



Analytical Detection of Gasoline and Kerosene Residues in Arson Fire Scenes Using Gas Chromatography Techniques (GC-FID)

Aboubakr Husyan Mohammed Altalib ^{1*}, Khadija R Abdosalam Dhkila ²

^{1,2} Department of Chemistry, Faculty of Education- El Ajelat, University of Zawia,
El Ajelat, Libya

الكشف التحليلي عن بقايا الغازولين والكيروسين في مواقع الحرائق المتعمدة باستخدام تقنيات كروماتوغرافيا الغاز GC-FID

أ. ابوبكر حسين محمد الطالب ^{1*}، أ. خديجة رمضان عبد السلام دخيلة ²
^{2,1} قسم الكيمياء، كلية التربية - العجيلات، جامعة الزاوية، العجيلات، ليبيا

*Corresponding author: abubakertaleb@gmail.com

Received: November 13, 2025

Accepted: January 20, 2026

Published: February 02, 2026

Abstract:

Background and Objective: Arson investigation is a complex field in forensics due to the extensive destruction that often leads to the loss of direct evidence related to accelerants. Given the widespread availability of flammable liquids, particularly gasoline and kerosene, this study aimed to develop and evaluate a reliable analytical protocol for detecting residues of these liquids in fire debris. The goal is to enhance the evidentiary capacity of forensic laboratories in identifying fire causes.

Methodology: An experimental methodology was employed by preparing simulated combustion models on various substrates, including cotton fabric, wool fabric, cardboard, office wood, and automotive interior wood panels. Residual hydrocarbons were extracted using diethyl ether as a solvent, followed by concentration via slow evaporation. The extracts were subsequently analyzed using Gas Chromatography equipped with a Flame Ionization Detector (GC-FID). A systematic comparison was conducted between the chromatographic fingerprints of the burnt samples and the standard profiles of gasoline and kerosene, based on retention times (t_R) and the distribution patterns of aliphatic and aromatic compounds.

Results: The results revealed distinct chromatographic peaks corresponding to gasoline residues across different samples, with retention times recorded between 5.274 and 14.657 minutes depending on the substrate. For kerosene, clear peaks were identified at retention times ranging from 11.509 to 16.366 minutes. A high degree of correlation was observed between the retention times of the burnt samples and the standard reference samples, with minor variations attributed to the substrate's nature and thermal decomposition (pyrolysis) products.

Conclusion: This study confirms that the integration of solvent extraction and GC-FID analysis provides an effective and sensitive method for detecting ignitable liquid residues (ILRs) in fire debris. The proposed protocol serves as a reliable forensic tool that supports investigative accuracy and strengthens the evidentiary value of analytical results in legal proceedings.

Keywords: Forensic Investigation, Arson, GC-FID, Gasoline, Kerosene, Fire Debris, Retention Time, Ignitable Liquid Residues (ILRs).

المخلص

المقدمة والهدف: تُعد الحرائق المتعمدة من التحديات الجسيمة في التحقيقات الجنائية نظراً لتدمير الأدلة المباشرة. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير وتقييم بروتوكول تحليلي موثوق للكشف عن بقايا السوائل القابلة للاشتعال (الغازولين والكيروسين) في مخلفات الحرائق، وذلك لتعزيز القدرة الاستدلالية للمختبرات الجنائية في تحديد مسببات الحريق.

المنهجية: اعتمدت الدراسة على منهجية تجريبية تضمنت تحضير نماذج احتراق مُحاكاة لركائز متنوعة (قماش قطني، صوفي، ورق مقوى، خشب مكتبي، ولوح خشبي ليدكور السيارات). تم استخلاص الهيدروكربونات المتبقية باستخدام مذيب

"ثنائي إيثر الإيثيل"، ثم تركيز المستخلصات بالتبخير البطيء، وصولاً إلى التحليل باستخدام تقنية كروماتوغرافيا الغاز المزودة بكاشف التأين باللهب (GC-FID). أجريت مقارنة منهجية للبصمات الكروماتوغرافية للعينات المحترقة مع البصمات القياسية بناءً على أزمنة الاحتفاظ (tR) وأنماط توزيع المركبات.

النتائج: أظهرت النتائج تسجيل قمم كروماتوغرافية مميزة لبقايا الغازولين في جميع الركائز بأزمنة احتفاظ تراوحت ما بين (5.274 إلى 14.657) دقيقة، مع تسجيل قيم دقيقة لكل ركيزة على حدة. وبالنسبة للكبروسين، سُجلت قمم واضحة في نطاق زمن احتفاظ أطول تراوح بين (11.509 إلى 16.366) دقيقة. أثبتت النتائج وجود تطابق ملحوظ بين أزمنة الاحتفاظ في العينات المحترقة والعينات القياسية، مع رصد اختلافات طفيفة عُزيت إلى طبيعة الركيزة ونواتج التحلل الحراري (Pyrolysis).

الاستنتاج: تؤكد الدراسة أن الدمج بين الاستخلاص بالمذيب والتحليل بتقنية GC-FID يوفر وسيلة فعالة وحساسة للكشف عن السوائل المسرّعة للاشتعال. يمثل البروتوكول المقترح أداة جنائية موثوقة تدعم دقة التحقيقات وتعزز القيمة الإثباتية للنتائج التحليلية أمام الجهات القضائية.

الكلمات المفتاحية: التحقيق الجنائي، الحرائق المتعمدة، GC-FID، الغازولين، الكبروسين، مخلفات الحريق، أزمنة الاحتفاظ.

المقدمة:

تُعَد الحرائق المتعمدة من أكثر الجرائم تعقيداً في مجالات التحقيق الجنائي، إذ يسعى الجاني عادةً إلى إخفاء معالم الجريمة من خلال تدمير الأدلة بفعل النار. ومن أبرز الوسائل المستخدمة في إضرام مثل هذه الحرائق هي المواد المسرّعة للاشتعال مثل الغازولين (Gasoline) والكبروسين (Kerosene)، نظراً لتوافرها وسهولة استخدامها وقدرتها العالية على نشر اللهب بسرعة.

تهدف هذه الدراسة إلى تنفيذ تجربة ميدانية-مخبرية تشمل إضرام حريق تجريبي في عينات تمثيلية (بروتوكول يشمل خشباً وقطع سجاد واقمشة) بمسرّعين مختلفين (الغازولين والكبروسين)، ثم استخراج بقايا المسرّع من المواد المحترقة باستخدام مذيب مناسب، ومن ثم تحليل العينات المستخلصة عبر جهاز GC-FID للحصول على مخططات كروماتوغرافية. تُقارن هذه المخططات مع مخططات معيارية للغازولين والكبروسين لتحديد وجود المادة المسرّعة، وبيان مدى تطابق النمط المأخوذ مع الأنماط المعيارية بدقة.

تكمن الأهمية العملية لهذه الدراسة في تقديم دليل تجريبي مباشر لخبراء الأدلة الجنائية، ينتقل من موقع الحريق إلى المختبر وصولاً إلى المخطط التحليلي، مما يعزز موثوقية نتائج التحليل ويدعمها بتجربة تحكم ميدانية. أما الأهمية العلمية فتظهر في تطوير فهم أفضل لسلوك المسرّعات البترولية بعد الاستخدام في الحريق من تغيرها الكيميائي إلى مدى قدرتها على الكشف والتحليل بعد الاحتراق وإمكانية استخدام GC-FID كأداة تحليلية فعالة ضمن السياق الجنائي.

