساطة حالة متوضعة (placed instance) للحيز المنطقي، ويجب أن يتوضّع هذا الظهور داخل حيز منطقي أمّ (mother logical volume)، ونبين في الشكل (3-5) طريقة إنشاء حيز فيزيائي بسيط، ولم نقم بتدوير الحيز الفيزيائي في هذا المثال للتبسيط.

```

G4double pos_x = -1.0*meter;
G4double pos_y = 0.0*meter;
G4double pos_z = 0.0*meter;
G4VPhysicalVolume* trackerPhys
= new G4PVPlacement(0, // no rotation
                    G4ThreeVector(pos_x, pos_y, pos_z),
                    // translation position
                    trackerLog, // its logical volume
                    "Tracker", // its name
                    worldLog, // its mother (logical) volume
                    false, // no boolean operations
                    0); // its copy number

```

الشكل (3-4): انشاء حيز فيزيائي بسيط

يقوم الكود المسرود في الشكل (3-5) بوضع الحيز المنطقي (TrackerLeg) في مبدأ إحداثيات (origin) الحيز الأم (worldLog) مزاحاً بمقدار متر واحد على المحور X وغير خاضع للدوران، وتمت تسمية الحيز الفيزيائي الناتج (Tracker) ورقم النسخة الخاص بهذا الحيز الفيزيائي هو 0. هناك استثناء من قاعدة تواجد الحيز الفيزيائي داخل حيز أم، وهذا الاستثناء يخص حيز العالم (World volume) الذي يعبر عن أكبر حيز تم إنشاؤه، والذي يحوي جميع الحيزات الأخرى، ووضوحاً فإن حيز العالم هذا لا يمكن أن يحتويه حيزاً آخر.

يتم إنشاء حيز العالم هذا ككائن من (G4PVPlacement) مثل أي حيز فيزيائي آخر لكن مع وضع مؤشر صفري (null) للحيز الأم. كما يجب ألا يتم تدوير حيز العالم الفيزيائي هذا ويجب أيضاً أن يوضع في مبدأ إحداثيات نظام الإحداثيات العام (global coordinate system). وبشكل عام من الأفضل أن نختار مجسمات بسيطة لبناء حيز العالم، ونذكر هنا أن المجسم الصندوقي (G4Box) يُستخدم لبناء حيز العالم في جميع الأمثلة الأساسية المقدمة من Geant4 (B1,B2,...).

5-1-7 نظم الإحداثيات والدوران (Coordinate Systems and Rotations):

في Geant4 تمثل مصفوفة الدوران (rotation matrix) المرافقة لحيز فيزيائي ما عن دوران الجملة المرجعية (reference system) لهذا الحيز بالنسبة للحيز الأم.

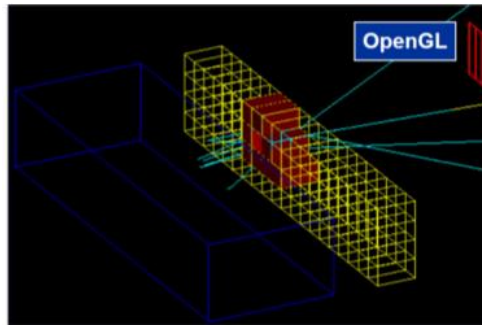
يتم إنشاء مصفوفة الدوران كما في المكتبة (CLHEP) بإجراء تدوير على المصفوفة الواحدة (identity matrix)، ويمكن الاطلاع على هذه العملية من المثال الأساسي B3.

4-1-8 تعليمات الإظهار في Geant4 المستندة إلى OpenGL (Geant4 visualization) (instructions using OpenGL)

يمكن إظهار التركيب الهندسي ومسارات الجسيمات في (Geant4) باستخدام العديد من مكتبات الرسم منها (OpenGL و OpenInventor و DAWN) وغيرها، ونبين في الشكل (4-5) لقطات من إظهار هذه المكتبات.

وقد اعتمدنا في هذا البحث على مكتبة الإظهار (OpenGL) الشائعة لعدة أسباب هي:

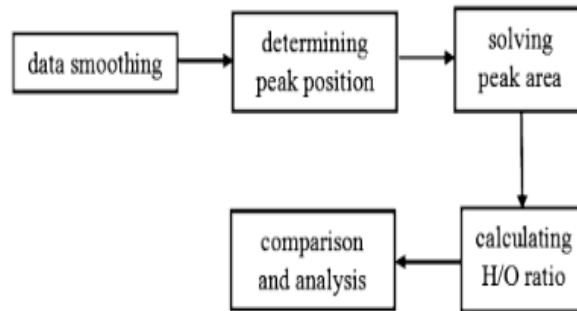
- إن هذه المكتبة متضمنة سلفاً في معظم إصدارات (Linux و windows).
- يمكن التحكم بالإظهار بشكل مباشر من (Geant4).
- تدعم هذه المكتبة العديد من خيارات الإظهار التفاعلية مثل تغيير المقياس (zoom) والدوران والانسحاب.
- استجابتها السريعة حيث أن هذه المكتبة تستثمر كامل الإمكانيات المتاحة في بطاقات الإظهار.
- تسمح بحفظ الرسومات على هيئة بكسلات أو على هيئة شعاع (EPS).



الشكل (4-4): مكتبة الاظهار (OpenGL) المستخدمة مع (Geant4)

4-2 كيفية معالجة البيانات:

يظهر في المخطط الصندوقي في الشكل (4-5) كيفية معالجة البيانات الطيفية حيث يتم أولاً تنعيم البيانات المدخلة ثم تحديد مكان الذروة للعناصر المكونة للمادة ثم معالجة منطقة القمة وتحليلها وبناءً عليها يتم حساب عدد ذرات العناصر في المادة المتفجرة، ومنها نحصل على نسب العناصر في كل مادة، وأخيراً تتم المقارنة والتحليل للحصول على النتائج.



الشكل (4-5) مخطط التدفق لكيفية معالجة البيانات الطيفية

منسّق: مسافة قبل: 5 نقطة, بعد: 5 نقطة

3-4 واجهات البرنامج:

في الواقع يوجد مختبرات يتم فيها تصنيع المواد المتفجرة بمختلف أنواعها، والعصابة الإرهابية تقوم بشراء هذه المواد لتنفيذ أعمالها الإرهابية، ولذلك يتوجب على الحواجز الأمنية أن تمتلك أجهزة للكشف عن هذه المواد لحماية أنفسهم والحفاظ على حياة الناس.

البرنامج مكون من قاعدتي بيانات، القاعدة الأولى خاصة بالمختبر والقاعدة الثانية خاصة بالعصابة الإرهابية أما الحاجز فيتم فيه مقارنة قاعدة بيانات العصابة مع قاعدة البيانات التي تم تخزينها لديه من المختبر، في حال التشابه التام سيعطي نتيجة بصوت يدل على المادة المتفجرة، أما في حال تجاوز عتبة معينة " أطلقنا عليها اسم عتبة الأمان" سيطلق الجهاز صوت بأن المادة مشبوهة، والحالة الأخيرة هي أن تكون المادة آمنة وعندها لن يطلق الجهاز أي صوت.

تم تمثيل واجهات البرنامج على (netbeans) بلغة الجافا والذي يتكون من ثلاث برامج فرعية تمثل: المختبر والجهة الأمنية والعصابة الإرهابية. كما هو موضح في الشكل (4-6)

منسّق:مسافة قبل: 5 نقطة، بعد: 50.01 نقطة



الشكل (4-6): واجهة البرنامج الرئيسية

أولاً: البرنامج المتعلق بالمختبر:

الذي يتم تمثيله على شكل قاعدة بيانات ممثلة بالشكل (4-7)



الشكل (4-7): واجهة تمثل المختبر

- وفيه نقوم بتهيئة المواد وتخزين القيم المتعلقة بها ضمن قاعدة بيانات خاصة وذلك كما يلي:
- إضافة العناصر: وفيه نقوم بتحديد واصفات العناصر المشكلة للمواد التي نريد دراستها وتحليلها (اسم العنصر، رمز العنصر، العدد الذري Z ، الكتلة الذرية A) كما في الشكل (4-8).

الشكل (4-8): واجهة إضافة العنصر

- إضافة مادة:

وهنا نقوم بتحديد واصفات المادة وذلك انطلاقاً من عناصرها (والتي قمنا بتعريفها سابقاً) وكثافتها في حال تشابه واصفات العناصر المكونة للمواد.

منسّق:مسافة قبل: 50.01 نقطة

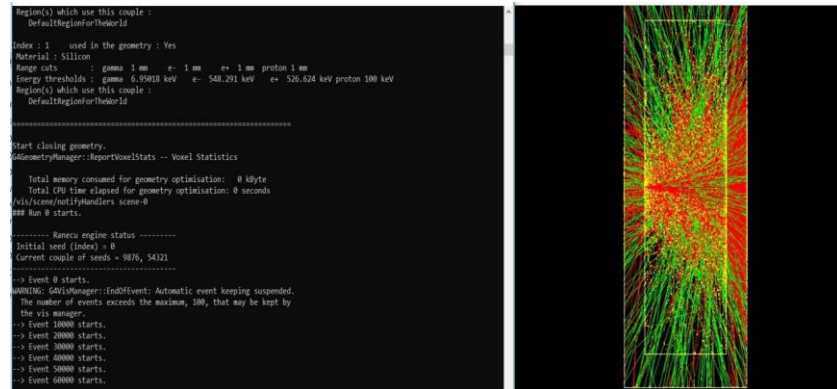
- تحديد طيف الطاقة المتحررة:

نقوم بتحديد وتخزين طيف الطاقة المتحررة نتيجة ارتداد النوترونات السريعة والحرارية بالمادة المحددة كما هو موضح في الشكل (4-9).