باستخدام هذا المنهج، تسعى الدراسة إلى إتاحة بيانات قابلة للتطبيق في التحقيقات الجنائية، مع إيضاح محدّدات جمع العينات، المحافظة عليها، واختيار المذيب المناسب للاستخلاص، فضلاً عن معايير مطابقة المخططات المعيارية. من خلال ذلك، يمكن للخبراء تقديم استنتاجات مدعومة بتحليل مخبري مقارنة عند تقديمها أمام جهات التحقيق أو المحكمة.

مشكلة الدراسة

تواجه جهات التحقيق في حرائق المساكن والمنشآت صعوبة ملحوظة في تحديد الأسباب الفعلية لنشوب الحريق، خصوصاً في الحالات التي يُحتمل فيها استخدام سوائل مسرّعة للاشتعال مثل البنزين والكبروسين. ويعود ذلك غالباً إلى تلف الأدلة أثناء الحريق، وفقدان المركبات المتطايرة، أو عدم اتباع إجراءات علمية دقيقة في جمع العينات وتحليلها. وتؤدي هذه التحديات إلى غياب الأدلة القاطعة التي يمكن الاعتماد عليها لإثبات وجود فعل جنائي، مما يسمح بتمادي الفاعل ويحد من قدرة السلطات على اتخاذ الإجراءات المناسبة. ومن هذا المنطلق، تبرز الحاجة لإجراء دراسة تجريبية تُقيّم فعالية التقنيات التحليلية الحديثة في الكشف عن بقايا السوائل المشتعلة في مخلفات الحرائق.

أهمية الدراسة

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من عدة جوانب:

- الأهمية الجنائية: تقدم بيانات علمية موثوقة تساعد في تمييز الحرائق المتعمدة عن الحرائق العرضية، مما يدعم التحقيقات القضائية وتقديم الأدلة المحكمة أمام المحاكم.
- أهمية علمية: تعزز فهم سلوك المركبات البترولية بعد الاحتراق وفعاليتها الكشف عنها باستخدام GC-FID.
- أهمية تطبيقية: تحسين دقة التحاليل المخبرية واختصار الزمن اللازم للفحص.
- الأهمية البيئية والأمنية: تمكّن السلطات من الحد من جرائم الحرق العمد وحماية الممتلكات والأرواح، من خلال الكشف المبكر والدقيق عن المسرّعات البترولية.
- الأهمية القانونية: تقديم نتائج تحليلية قابلة للتحقق والتكرار كدليل في التحقيقات الجنائية.

أهداف الدراسة

- الكشف والتحليل عن بقايا المسرّعات البترولية (الغازولين والكيروسين) في عينات الحرائق المتعمّدة باستخدام تقنيات تحليلية دقيقة مثل GC-FID
- تمييز البصمة الكيميائية للمركبات الناتجة عن احتراق الغازولين والكيروسين للمساعدة في تحديد نوع المسرّع المستخدم في موقع الحريق.
- تقييم فعالية طرق جمع وحفظ العينات من مواقع الحرائق المشبوهة لضمان عدم تلوث الأدلة أو فقد المركبات المتطايرة.
- تحليل تأثير ظروف الاحتراق (درجة الحرارة، نوع المادة المحترقة، مدة الحريق) على بقاء أو تحلل المركبات البترولية في الأدلة.
- تطوير بروتوكول عملي يمكن لفرق التحقيق والأدلة الجنائية الاعتماد عليه للكشف عن المسرّعات البترولية وتفسير نتائجها بشكل موثوق أمام الجهات القضائية..
- دعم عملية التحقيق الجنائي بتقديم بيانات علمية موضوعية تساعد في التفريق بين الحرائق العرضية والمتعمدة.

حدود الدراسة

- تقتصر الدراسة على تحليل الغازولين والكيروسين كمسرّعات رئيسية للاختبار التجريبي.
- المواد الخاضعة للاختبار تشمل الخشب وقطع السجاد واقمشة فقط، ولا تشمل مواد أخرى قابلة للاشتعال.
- التحليل مقتصر على استخلاص المخلفات باستخدام مذيب مناسب، وتحليلها عبر GC-FID فقط.
- ظروف الاحتراق محدودة بالتجارب المخبرية ولا تشمل الحرائق الواقعية في مواقع عامة.

منهج الدراسة

منهج تجريبي تحليلي (Experimental–Analytical Approach)، يجمع بين التجارب المخبرية والدراسة التطبيقية لعينات من مواقع حرائق محاكاة.

تصنيف السوائل المشتعلة (Classification of Ignitable Liquids)

تعتمد الدراسات الجنائية المتعلقة بالحرائق نظام تصنيف موحد للسوائل المشتعلة وفقاً للمواصفات القياسية الصادرة عن الجمعية الأمريكية للفحوصات والمواد (ASTM). تم تطوير هذا النظام تحت إشراف لجنة العلوم الجنائية (Committee E30 on Forensic Sciences)، وتحديدًا اللجنة الفرعية المعنية بمواد الجريمة. تستند المعايير الأساسية في هذا التصنيف إلى المواصفتين ASTM E1387 و ASTM E1618 [1،2] يعتمد النظام على تقسيم السوائل المشتعلة إلى أصناف رئيسية بناءً على التركيب الكيميائي ونطاق تقطير الألكانات (عدد ذرات الكربون)، كما هو موضح في الجدول (1)

الجدول (1): تصنيف ASTM للسوائل المشتعلة بناءً على نطاق ذرات الكربون والأمثلة التجارية. [3]

| الاصنف | اسم الصنف | "امتداد Peak" (يعتمد علي عدد كربون الالكان) | الأمثلة |
|--------|-----------------------------------|---|--|
| 1 | المقطرات البترولية الخفيفة (LPD) | C4-C11 | إيثرات البتروليوم ، وقود مشعل الجيب بعض مذيّبات مطاط الصق، P، VM نافثا |
| 2 | الغازولين | C4-C12 | كل أصناف الغازولين ذاتي الدفع متضمنة Gasohol |
| 3 | المقطرات البترولية المتوسطة (MPD) | C8-C12 | الكحولات المعدنية ، بعض مخففات الطلاء بعض فحم التشغيل ، بعض وقود المشاعل بعض المذيّبات للمبيدات الحشرية، بعض زيوت المصاييح |
| 4 | الكيروسين | C8-C17 | زيت الوقود رقم 1، وقود الطيران، بخات الحشرات ، بعض فحم التشغيل ، بعض مخففات الطلاء ، بعض المذيّبات للمبيدات الحشرية ، بعض زيوت المصاييح |
| 5 | المقطرات البترولية الثقيلة (HPD) | C9-C23 | زيت الوقود رقم 2 ، وقود الديزل |

يركز البحث الحالي بشكل محدد على الصنفين الثاني (الغازولين) والرابع (الكيروسين)، نظراً لشيوع استخدامهما في حوادث الحريق العمدي ولارتباطهما الوثيق بفرضيات الدراسة. [4]

ظاهرة التغير والتحول *Mutability of Ignitable Liquids*

تتميز السوائل المشتعلة بتركيب معقد يضم عشرات إلى مئات المركبات الكيميائية. ومع ذلك، فإن هذا التركيب يتسم بعدم الاستقرار الزمني، لا سيما عند التعرض للظروف البيئية أو الحرارية المصاحبة للحريق. تخضع هذه السوائل لتغيرات فيزيائية وكيميائية ناتجة عن عدة عوامل، أبرزها: التبخر التفاضلي، واختلاف كفاءة الاستخلاص، وعمليات الامتزاج. يعد الغازولين والكيروسين من الأمثلة النموذجية لتأثر التركيب الكيميائي بظروف "التجوية" (Weathering) يحتوي الغازولين على خليط من الألكانات، المركبات الأروماتية، والنفثالينات، وتتراوح درجات غليان مكوناته ما بين 30 C إلى أكثر من 200 C. وعند تعرض الغازولين للتبخّر أو التجوية، تتلاشى المكونات منخفضة درجة الغليان الخفيفة بمعدل أسرع من المكونات الثقيلة مرتفعة درجة الغليان، مما يؤدي إلى تغيير نسب المركبات في العينة. وتُعرف هذه الظاهرة باسم التبخر التفاضلي. (Differential Evaporation)

وينتج عن هذه العملية تحوير في التركيب الكيميائي للغازولين؛ وقد يكون هذا التحوير كميًا (تغير في نسب المركبات) أو كيميائيًا (اختفاء بعض المركبات عند تجوية شديدة). وتنعكس هذه التغيرات بشكل واضح على المخططات الكروماتوغرافية GC [7,6,5]

دراسات سابقة: (Literature Review)

تناولت العديد من الدراسات طرق الكشف عن السوائل المشتعلة وبما فيها الكشف عن بقايا الغازولين والكيروسين في مواقع الحرائق المتعمدة باستخدام تقنية كروماتوغرافيا الغاز GC-FID و GC-MS. طوّرت إحدى الدراسات منهجية دقيقة لاستخلاص وتحليل بقايا الكيروسين من أقمشة قطنية متقحمة، وأظهرت النتائج أن زمن الحريق وطبيعة النسيج يؤثران بوضوح على كمية المتبقي من المركبات، مما يعزز أهمية سرعة جمع العينات ودقة منهجية الاستخلاص. [8] كما درس Lim وآخرون تأثير الزمن بعد الحريق على استرجاع آثار الغازولين من السجاد المحترق باستخدام الاستخلاص بالمذيب وتحليل GC-FID، ووجدوا أن المركبات الخفيفة تتبخر بسرعة خلال الدقائق الأولى، في حين تستمر المركبات الثقيلة لفترة أطول، مما يؤكد أهمية التوثيق الزمني في تحليل المخلفات. [9] وفي دراسة تصنيفية متقدمة، تم استخدام تقنية Passive Headspace لفصل وتحديد مكونات الكيروسين والديزل بعد تعرضهما لعوامل الطقس، وأظهر تحليل GC-FID قدرة واضحة على التمييز بينهما حتى بعد حدوث التآكل الكيميائي. [10] كما تناولت دراسات متخصصة الكشف عن بقايا السوائل القابلة للاشتعال من مخلفات حرائق حقيقية عبر GC-FID، مؤكدة ضرورة الالتزام بمعايير أخذ العينات وطرق التحضير المخبرية لضمان موثوقية النتائج. [11] وفي دراسة تجريبية موسعة، أحرقت مواد مختلفة مثل الأخشاب والأقمشة بعد إضافة الغازولين والكيروسين، ثم جرى تحليل المخلفات باستخدام GC-FID، وأكدت النتائج أن بصمة الوقود تظل قابلة للتمييز حتى بعد الاحتراق الجزئي. [12] وقدم Bumrah وآخرون مراجعة تحليلية أوضحوا فيها الاستفادة من GC-FID في الكشف الكمي عن الهيدروكربونات وبقايا الوقود، مع الإشارة إلى تحديات امتصاص بعض المركبات عند استخدام الفحم المنشط. [13] وعرضت دراسة أخرى منهجيات تفسير بيانات GC-FID في تحليل مخلفات الحريق، مبينة أن الدمج بين النمط النوعي للفحم والبيانات الكمية يحسّن بشكل كبير قدرة التمييز بين أنواع السوائل المشتعلة. [14] كما استخدمت دراسات حديثة أساليب التحليل الكيميائي الإحصائي Chemometrics مع بيانات GC-FID لتمييز الغازولين والكيروسين حتى بعد تعرض العينات للطقس أو الاحتراق الشديد، مؤكدة أن البصمة الكروماتوغرافية تعمل كمؤشر ثابت نسبياً. [15] وفي دراسة مخبرية حديثة أخرى، تم تحليل بقايا عدة سوائل قابلة للاشتعال ومنها الكيروسين بعد تعرضها لظروف احتراق مختلفة، وأظهر تحليل GC-FID قدرة على التمييز بين مصادر الوقود اعتماداً على توزيع المركبات الهيدروكربونية. [16] وأكدت دراسات تطبيقية في مختبرات الحرائق أن استخدام شرائط الفحم المنشط قبل التحليل بـ GC-FID يُعد من أكثر الأساليب الاعتمادية لتحضير العينات، شريطة ضبط زمن التعريض وعدد الشرائط للحصول على نتائج دقيقة. [17]. ركزت دراسات على مقارنة فعالية الاستخلاص بالمذيب وتقنيات الاستخلاص غير التدميرية مثل SPME وHeadspace، حيث بينت هذه الدراسات أن الطرق غير التدميرية أكثر حساسية للمركبات المتطايرة وأن أنماط الكروماتوغرافيا تتأثر بعامل الزمن والظروف الجوية المحيطة بالحريق. [18] كما شملت دراسات أخرى تطبيقات محاكاة على مواد مثل السجاد والأقمشة قارنت بين طرق الاستخلاص المختلفة، ووجدت أن الاستخلاص بالمذيب يمنح مستخلصاً واسع الطيف لكنه قد يؤدي إلى فقدان المركبات الخفيفة، في حين يوفر GC-FID قياساً كمياً جيداً و GC-MS تعريفاً نوعياً دقيقاً للمكونات المسترجعة. [19] وأظهرت دراسات أجريت على عينات قطنية أن نوع النسيج والزمن بعد الحريق يؤثران مباشرة على كمية الكيروسين المسترجعة باستخدام الاستخلاص بالمذيب وتحليل GC-FID. [20] كذلك تمت مقارنة تقنية HS-SPME بطرق الاستخلاص التقليدية وأثبتت أنها الأكثر حساسية للمركبات شديدة التطاير، بينما يتميز الاستخلاص بالمذيب بالقدرة على استرجاع المكونات الثقيلة، في حين يظل GC-MS الأفضل للتحقق النوعي. [21] كما تناولت دراسات مراجعة نقدية طرق الاستخلاص بالمذيب وبيّنت أنها تعطي مقتطفات واسعة لكنها قد تحتوي على نواتج احتراق تتداخل مع المركبات الهدف. [22] وأظهرت الدراسات الزمنية أن المركبات المتطايرة تختفي خلال دقائق أو ساعات من الحريق، وأن التأخر في جمع