الشكل (4-9) واجهة تحديد طيف الطاقة المتحررة والمتعلقة بمادة محددة

ويتم تمثيل التجربة عن طريق استدعاء برنامج المحاكاة (Geant4) لتحديد قيم الطاقة المتحررة عن كل مادة كما هو موضح في الشكل (4-10).



الشكل (4-10): واجهة برنامج Geant4 التي تمثل الطاقة المتحررة عن المادة

ثانياً: البرنامج المتعلق بالعصابة الإرهابية:

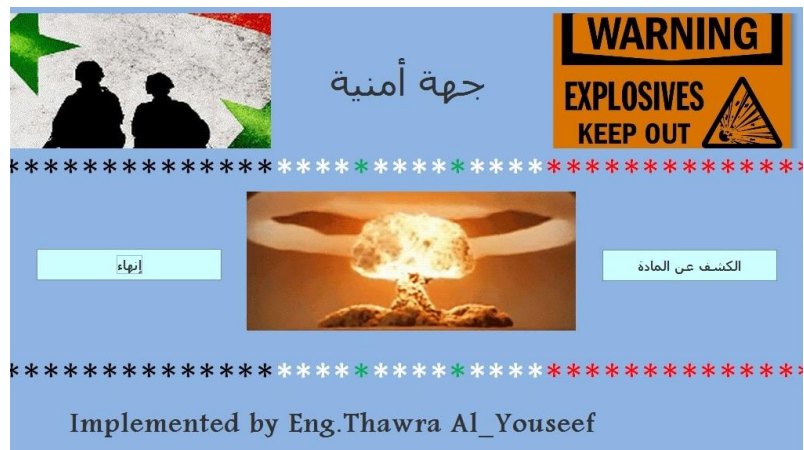
وهنا نقوم بالعصابة بتحديد واصفات المواد المتفجرة انطلاقاً من عناصرها، وتراكيز العناصر المكونة لكل مادة، وكثافتها وذلك بغية إنشاءها كما في الشكل (4-11).



الشكل (4-11): واجهة تمثل العصابة الارهابية

ثالثاً: البرنامج المتعلق بالجهات الأمنية:

وهنا تقوم الجهات الأمنية بفحص المواد لتحديد المواد المتفجرة منها من خلال تحليل الطاقة المتحررة من كل مادة متفجرة، فبالنقر على زر "الكشف عن المادة" نقوم بتحديد ملف يحوي واصفات هذه المادة من خلال مطابقتها مع الوصفات المدخلة في المختبر كما في الشكل (4-12).



الشكل (4-12): واجهة تمثل الجهة الأمنية



الشكل (4-13): واجهة تمثل كيفية استدعاء برنامج Geant4

وذلك لنقوم بتطبيق تقنية PFTNA عليها من خلال استدعاء برنامج (Geant4) (الشكل (4-13)) حيث يتم تحديد الطيف من خلال توليد ملف خاص بكل مادة (Material data.txt) يحتوي على واصفات المادة (كثافتها والمواد المكونة لها وعدد ذرات كل عنصر) ومن ثم تحليل الطيف المتشكل والمرتبط بهذه المادة وإظهارها من خلال برنامج (Root) كمخططات بيانية ناتجة عن تأثيرات الاصطدام. ومن ثم البحث وفق واصفات الطيف ضمن قاعدة البيانات التي قام المختبر بإنشائها وذلك لتحديد ماهية المادة التي تم تمريرها.

قمنا في بحثنا بدراسة خمس مواد من خلال معرفة كثافتها والعناصر المكونة لها وتركيبها الكيميائي وواصفات العناصر والتي تم الحصول عليها من موقع جامعة هارفارد الموضحة في الجدول (4-1)، وتم تمييز المواد المتفجرة وتحديد لها من هيستوغرام الطاقة الذي يتم إظهاره كمخططات بيانية.

الجدول (4-1): المواد التي تم الكشف عنها (H_2O , NAI , CH , $C_7H_5N_3O_6$, $C_3H_6N_6O_6$)

المادة	الكثافة (g / cm^3)	عدد العناصر	الصيغة الكيميائية
الماء	1.000	2	H_2O
NAI	3.67	2	NAI
Plastic	1.04	2	CH
TNT	1.654	4	$C_7H_5N_3O_6$
RDX	1.82	4	$C_3H_6N_6O_6$

منسّق: مسافة بعد: 1.51 نقطة

4-4 نتائج محاكاة البحث:

تم تمرير عينتين من المواد المتفجرة وثلاث عينات غير متفجرة وتحليل طيفها وعرض النتائج على ROOT V5 كبيئة رسومية مع العلم أن جميع المواد المتفجرة تبعد عن الكاشف نفس المسافة. يتم تمثيل الطيف الطاقة الناتج عن كل مادة والذي يعتبر بصمة للعنصر من خلال دراسة تغير كل من: EnergyDeposit-1: ويعبر عن الطاقة الناجمة عن اصطدام النترونات مع المادة وتحسب من المعادلة التالية:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m \text{Event}(i) \rightarrow \text{getParticle}(j) \rightarrow \text{getKineticEnergy}())}{n} \quad (4-1)$$

حيث n عدد الأحداث، m عدد الجزيئات (النترونات).

TraklenCharged-2: طول الخطوات التي قطعها الجزيئات المشحونة خلال كل حدث وتحسب من المعادلة التالية:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m \text{Event}(i) \rightarrow \text{getParticleWithNonZeroCharge}(j) \rightarrow \text{getStepLenght}())}{n} \quad (4-2)$$

TrakLenNeutral-3: طول الخطوات التي قطعها الجزيئات الغير مشحونة خلال كل حدث وتحسب من المعادلة التالية:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m \text{Event}(i) \rightarrow \text{getParticleWithZeroCharge}(j) \rightarrow \text{getStepLenght}())}{n} \quad (4-3)$$

منسّق:مسافة قبل: 5 نقطة، بعد: 5 نقطة

NbStepsCharged-4: عدد الخطوات التي تخللها اصطدام جزيئات مشحونة وتحسب من المعادلة التالية:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m \text{Event}(i) \rightarrow \text{getParticleWithNonZeroCharge}(j) \rightarrow \text{getStepLenght}())}{n} \quad (4-4)$$

NbStepsNeutral-5: عدد الخطوات التي تخللها اصطدام جزيئات غير مشحونة وتحسب من المعادلة التالية:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m \text{Event}(i) \rightarrow \text{getParticleWithZeroCharge}(j) \rightarrow \text{getStepLenght}())}{n} \quad (4-5)$$

-6 TransmitFlag : عدد الجزئيات التي لم تصطدم بالمادة وتحسب من المعادلة التالية:

$$\text{transmit} = (((\text{fDirX} \geq 0.0 \ \&\& \ \text{position.x} \geq \text{fXendAbs}) (\text{fDirX} < 0.0 \ \&\& \ \text{position.x} \leq \text{fXstartAbs})) \quad (4-6)$$

منسَّق: مسافة قبل: 5 نقطة، بعد: 5 نقطة

-7 ReflectedFlag : عدد الجزئيات التي اصطدمت بالمادة وتحسب من المعادلة التالية:

$$\text{reflect} = (((\text{fDirX} \geq 0.0 \ \&\& \ \text{position.x} \leq \text{fXendAbs}) (\text{fDirX} < 0.0 \ \&\& \ \text{position.x} \leq \text{fXstartAbs})) \ \&\& \ \text{energ} > 0.0) \quad (4-7)$$

منسَّق: مسافة قبل: 50.01 نقطة، بعد: 50.01 نقطة

كل مخطط من المخططات له ثلاث قيم إحصائية تحدده (Entries-Mean-RMS) وهذه القيم هي التي تميّز المواد المتفجرة في عملية التحليل.

- Entries تمثل عدد النترونات التي تم إسقاطها على كل عينة وفي بحثنا اسقطنا 100000 نترون لأنه يمثل القيمة العظمى للكشف عن أي مادة.
- RMS تمثل نسبة الخطأ.
- Mean تمثل المتوسط الحسابي لكل محدد.

4-4-1 العينة الأولى:

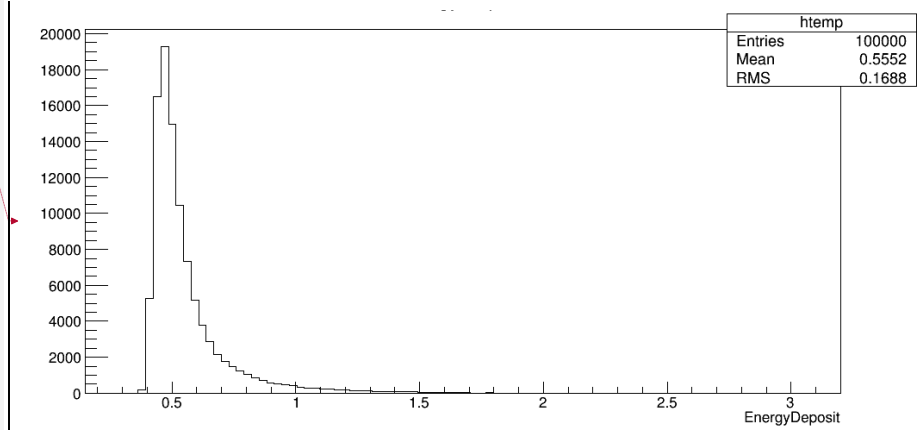
الكشف عن الماء: يظهر في الجدول (4-2) القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن H_2O

الجدول (4-2): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن H_2O

المحددات الإحصائية للمخطط	EnergyD eposit	Traklen Charged	TrakLenN eutral	NbStepsC harged	NbStepsN eutral	TransmitFl ag	Reflected Flag
Entries	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Mean	0.5552	3.146	0.1231	2.263	0.0954	1.999	0.00168
RMS	1.688	0.6113	0.5092	3.952	0.3132	0.04678	0.04834

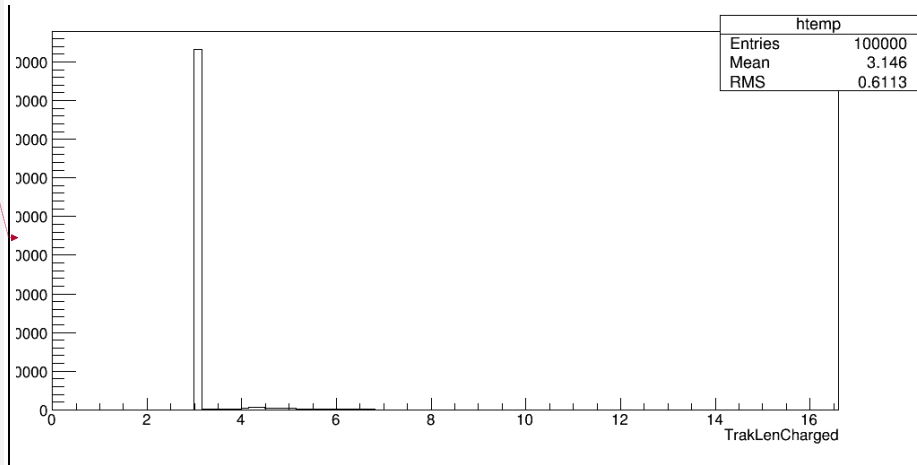
يظهر في الأشكال من الشكل (4-14) وحتى الشكل (4-20) طيف الطاقة الناتج عن مادة H_2O والذي يمثل النترونات الحرارية والسريعة المرندة والممنصة حيث تظهر قمة وحيدة للطاقة المرسله وقمة واحدة

للترونات المرتدة وقمة وحيدة لاجمالي طول المسار المحايد وهذه القيم تعتبر هوية لتحديد H_2O . يظهر الشكل (4-14) أن الطاقة الناجمة عن اصطدام النترونات بالماء تملك قمة عند القيمة (0.5552)



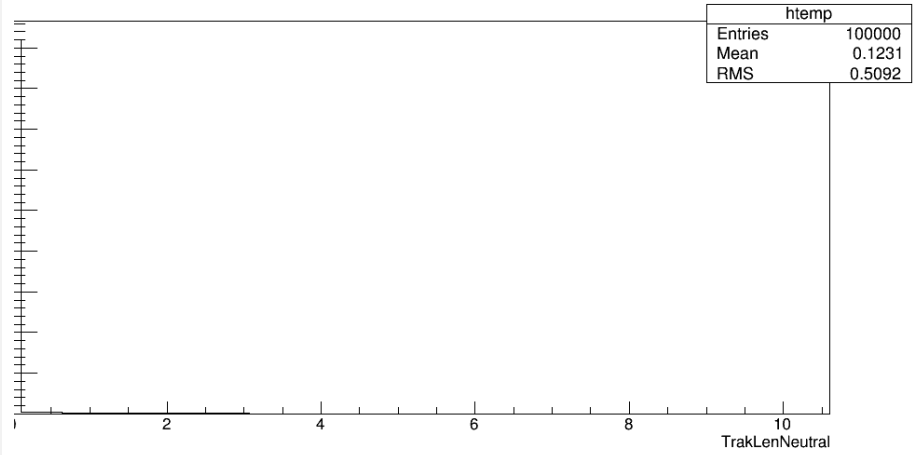
الشكل (4-14) الطاقة الناجمة عن اصطدام النترونات مع الماء

أما الشكل (4-15) أن طول الخطوات التي قطعتها الجزيئات المشحونة خلال كل جزيء ماء تملك قمة عند القيمة (3.146).



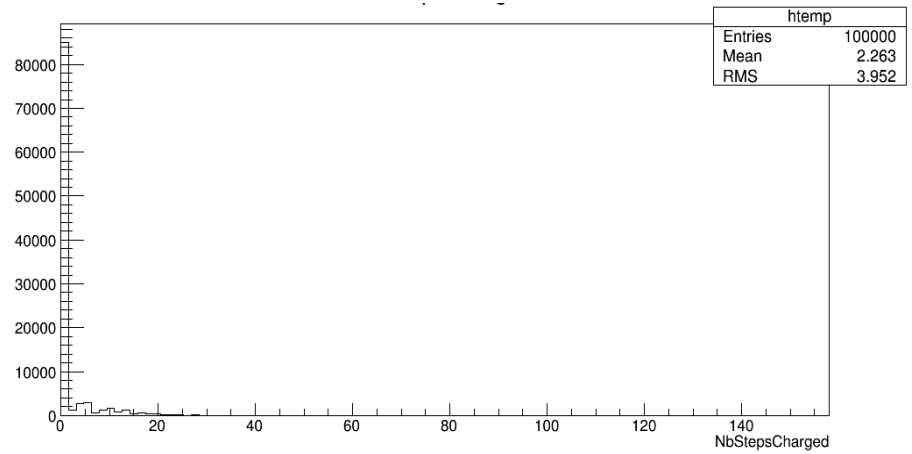
الشكل (4-15): طول الخطوات التي قطعتها الجزيئات المشحونة خلال كل حدث

في الشكل (4-16) تم تمثيل طول الخطوات التي قطعتها الجزيئات الغير مشحونة خلال كل حدث حيث تظهر قمته عند القيمة (0.1231).



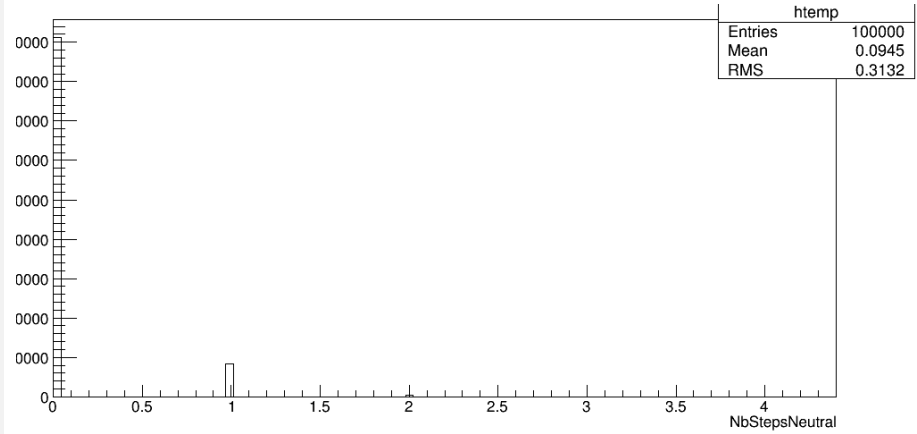
الشكل (4-16): طول الخطوات التي قطعتها الجزيئات الغير مشحونة خلال كل حدث

أما عدد الخطوات التي تخللها اصطدام جزيئات مشحونة فتظهر في الشكل (4-17) ونلاحظ أن القمة عند القيمة (2.253).