العينات يؤدي إلى فقدان المؤشرات الأولى للمسّرات، مما يتطلب توثيقاً زمنياً دقيقاً واستخدام أكثر من تقنية استخلاص [23]. وشملت دراسات شاملة مقارنة بين الاستخلاص بالمذيب وتقنيات GC-FID و GC-MS، مؤكدة أن الاستخلاص بالمذيب مناسب للفحص الأولي، بينما يوفر GC-MS قوة أكبر في التعرف النوعي خصوصاً عند وجود تداخلات مع نواتج الاحتراق. [24] كما بينت دراسات تطبيقية على عينات السجاد المتفحمة أن الزمن والطقس يؤثران على استرجاع البنزين، حيث لوحظ فقدان كبير للمركبات المتطايرة خلال الساعات الأولى. [25] وأظهرت دراسات معيارية أن إجراءات الكشف الحديثة تعتمد على تقنيات GC-MS كمرجع أساسي للتأكد النوعي، وأن الطرق التقليدية مثل ASTM E1387 المبنية على GC-FID لم تعد كافية وحدها. [26] وقدمت مراجعات علمية مقارنة بين عدة تقنيات تحضير العينات مثل التقطير بالبخار و Headspace و SPME والاستخلاص بالمذيب، مع تقييم لأداء GC-FID و GC-MS و GC×GC، وأشارت إلى الدور المتقدم للفصل ثنائي البعد في العينات المعقدة. [27] كما أثبتت تطبيقات HS-SPME فعاليتها العالية في استخلاص بقايا الغازولين والديزل من الأقمشة مع الحفاظ على النمط الطيفي للمركبات المتطايرة دون تغييره. [28] وأظهرت تقنيات GC×GC أو GC×GC-FID قدرتها على فصل مئات المركبات الناتجة من التحلل الحراري بشكل أفضل من GC-MS التقليدي. [29] كما بينت مقارنات أن GC-FID مفيد لعرض النمط الكروماتوغرافي والقياسات النسبية، بينما يتطلب التعرف النوعي الدقيق استخدام GC-MS أو تقنيات متقدمة مثل MS/MS أو GC×GC-TOFMS [30]. وناقشت دراسات تحليلية تأثير التحلل الحراري الذي يؤدي إلى ظهور مركبات تتداخل مع إشارات المسّرات، مما يستلزم استخدام قواعد بيانات واسعة وتقنيات فصل عالية الدقة للتغلب على هذا التداخل. [31] وخلصت مقارنات بين التقطير بالبخار والاستخلاص بالمذيب و Passive Headspace إلى أن كل تقنية مناسبة لفئة معينة من المركبات حسب تطايرها وتركيزها. [32] وأخيراً، طبقت دراسات حديثة تقنيات GC-FID مع أساليب التحليل النمطي (Chemometrics) لتصنيف أنواع الوقود وتمييزها حتى بعد تعرضها للحرق أو الظروف الجوية، مما يعزز دور GC-FID عند دمجها مع الإحصاء المتقدم. [33]

المواد والطرق materials and methods

الآلية والأجهزة المستخدمة (Instrumentation and Apparatus)

استخدم في هذا البحث جهاز كروماتوغرافيا الغاز المزود بكاشف التأين اللهب (GC-FID)، من نوع Shimadzu GC-2014 الياباني الصنع. تم تشغيل الجهاز بنظام حقن مباشر غير مجزأ (Splitless Injection System)، متصلاً بعمود شعري غير قطبي مرتبط بكاشف FID جميع عمليات تشغيل الجهاز وضبط المتغيرات وتشغيل طرق التحليل تمت عبر برنامج تحكم مخصص مثبت على الحاسوب المتصل بالجهاز. اعتمدت الدراسة على مجموعة من الظروف التشغيلية الثابتة، الموضحة في الجدول (2)

| الحقن Injection | النوع طريقة الحقن الحجم المحقون | سائل / يدوي بدون تجزئة (Split less) μL 1 |
|-----------------------------|---|---|
| الغاز الناقل Carrier Gas | النوع التدفق الكلي الضغط في العمود | الهليوم ml/min 22.5 kpa 0.93 |
| العمود Column | النوع رقم التسلسل الأبعاد | TRP-5 M2064265 30 m × 0.32 mm × 0.50 μm |
| درجة الحرارة Temperature | الحاقن بداية العمود معدل الارتفاع النهاية زمن التشغيل الكلي درجة الحرارة | C 275 C 60.0 لمدة 6 دقائق 20 C /min C 280 لمدة 15 دقيقة 32 دقيقة C 285 |
| الكاشف FID | | |

المواد والكيميائيات المستخدمة (Materials and Chemicals)

أولاً: المواد المسرّعة للاحتراق (Accelerants)

تم استخدام الغازولين والكبروسين كمسّرات اشتعال رئيسية. جرى الحصول على العينات من محطة وقود محلية تابعة لمصفاة الزاوية لتكرير النفط، وتم استخدامها لدراسة بقايا هذه السوائل في مخلفات المواد بعد احتراقها.

ثانياً: المواد قيد الدراسة (Materials Studied)

شملت العينات المحترقة مجموعة من المواد الشائعة في مواقع الحرائق: قماش قطني - قماش صوفي - ورق مقوى - خشب مكتبي - لوح داخلي لصالون سيارة. تم لاحقاً تحليل أثر الاحتراق عليها في وجود المسرعات المذكورة.

ثالثاً: المذيب المستخدم (Solvent)

استُخدم ثنائي إيثيل الإيثر (Diethyl ether) كمذيب استخلاص، نظراً لقدرته العالية على استخلاص المركبات المتطايرة (ILR) من مخلفات الحريق، إضافة إلى امتلاكه نقاوة مناسبة للتطبيقات التحليلية.

تحضير العينات (Sample Preparation)

يعد تحضير العينات خطوة أساسية في الكشف عن المقادير الضئيلة من متبقيات السوائل المساعدة على الاشتعال في مخلفات الحرائق. وتهدف هذه العملية إلى فصل المركبات المتطايرة عن المادة الأساسية (Matrix) دون إحداث تغيير في تركيبها، لضمان الحصول على مخططات كروماتوغرافية واضحة وقابلة للتفسير.

خطوات تحضير العينات Sample Preparation Procedures

بدأ إعداد العينات بتقطيع المواد المختارة—وهي القطن والصوف والورق المقوى واللوح الداخلي لصالون السيارة إلى مقاطع تتراوح أبعادها بين 20×30 سم و 50×75 سم، وذلك بما يتناسب مع سمك المادة وخواصها الفيزيائية لضمان تجانس ظروف الاحتراق. عقب ذلك، رُسِّت كل قطعة بنحو 50 مل من الغازولين ثم أُضرمت فيها النار إلى أن وصلت إلى مرحلة التقخم الكامل. ولضمان الحفاظ على المركبات المتطايرة ومنع التلوث الخارجي، جُمعت العينات مباشرة بعد الاحتراق في أكياس بلاستيكية محكمة الإغلاق وموسومة بدقة.