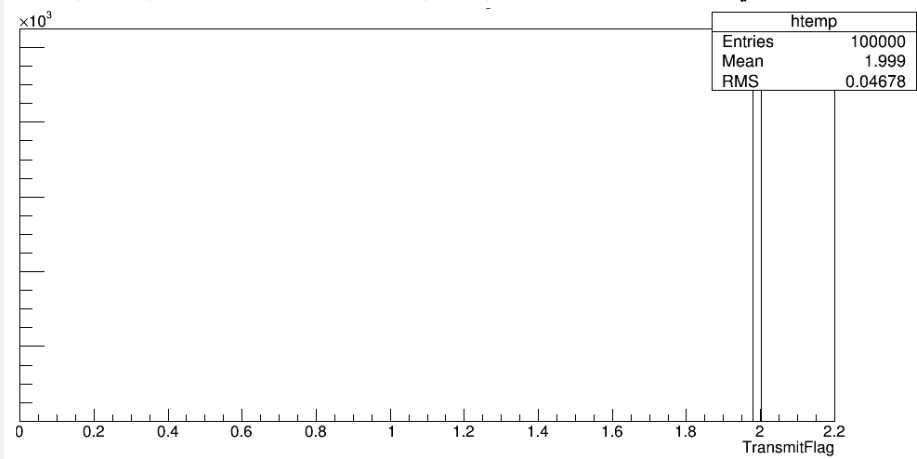
الشكل (4-17): عدد الخطوات التي تخللها اصطدام جزيئات مشحونة

يظهر الشكل (4-18) عدد الخطوات التي تخللها اصطدام جزيئات غير مشحونة والقمة هنا عند (0.0945).



الشكل (4-18): عدد الخطوات التي تخطيها اصطدام جزيئات غير مشحونة

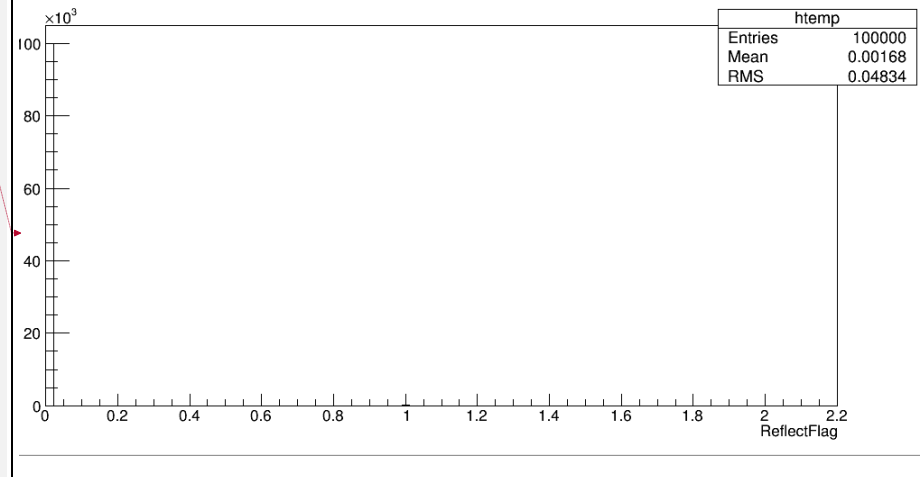
أما عدد الجزيئات التي لم تصطدم بالمادة فالشكل (4-19) يبين لنا أن قمته عند القيمة (1.999).



الشكل (4-19): عدد الجزيئات التي لم تصطدم بالمادة

يبين الشكل (4-20) عدد الجزيئات التي اصطدمت بالمادة والتي تظهر قمته عند القيمة (0.00168)

منسَّق:مسافة قبل: 5 نقطة, بعد: 50.01 نقطة



الشكل (4-20): عدد الجزيئات التي اصطدمت بالمادة

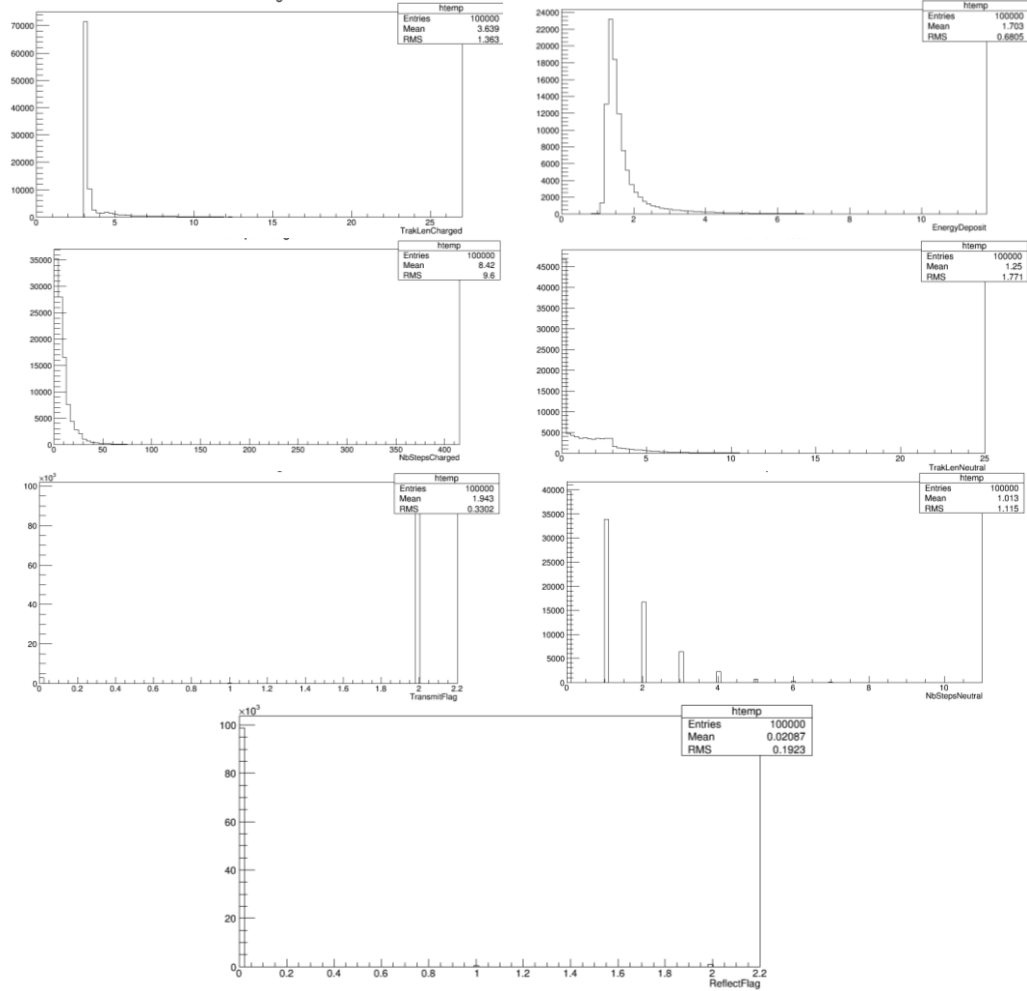
5-4-2 العينة الثانية:

الكشف عن مادة NAI: يظهر في الجدول (4-3) القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة NAI.

الجدول (4-3): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة NAI

المحددات الإحصائية للمخطط	Energy Deposit	Traklen Charged	Traklen Neutral	NbSteps Charged	NbSteps Neutral	Transmit Flag	Reflected Flag
Entries	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Mean	1.703	3.639	1.25	8.42	1.013	1.943	0.02087
RMS	0.6805	1.363	1.771	9.6	1.115	0.3302	0.1923

يظهر في الشكل (4-21) طيف الطاقة الناتج عن مادة NAI والذي يمثل النترونات الحرارية والسريعة المرتردة والممتصة حيث تظهر قمة وحيدة للطاقة المرسله وقمة واحدة للنترونات المرتردة وقمة وحيدة لاجمالي طول المسار المحايد وهذه القيم تعتبر هوية لتحديد مادة NAI.



الشكل (4-21): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة الماء

5-4-3 العينة الثالثة:

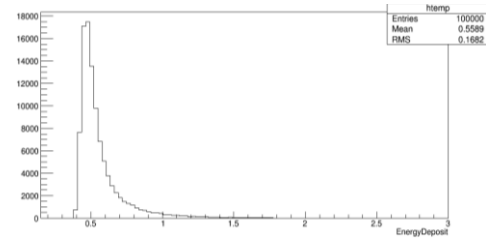
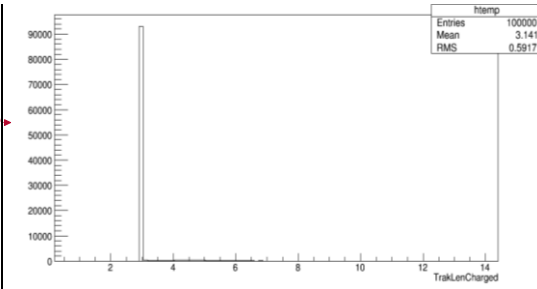
الكشف عن مادة plastic: يظهر في الجدول (4-4) القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة CH

الجدول (4-4): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة CH

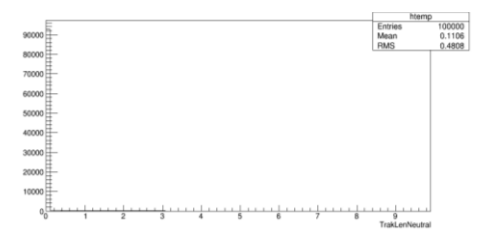
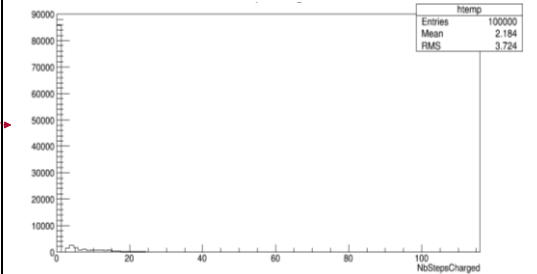
المحددات الإحصائية للمخطط	Energy Deposit	Traklen Charged	TrakLenN eutral	NbSteps Charged	NbSteps Neutral	Transmit Flag	Reflected Flag
Entries	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Mean	0.5589	3.141	0.1106	2.184	0.0845	1.999	0.00103
RMS	1.682	0.5917	0.4808	3.724	0.2947	0.03898	0.03562

يظهر في الأشكال التالية طيف الطاقة الناتج عن مادة plastic والذي يمثل النترونات الحرارية والسريعة المرتردة والممتصة حيث تظهر قمة وحيدة للطاقة المرسله وقمة واحدة للنترونات المرتردة وقمة وحيدة لاجمالي طول المسار المحايد وهذه القيم تعتبر هوية لتحديد مادة plastic.

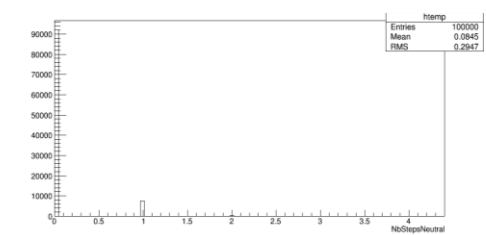
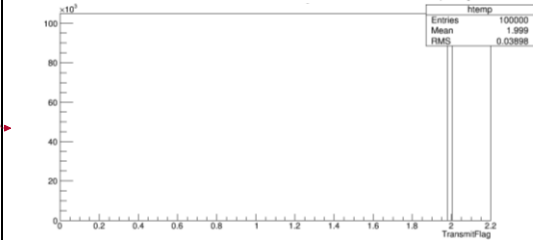
منسَّق:مسافة قبل: 5 نقطة



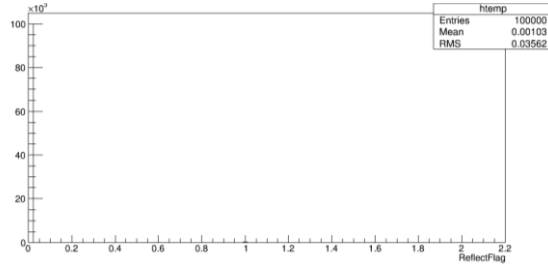
منسَّق:مسافة قبل: 5 نقطة



منسَّق:مسافة قبل: 5 نقطة



منسَّق:مسافة قبل: 5 نقطة



الشكل (4-22): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة CH

4-4-4 العينة الرابعة:

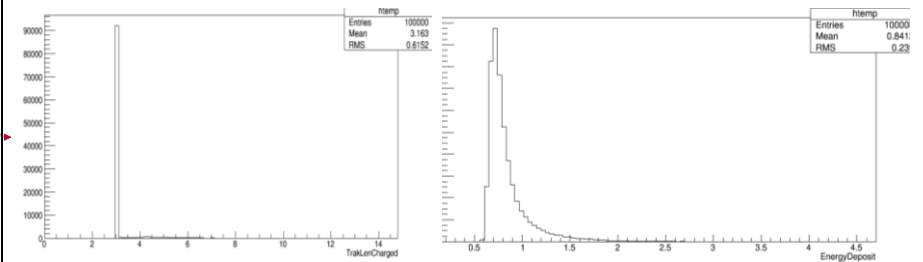
الكشف عن مادة TNT: يظهر في الجدول (4-5) القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة TNT

الجدول (4-5): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة TNT

المحددات الإحصائية للمخطط	EnergyDe posit	TraklenCh arged	TraklenN eutral	NbStepsCh arged	NbStepsNe utral	TransmitF lag	Reflected Flag
Entries	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Mean	0.8412	3.163	0.1934	2.576	2.1466	1.999	0.0016
RMS	0.239	0.6152	0.6458	4.143	0.3921	0.05127	0.0458

يظهر في الشكل (4-23) طيف الطاقة الناتج عن مادة TNT والذي يمثل النترونات الحرارية والسريعة المرتردة والممتصة حيث تظهر قمة وحيدة للطاقة المرسله وقمة واحدة للنترونات المرتردة وقمة وحيدة لاجمالي طول المسار المحايد وهذه القيم تعتبر هوية لتحديد مادة TNT.

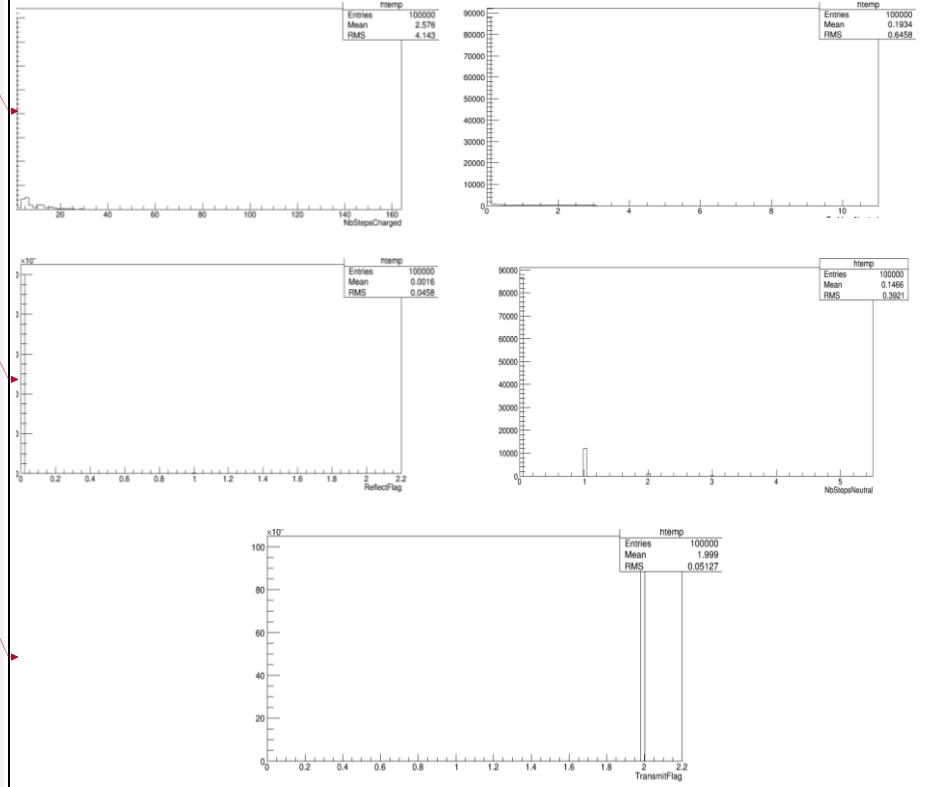
منسَّق:مسافة قبل: 50.01 نقطة، بعد: 5 نقطة



منسّق:مسافة قبل: 50.01 نقطة، بعد: 5 نقطة

منسّق:مسافة قبل: 50.01 نقطة، بعد: 5 نقطة

منسّق:مسافة قبل: 50.01 نقطة، بعد: 5 نقطة



الشكل (4-23): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة TNT

من نتائج المحاكاة السابقة يمكننا أن نميّز مادة TNT.

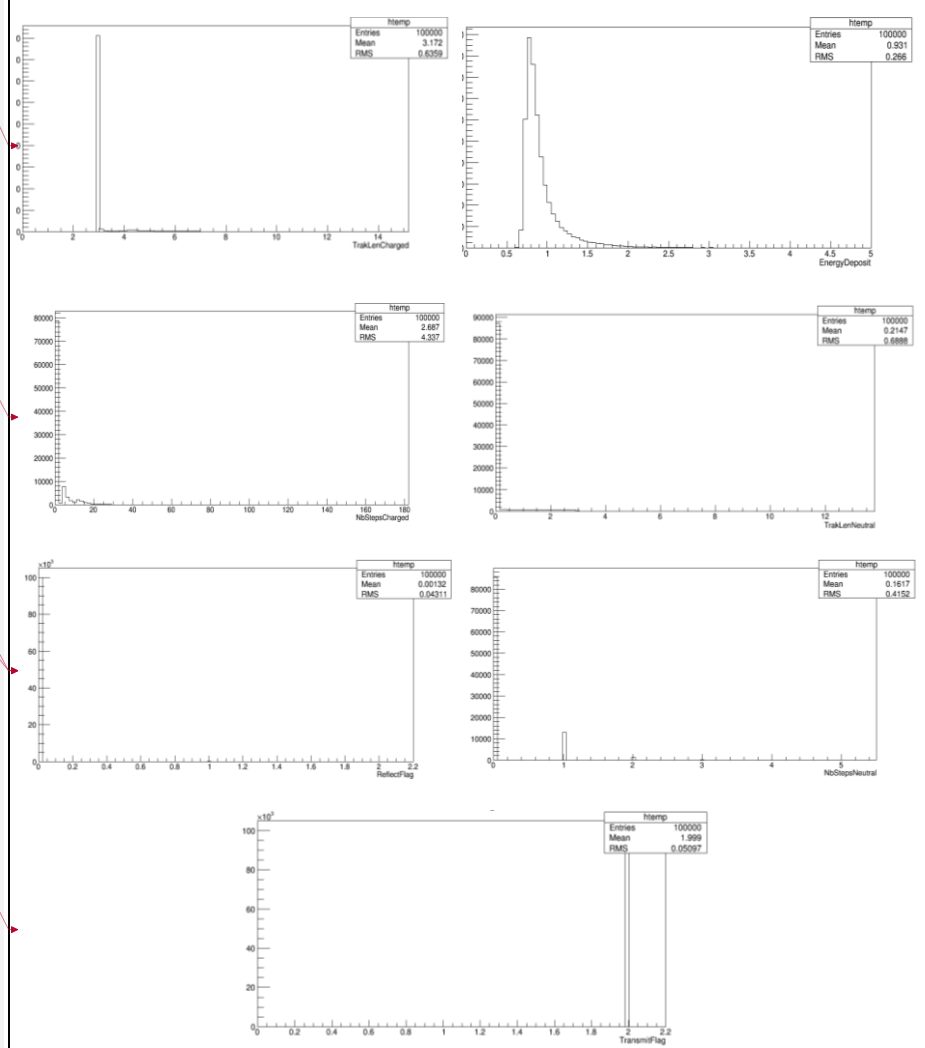
4-4-5 العينة الخامسة:

الكشف عن مادة RDX: يظهر في الجدول (4-6) القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة RDX

الجدول (4-6): محددات الطاقة المتحررة لمادة RDX

المحددات الإحصائية للمخطط	Energy Deposit	TrakLen Charged	TrakLen Neutral	NbSteps Charged	NbSteps Neutral	Transmit Flag	Reflected Flag
Entries	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Mean	0.931	3.172	2.687	0.1617	0.2147	1.999	0.0013
RMS	0.266	0.6359	4.337	0.4152	0.6888	0.0509	0.043

يظهر في الشكل (4-24) طيف الطاقة الناتج عن مادة RDX والذي يمثل النيوترونات الحرارية والسريعة المرتدة والممتصة حيث تظهر قمة وحيدة للطاقة المرسله وقمة واحدة للنيوترونات المرتدة وقمة وحيدة لاجمالي طول المسار المحايد وهذه القيم تعتبر هوية لتحديد مادة RDX.



الشكل (4-24): القيم الإحصائية المميزة لطيف الطاقة الناتجة عن مادة RDX

من نتائج المحاكاة السابقة يمكننا أن نميّز مادة RDX.

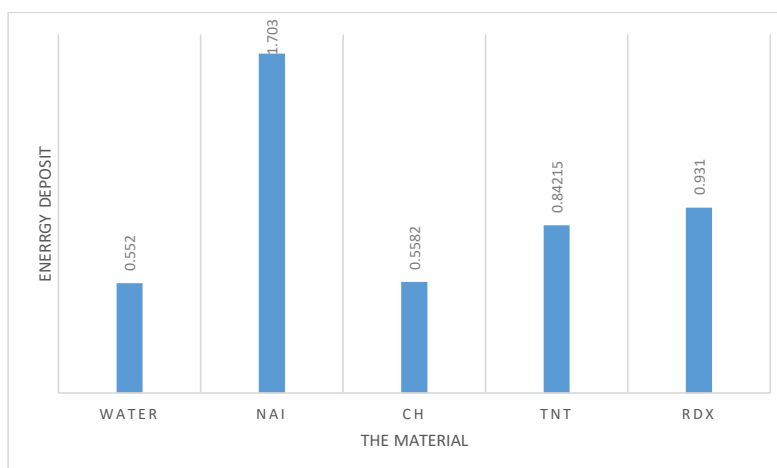
4-5 مناقشة النتائج:

استنتجنا مما سبق أن المواد المتفجرة تتميز بتركيبها الكيميائي المختلف وبتطبيق تقنية تحليل النيتروانات الحرارية والسريعة النبضية تم تحرير نيتروانات على شكل أشعة غاما بطاقات مختلفة تميز نوع المادة وتكشف عن العناصر المكونة للمادة ونسبها لمعرفة إن كانت المادة متفجرة أم لا، فالقيم الممثلة للمادة التي تم توضيحها بيانياً والناجمة عن تطبيق تقنية PFTNA، تمثل هوية أي مادة لكونها فريدة. بالإضافة الى أننا نستفيد من هوية هذه المادة بالكشف عن أي مادة ممره حيث نستطيع تحديد ما يلي:

- 1- المادة الممررة بشكل أكيد (وذلك في حالة التطابق).
- 2- المادة الممررة بشكل مشتببه (وذلك في حال تجاوز عتبة تشابه معينة).

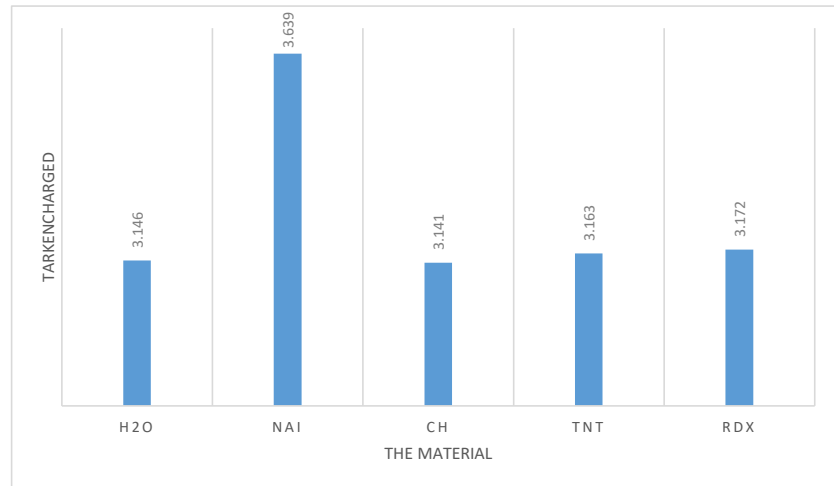
4-6 مقارنة النتائج:

لتوضيح الدقة في تمييز المواد قمنا بمقارنة كل محدد من المحددات للعينات الخمس. نلاحظ في الشكل (25-4) أن قيمة الطاقة الناجمة عن اصطدام النيتروانات مع المادة هي الأعلى لمادة (NAI) لأنه يستخدم كمولد نيتروانات بسبب الطاقة العالية الناجمة عن العناصر المكونة لها، أما بالنسبة لـ (RDX, TNT) فإن الطاقة الناجمة عن اصطدام النيتروانات هي (0.342, 0.931) وهناك فرق واضح بين قيم (Energy Deposit) للمواد المتفجرة والمواد الآمنة ومولدات النيتروانات ومقارنة مع نتائج المراجع السابقة نلاحظ أن القيم التي حصلنا عليها أدق لأن معدل الخطأ فيها 1.68 أما في المرجع [3] فإن معدل الخطأ 2.135 وبالتالي التحسين أصبح واضحاً بما أن نسبة الخطأ تناقصت.



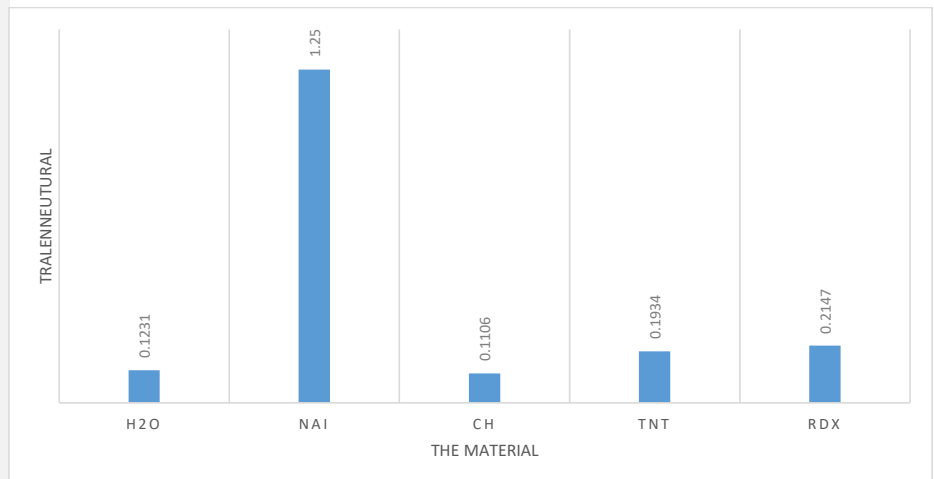
الشكل (25-4): مقارنة قيمة الطاقة الناجمة عن اصطدام النيتروانات مع المادة

ولكن نلاحظ من الشكل (4-26) أن طول الخطوات التي قطعتها الجزيئات المشحونة خلال كل حدث لكل عينة من العينات هي قيم متقاربة جداً بين المواد المتفجرة والأمانة التي تحتوي هيدروجين وواوكسجين لأنها تعتمد على نسبتهما. ولكن طول الخطوات للمواد المتفجرة يتراوح بين (18.3-3.16).