ولاستخلاص المتطايرات الناتجة عن الاحتراق، وُضعت العينات في قمع فصل وأضيف إليها 100–150 مل من ثنائي إيثيل الإيثر بوصفه مذيباً عضوياً مناسباً لاستخلاص المركبات الهيدروكربونية. رُج القمع لمدة خمس دقائق مع تهويته بشكل متقطع لتفريغ الضغط الداخلي ومنع فقدان المذيب. وبعد ذلك، رُشح المستخلص باستخدام ورق ترشيح مناسب وجمع الراشح في كأس زجاجي نظيف. أُجريت عملية تركيز المستخلص باستخدام تيار من النيتروجين الجاف لتقليل حجمه إلى نحو 2 مل مع الحفاظ على المركبات المتطايرة، ثم نُقلت العينات المركزة إلى أنابيب محكمة الإغلاق تمهيداً لتحليلها. وقد أُعيد تنفيذ الإجراءات نفسها على عينات حُرقت باستخدام الكيروسين للحصول على مجموعة موازية من العينات، بالإضافة إلى إعداد عينات تحكم خالية من أي مادة مساعدة على الاشتعال واستخلاصها بالطريقة نفسها، وذلك لاستخدامها مرجعاً أساسياً في عملية المقارنة.

وبذلك أصبحت جميع العينات سواء المحضرة بالغازولين أو المحضرة بالكيروسين أو عينات التحكم جاهزة للحقن في جهاز GC-FID.

تحليل العينات باستخدام GC-FID Sample Analysis Using

شُغل جهاز GC-FID وفق الإعدادات التشغيلية المعتمدة، وترك لمدة 30 دقيقة لضمان استقرار الكاشف والتخلص من أي آثار للرطوبة داخل النظام. بدأ التحليل بحقن عينة قياسية من الغازولين الأصلي بحجم 1 ميكرو لتر، حيث نُقلت العينة بواسطة الغاز الناقل (الهيليوم) عبر العمود الكروماتوغرافي ثم إلى كاشف اللهب، وسُجِّل الطيف الناتج لاعتماده مرجعاً قياسيًّا للمقارنات اللاحقة.

عقب ذلك، حُقنت العينات المستخلصة من المواد المحروقة بالغازولين بالحجم نفسه (1 ميكرو لتر)، وسُجِّلَت المخططات الكروماتوغرافية الناتجة وقورنت مباشرة بالطيف القياسي لتحديد مدى تطابق الأنماط الهيدروكربونية بين العينة القياسية والعينات المحروقة. وتم اتباع الإجراءات نفسها في تحليل الكيروسين، حيث أُنجز تسجيل الطيف القياسي والمخططات الخاصة بالعينات المحروقة به.

ولأغراض التفسير الدقيق، حُقنت عينات المواد المحروقة دون إضافة أي مادة مساعدة على الاشتعال، بهدف تحديد المركبات الناتجة طبيعياً عن احتراق المادة نفسها واعتمادها قاعدة مرجعية للتفرقة بين المركبات الطبيعية ومتبقيات المسرعات. وقد أُجريت المقارنة النهائية عبر تحليل العلاقات بين المخططات القياسية والمخططات الناتجة عن العينات المحروقة بالمسرّع، ومقارنتها في الوقت ذاته بالمخططات المسجلة لعينات التحكم. وقد أسهمت هذه المنهجية في التحديد الدقيق لوجود أو عدم وجود متبقيات المواد المسرعة للاشتعال، وقد جرى عرض النتائج ومناقشتها بصورة تفصيلية في فصل النتائج.

النتائج RESULTS

أوضحت التجارب التي أُجريت في هذا البحث، لكشف السائل المشتعل (الغازولين، الكيروسين) في عينات المواد الأساسية (matrix) التي تم حرقها بهذه الوقود وباستخدام GC-FID على وجود متبقيات للسائل المشتعل الذي استخدم في عملية الحرق وذلك بمقارنة عينة الغازولين والكيروسين القياسي مع عينات المواد الأساسية المحترقة بهذا الوقود وبدونه، وذلك حسب تطابق زمن احتباس المركبات المفصولة لهذه المواد خلال عمود GC.

كما سيتضح من النتائج المتحصل عليها لعينة الغازولين والكبروسين القياسية وعينات مخلفات المواد الأساسية (قماش قطني، قماش صوفي، ورق مقوى، خشب مكتبي، قطع خشبية لصالون سيارة) التي تم حرقها بهذا الوقود.

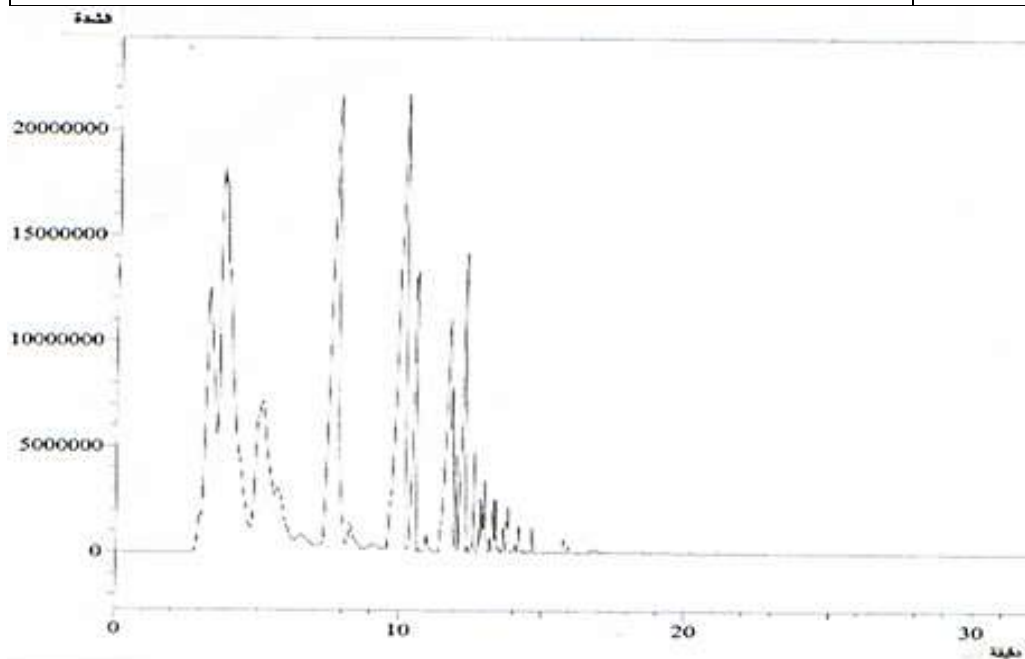
1. نتائج GC-FID المتحصل عليها لعينة الغازولين القياسية ومخلفات المواد الأساسية التي تم حرقها بهذا الوقود وبدونه.

1.1 الجدول والمخطط (1,3) يظهر نتائج GC-FID لعينة غاز ولين المستخدمة كعينة قياسية للمقارنة مع عينات مخلفات الحريق وزمن احتباسها خلال العمود ولإثبات وجود متبقيات الغازولين في العينات التي تم حرقها بهذا الوقود.

جدول (3) يمثل زمن احتباس بعض مركبات الغازولين القياسي (GC-FID)

| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|--|
| 12535502 | 256050625 | 3.261 | 1 | |
| 18205786 | 145007234 | 3.694 | 2 | |
| 176313 | 449587964 | 3.759 | 3 | |
| 7166722 | 13755950 | 5.276 | 4 | |
| 216440 | 390044099 | 7.489 | 5 | |
| 140453 | 22709501 | 8.277 | 6 | |
| 449153 | 10302586 | 9.078 | 7 | |
| 189073 | 210569 | 9.513 | 8 | |
| 176133 | 201682 | 9.754 | 9 | |
| 21749204 | 369035063 | 10.163 | 10 | |
| 28148 | 30687 | 10.241 | 11 | |
| 13051560 | 70023218 | 10.342 | 12 | |
| 13350146 | 38558062 | 10.811 | 13 | |
| 354815 | 11566 | 11.568 | 14 | |
| 11166720 | 127763180 | 11.747 | 15 | |
| 14221240 | 107407767 | 12.282 | 16 | |
| 4854374 | 21590545 | 12.634 | 17 | |
| 2553069 | 11109689 | 13.299 | 18 | |
| 1521971 | 4990887 | 13.768 | 19 | |
| 1285048 | 4437096 | 14.211 | 20 | |
| 1273206 | 587074 | 14.666 | 21 | |

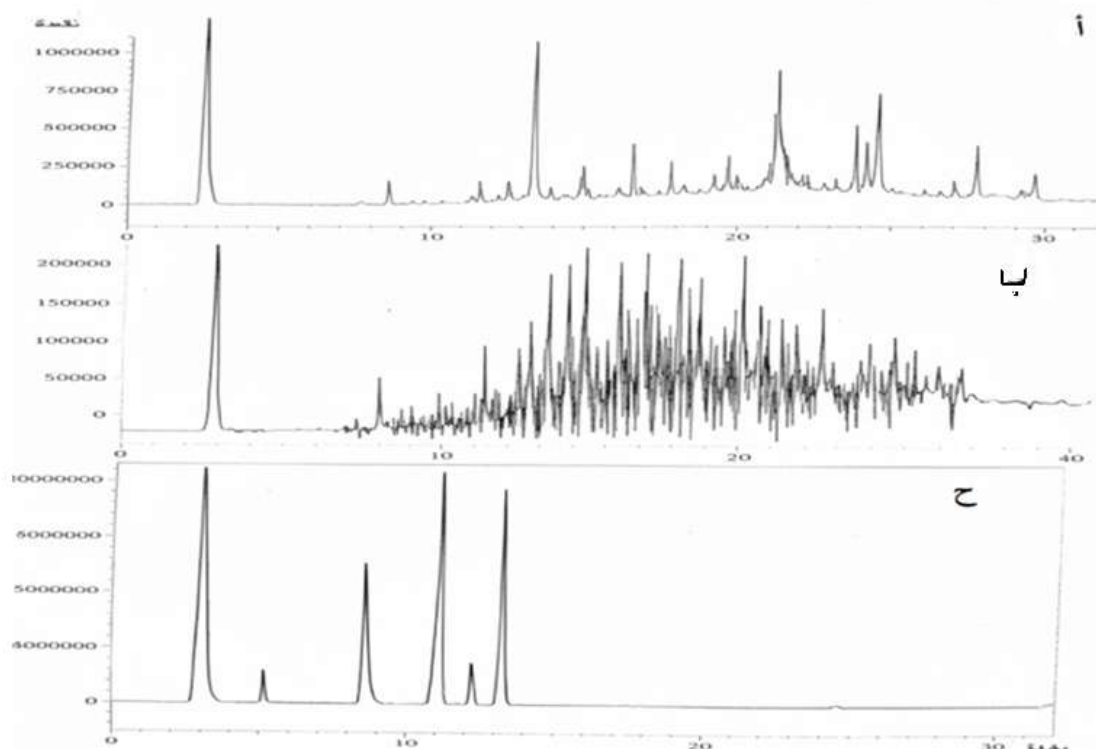
الغازولين
القياسي



الشكل (1) مخطط GC-FID لعينة الغازولين القياسية المستخدمة في الحريق

2.1 الجداول والمخططات (2،4) يظهر نتائج GC- FID لعينة الغاز ولين القياسية، عينة قماش قطني تم حرقها باستخدام الغازولين نفسه، ونفس العينة للقماش القطني تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود. الجدول (4) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|--|
| 381950 | 2378207 | 8.472 | 1 | أ قماش قطني |
| 141367 | 837128 | 12.092 | 2 | |
| 367595 | 1178217 | 15.682 | 3 | |
| 293976 | 1122807 | 15.838 | 4 | |
| 246232 | 1583710 | 17.798 | 5 | |
| 110263 | 1046548 | 18.798 | 6 | |
| 1077621 | 7055532 | 21.204 | 7 | |
| 461347 | 660396 | 27.134 | 8 | |
| 1173 | 6383 | 5.274 | 1 | ب اثر الغازولين في عينة قماش قطني |
| 4099 | 36992 | 7.469 | 2 | |
| 1931 | 6821 | 10.163 | 3 | |
| 5897 | 42091 | 10.342 | 4 | |
| 1818 | 13738 | 10.824 | 5 | |
| 7166722 | 137655950 | 5.276 | 1 | ج غازولين قياسي |
| 21646640 | 390044099 | 7.489 | 2 | |
| 21749204 | 369035063 | 10.163 | 3 | |
| 13051560 | 70023218 | 10.342 | 4 | |
| 13350146 | 38558062 | 10.811 | 5 | |