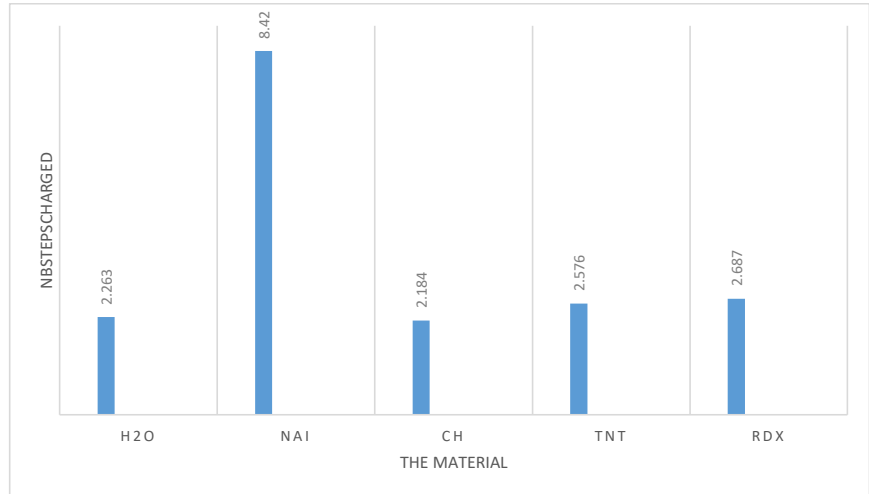
الشكل (4-26): طول الخطوات التي قطعتها الجزيئات المشحونة خلال كل حدث لكل عينة

المحدد الثالث هو طول الخطوات التي قطعتها الجزيئات الغير مشحونة الذي يزداد كلما زاد عدد ذرات النيتروجين والهيدروجين كغازات في المادة المتفجرة ويظهر ذلك في الشكل (4-27) كما نلاحظ أن طول الخطوات التي قطعها الجزيئات غير المشحونة في يوديد الصوديوم هي القيمة الأعلى دائماً والأكثر تمايزاً.



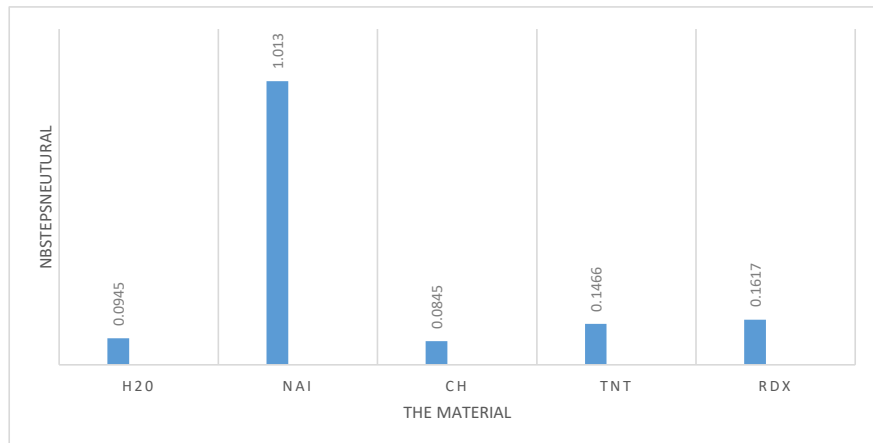
الشكل (4-27): مقارنة طول الخطوات التي قطعتها الجزيئات غير المشحونة

أما بالنسبة لعدد الخطوات التي تخطتها اصطدام جزيئات مشحونة فهي تتغير طردياً مع المواد الأكثر خطورة وضرراً ونلاحظ ذلك في الشكل (4-28)



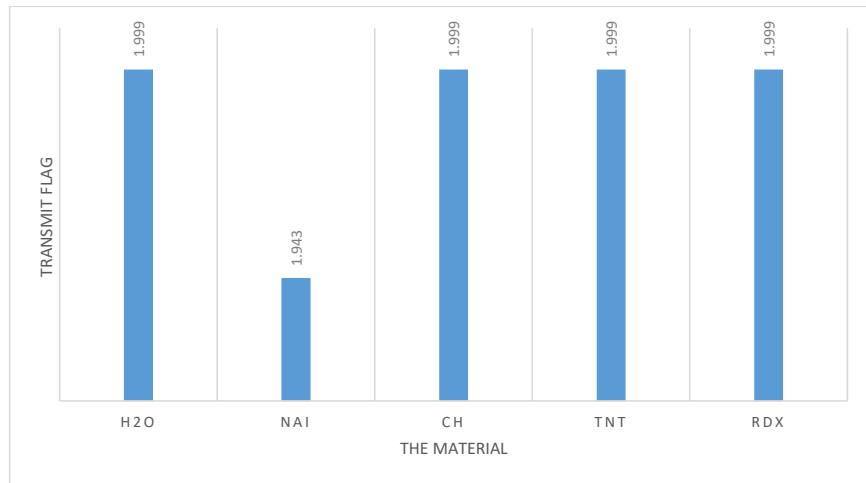
الشكل (4-28): مقارنة عدد الخطوات التي تخطتها اصطدام جزيئات مشحونة

وكما تتناسب عدد الخطوات التي تخطتها اصطدام جزيئات مشحونة مع خطورة المواد، أيضاً عدد الخطوات التي تخطتها اصطدام جزيئات غير مشحونة تزداد كلما زادت الطاقة التفجيرية كما يظهر في الشكل (5-29).



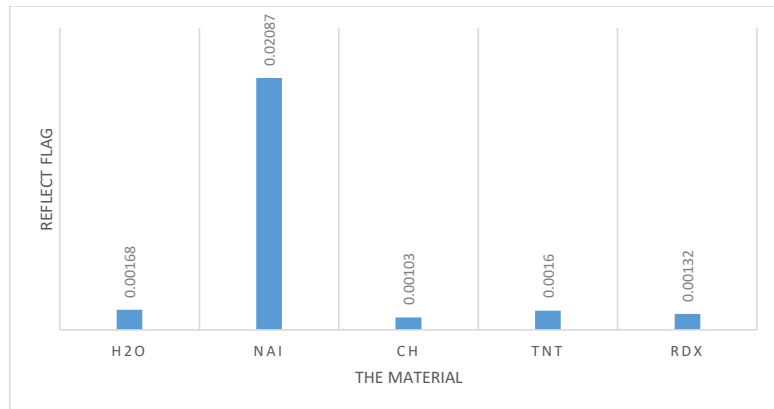
الشكل (4-29): مقارنة الخطوات التي تخلصها اصطدام جزيئات غير مشحونة

المحدد السادس وهو عدد الجزيئات التي لم تصطدم بالمادة نلاحظ من الشكل (5-30) أن عدد الجزيئات التي لم تصطدم بالمادة متقاربة جداً في كل العينات التي تحوي ذرات الكربون والهيدروجين والاكسجين (الفروق بينهم هي أجزاء من عشرة الاف لذلك تم تقريبها) أما في المادة التي تحوي معدن فإن القيمة أقل لأن جزيئات المعادن ستصطدم بالمادة.



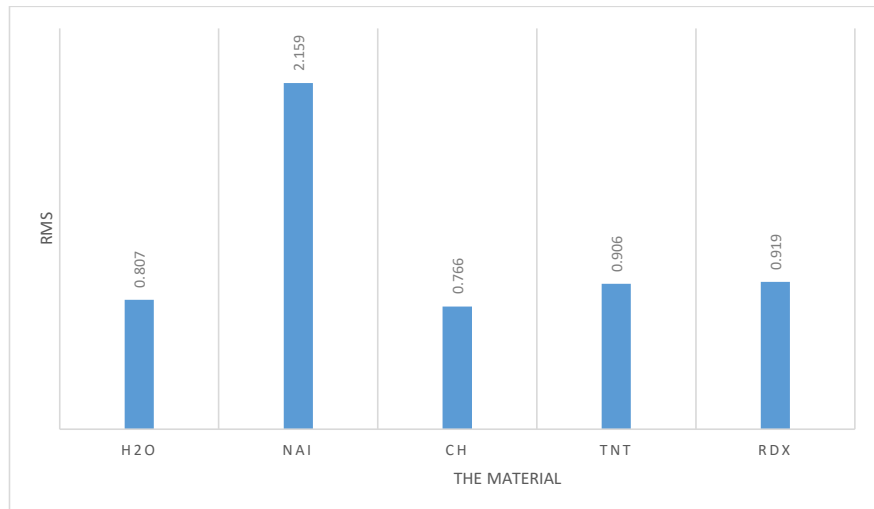
الشكل (4-30): مقارنة عدد الجزيئات التي لم تصطدم بالمادة

والشكل (5-31) يظهر عدد الجزيئات التي اصطدمت بالمادة نلاحظ أن القيمة منطقية في حال مقارنتها مع الشكل السابق حيث نلاحظ أن الفرق بين عدد الجزيئات المصطدمة هو أجزاء من عشرة الاف.