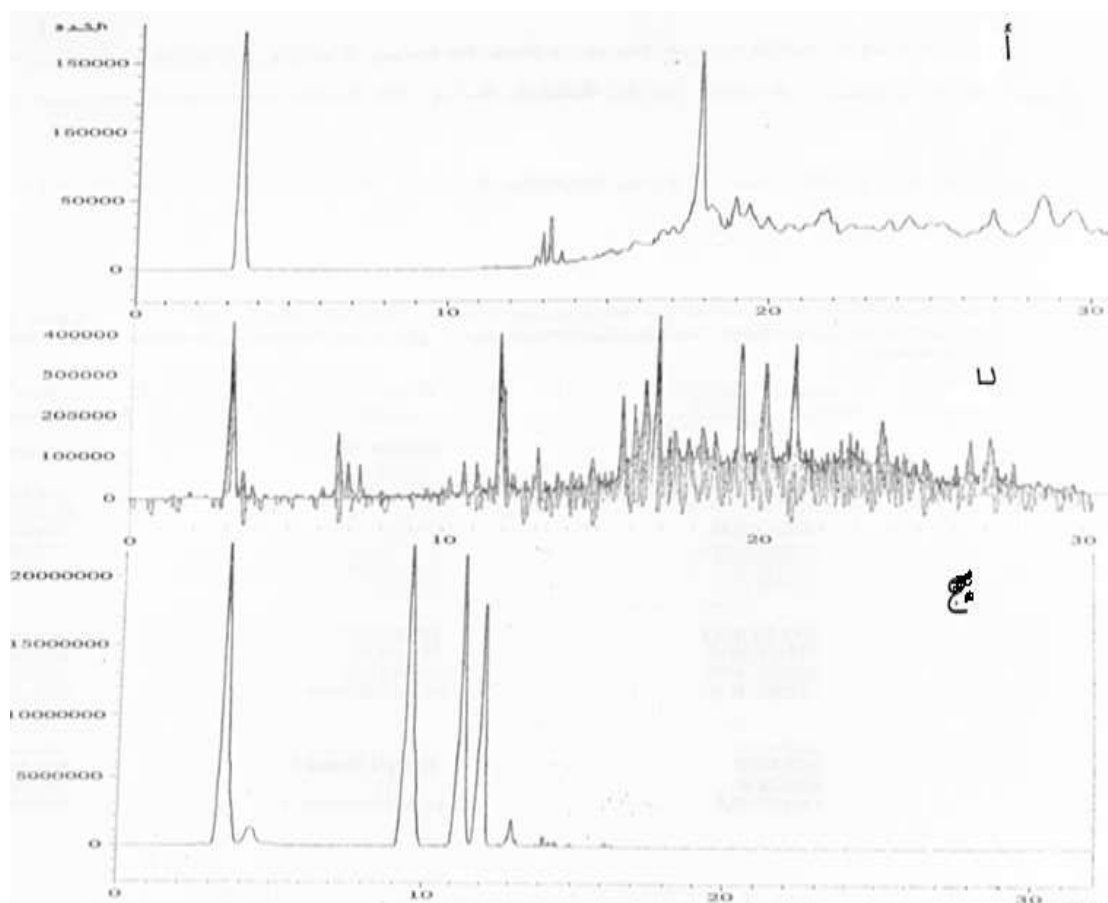


الشكل (2) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من قماش قطني. (ب) عينة من القماش القطني تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

3.1 الجداول والمخططات (3،5) يظهر نتائج GC- FID لعينة الغاز ولين القياسية، عينة قماش الصوفي تم حرقها باستخدام الغازولين نفسه، ونفس العينة للقماش الصوفي تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود.

الجدول (5) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | أ |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|---|
| 44771 | 174133 | 13.202 | 1 | قماش صوفي |
| 8543 | 29388 | 13.580 | 2 | |
| 9201 | 64919 | 15.834 | 3 | |
| 14989 | 101465 | 16.745 | 4 | |
| 20165 | 213673 | 17.452 | 5 | |
| 58068 | 267921 | 17.722 | 6 | |
| 152498 | 819788 | 17.833 | 7 | |
| 37007 | 514899 | 18.923 | 8 | |
| 8157 | 74412 | 7.437 | 1 | ب اثر الغازولين في عينة قماش صوفي |
| 90736 | 271604 | 8.372 | 2 | |
| 14147 | 65981 | 10.242 | 3 | |
| 10661 | 49543 | 10.338 | 4 | |
| 3393 | 18690 | 10.814 | 5 | |
| 21646640 | 390044099 | 7.489 | 1 | ج غازولين قياسي |
| 90736 | 271604 | 8.299 | 2 | |
| 28148 | 30687 | 10.245 | 3 | |
| 13051560 | 70023218 | 10.342 | 4 | |
| 13350146 | 38558062 | 10.811 | 5 | |

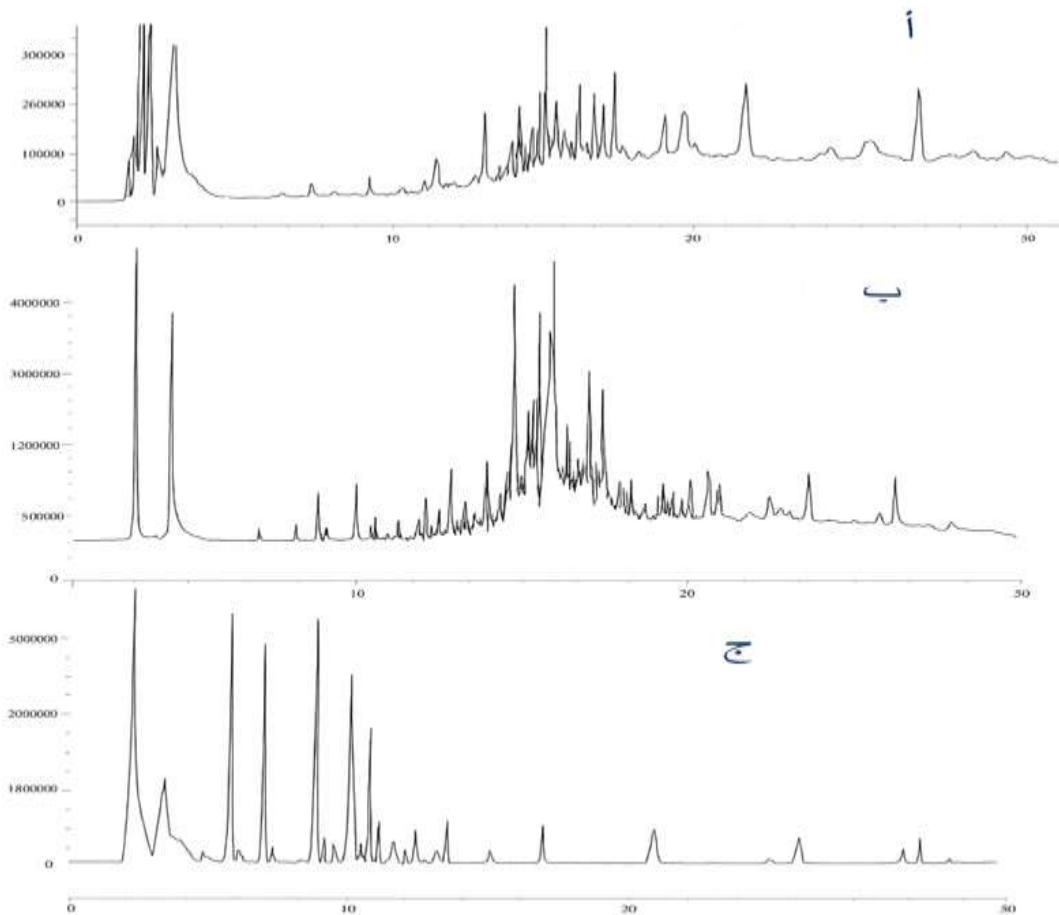


الشكل (3) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من قماش الصوفي. (ب) عينة من القماش الصوفي تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

4.1 الجداول والمخططات (4،6) يظهر نتائج GC- FID لعينة الغاز ولين القياسية، عينة ورق مقوى تم حرقها باستخدام الغازولين نفسه، ونفس العينة للورق المقوى تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود.