الشكل (4-31): مقارنة عدد الجزيئات التي اصطدمت بالمادة

بالنسبة لمعدل الخطأ: أولاً نحسب المتوسط الحسابي لمعدلات الخطأ الناجمة عن كل محددات المادة ونلاحظ أن معدل الخطأ يزداد كلما زاد عدد المواد التي تسبب تشويش (أي المواد التي تتحرر منها نترونات) ومع ذلك أعلى معدل خطأ كان 2.159 وهي قيمة مثالية وسبب ذلك هو استخدام سبع محددات لكل مادة مما جعل التمايز بين المواد واضحاً كما يظهر في الشكل (5-32).



الشكل (4-32): مقارنة معدلات الخطأ المصاحبة للعينات

التوصيات المستقبلية

يمكن للأبحاث القادمة تحديد قيمة عتبة التشابه بين المواد عن طريق ربط القيم بعلاقات رياضية وليس عن طريق التجربة كما فعلنا في بحثنا. كما يمكن العمل في المستقبل على اختراع أو تطوير مولد نيوترونات كبديل عن مولد النيوترونات الذي تم استخدامه في بحثنا بنفس الأداء ولكن بتكلفة اقل لأن هذا المقترح من الصعب تطبيقه الآن لأنه يحتاج للتجريب العملي نظراً لعدم توفر تطبيق برمجي يحاكي هذا الدارة المقترحة. وبما أن الغالبية العظمى من المستويات الدورانية الجزيئية للمتفجرات، والمخدرات، هي في المنطقة التيراهرتزية فإن بمقدور القياس الطيفي لنطاق التيراهرتز أن يجري عمليات تفتيش آمنة للجسم البشري بحثاً عن المتفجرات، والمخدرات، والجزيئات الضخمة البيولوجية، والأسلحة، والبضائع المحظورة الأخرى. وعلى خلاف التكنولوجيا القائمة للأشعة السينية والتصوير بالموجات فوق الصوتية، فإن بمقدور القياس الطيفي والتصوير توفير شكل الشيء ومقارنة المعلومات الطيفية المقاسة مع المكتبة القائمة لطيف التيراهرتزي الخطر لتحديد خصائص المادة. وإلى جانب ذلك، ومع الطاقة المنخفضة للغاية، فإن الموجة لن تنتج تأيئاً ضاراً بالأنسجة البيولوجية. لذلك، ومقارنةً مع أوجه قصور الأشعة السينية التي يمكن أن تلحق الأذى بالجسم البشري ويتعذر على كواشفها المعدنية الكشف عن المواد غير المعدنية، فإن لتكنولوجيا التيراهرتز آفاق تطبيق جيدة في التفتيش الأمني عن بعد وخاصةً إذا تم دمجها مع تقنية PFTNA التي استطعنا من خلالها الكشف عن أي نوع من المواد المتفجرة ولكن لمسافة معينة في بحثنا.

- [1] Lifson S 1987 Chemical selection, diversity, teleonomy and the second law of thermodynamics Reflections on Eigen's theory of self-organization of matter, Biophysical Chemistry, 26, 9p.
- [2] A. Papp & J. Csikai 2011 Detection and identification of explosives and illicit drugs using neutron based techniques, J Radioanal Nucl Chem ,288, 9p.
- [3] DAVID J & LEWIS A (2008)-Explosive Detection Equipment and Technology for Border Security. JRC, Italy, 62p.
- [4] Electrochemical Determination of TNT, DNT, RDX, and HMX with Gold Nanoparticles/Poly(Carbazole-Aniline) Film-Modified Glassy Carbon Sensor Electrodes Imprinted for Molecular Recognition of Nitroaromatics and Nitramines. Anal Chem. 2018 Jun 19;90(12):7364-7370, Faculty of Engineering, Chemistry Department, Istanbul University, Turkey.
- [5] MATEC Web of Conferences 88 ,03001 (2017)• Karim Elsharkawy1,a• Lin Guo1 and Hany Fouda• Experimental Studies on Improved Plastic Bonded Explosives Materials (PBXs) for Controlled Fragmentation Warheads• DOI: 10.1051/mateconf/20178803001.
- [6] Dalin Xiang, Jili Rong, *Xuan He, Zhiwei Feng. Underwater Explosion Performance of RDX/AP-based Aluminized Explosives. Cent. Eur. J. Energ. Mater (2017), 14 (1): 60-76; DOI: 10.22211/cejem/68443.
- [7] NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES 26, 010501 (2015)• GEANT4 simulation of the characteristic gamma-ray spectrum of TNT under soil induced by DT Neutrons; DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.010501.
- [8] Marshall M,2009-aspects of explosives detection. defense science and technology laboratory, JIMMIE C. OXLEY, Chemistry Department University of Rhode Island, USA,303p.
- [9] ALEXANDER B 2015 Material Classification by Analysis of Prompt Photon Spectra Induced by 14-Mev Neutrons, Physics Procedia 66, 7p.
- [10] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 99, Issues 1–4, 5 May (1995), Pages 739-742.
- [11] Source Correlated Prompt Neutron Activation Analysis for Material Identification and Localization, Canion B & Mconchie S 2017, IEEE, 2678523, 8.
- [12] Simulation of non-destructive detection of explosives by Prompt Gamma Neutron Activation Analysis(PGNAA), Presentation, Hyunha Shim, 2012.
- [13] Experimental research on detecting explosives by pulsed fast thermal neutron analysis, Liu, W 2015, Journal of Neutron Research, vol. 18, no. 1, 29-34p.
- [14] Application of Neutron-Gamma Analysis for Determining Compost C/N Ratio, Galina Yakubova, Aleksandr Kavetskiy, Stephen A. Prior National Soil Dynamics Laboratory, U.S. Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Auburn, Alabama & H. Allen Torbert, Pages 146-160 | Received 25 May 2018, Accepted 05 Jun 2019.

- [15] Concept design of an illicit material detection system, Ali M. Al-Bahi, Y. A. Soliman, H. M. Hassan, *J Radioanal Nucl Chem* (2014) 299:351–356 DOI 10.1007/s10967-013-2723-4.
- [16] Afolabi, A 2013 Implementation of Electronic Nose Technique In Explosives Detection, *The International Journal Of Engineering And Science*, IJES 2319 – 1805, pages 10-17.
- [17] Majawa L, 2014-Neutron activation analysis of platinum converter and furnace mattes using a D-T sealed tube neutron generator. University of Cape Town, Cape, 137p.
- [18] aqvi AA, Al-Matouq FA, Khiari FZ, Isab AA, Raashid M, Khateeb-ur-Rehman (2013) Hydrogen, carbon and oxygen determination in proxy material samples using a LaBr 3: Ce detector. *Appl Radiat Isot* 78:145–150.
- [19] Neutron Backscattering Technique for the Detection of Buried Organic Objects, Cruz H, 2009, Angel Humberto Cruz Silva, University of Nacional, Colombia, 74p.
- [20] Idaho Explosives Detection System: Development and Enhancements Edward L. Reber & Larry G. Blackwood & Andrew J. Edwards & Ann E. Egger & Paul J. Petersen, Idaho National Laboratory, ID 83415-2114, USA (2006).
- [21] Building and Employment of a GUI for a Stochastic Simulation and Optimization Tool Used to Study Cargo Inspection Protocols, STUDENT SUMMER INTERNSHIP TECHNICAL REPORT For June 2, 2008 to August 8.
- [22] A MCNP code as a tool for modelling and simulation of gamma-ray tomography, Computer Engineering Department Technical University of Lodz 18/22 Stefanowskiego, 90-924 Lodz, Poland (2009).
- [23] Simulation of non-destructive detection of explosives by Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA) Heavy Ion Meeting 2012, 22th February.
- [24] Alfonso K, Marshal E, King M, Strellis D, Gozani T (2013). MCNP simulation benchmarks for a portable inspection system for narcotics, explosives, and nuclear material detection. *IEEE T Nucl Sci* 60(2):520–527.
- [25] J Budapest, Hungary. A review of conventional explosives detection using active neutron Interrogation, *Radioanal Nucl Chem* (2014) 301:629–639. DOI 10.1007/s10967-014-3260-5.
- [26] “Monte Carlo simulation of explosive detection system based on a Deuterium Deuterium (D–D) neutron generator,” *Applied Radiation and Isotopes*, 2014.
- [27] NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES 26, 010501 (2015). GEANT4 simulation of the characteristic gamma-ray spectrum of TNT under soil induced by DT Neutrons; DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.010501
- [28] Kiev Institute for Nuclear Research, Kiev, Ukraine, A.Sh. Georgadze. MONTE CARLO SIMULATION OF ACTIVE NEUTRON INTERROGATION SYSTEM DEVELOPED FOR DETECTION OF ILLICIT MATERIALS. Poland, June 3–11, 2017.
- weakness [29] Bahi, M (2018) Detection of illicit material using neutron activation: and solutions, *Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry*, 315, 8p.

Syrian Arab Republic
AlBaath University
Faculty of Mec & elec Eng
Dep of electronic and communication engineering



**Development of explosive detection technique using pulsed fast and
thermal neutron analysis technology (PFTNA)**

**A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the of Master's
Degree in electronic and communication engineering**

Prepared By

Eng. Thawra Haider Alyusef

Supervised By

Dr. Majdeddin Ali

1441 A.H – 2019 A.D