الجدول (6) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

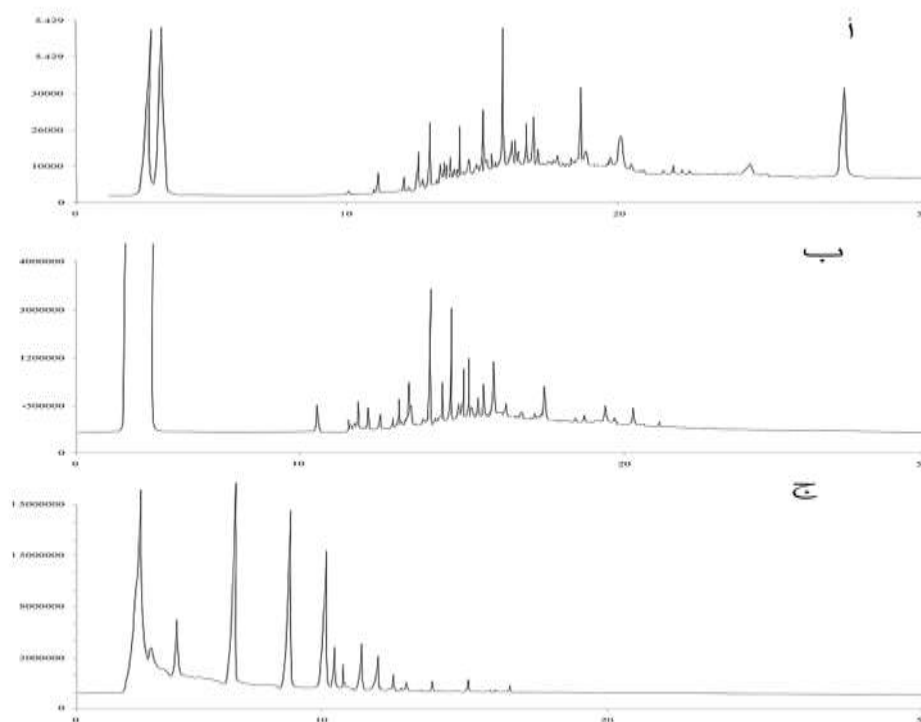
| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|---|
| 9263 | 33050 | 8.388 | 1 | أ ورق مقوى |
| 3842 | 30541 | 12.098 | 2 | |
| 14369 | 51926 | 13.448 | 3 | |
| 36829 | 113230 | 14.574 | 4 | |
| 58709 | 205207 | 15.555 | 5 | |
| 18968 | 180031 | 16.117 | 6 | |
| 42286 | 191855 | 16.444 | 7 | |
| 40474 | 244430 | 17.604 | 8 | |
| 17347 | 189354 | 7.411 | 1 | ب اثر الغازولين في عينة ورق مقوى |
| 3552 | 416856 | 9.075 | 2 | |
| 18384 | 311359 | 11.508 | 3 | |
| 258082 | 7210078 | 14.657 | 4 | |
| 21646640 | 390044099 | 7.489 | 1 | ج غازولين قياسي |
| 449153 | 10302586 | 9.078 | 2 | |
| 354815 | 11566 | 11.58 | 3 | |
| 1273202 | 5870774 | 14.666 | 4 | |



الشكل (4) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من الورق المقوى. (ب) عينة من الورق المقوى تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.
 5.1 الجداول والمخططات (5،7) يظهر نتائج GC- FID لعينة الغاز ولين القياسية، عينة خشب مكتبي تم حرقها باستخدام الغازولين نفسه، ونفس العينة للخشب مكتبي تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود.

الجدول (7) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|--|
| 216346 | 1006971 | 11.409 | 1 | أ خشب مكتبي |
| 216182 | 814794 | 13.643 | 2 | |
| 870603 | 2832925 | 15.688 | 3 | |
| 260028 | 1080403 | 18.657 | 4 | |
| 47961 | 3307288 | 20.546 | 5 | |
| 117550 | 1209292 | 20.804 | 6 | |
| 108510 | 1013733 | 21.1511 | 7 | |
| 564360 | 7869930 | 26.626 | 8 | |
| 1554 | 18066 | 5.276 | 1 | ب اثر الغازولين في عينة خشب مكتبي |
| 19929 | 223537 | 7.452 | 2 | |
| 44849 | 204772 | 9.559 | 3 | |
| 184849 | 894420 | 9.729 | 4 | |
| 7166722 | 137655950 | 5.276 | 1 | ج غازولين قياسي |
| 21646640 | 390044099 | 7.489 | 2 | |
| 189073 | 210569 | 9.513 | 3 | |
| 176133 | 201682 | 9.754 | 4 | |

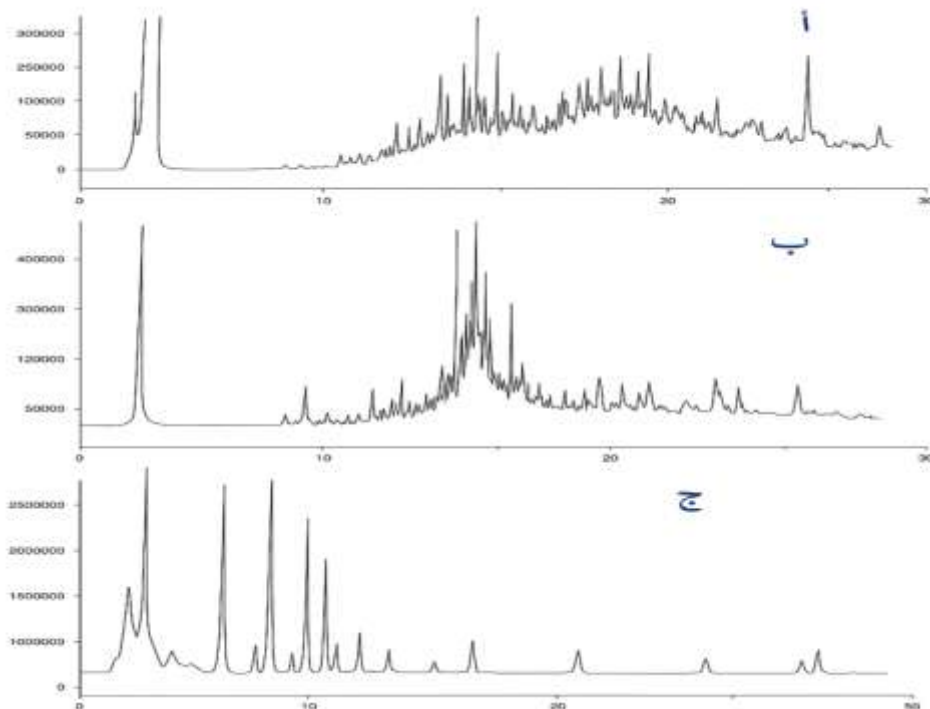


الشكل (5) مخططات GC-FID. (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من خشب مكتبي. (ب) عينة من خشب مكتبي تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

6.1 الجداول والمخططات (6،8) يظهر نتائج GC-FID لعينة الغاز ولين القياسية، لوح خشبي لصالون سيارة تم حرقها باستخدام الغازولين نفسه، ونفس العينة للوح خشبي لصالون سيارة تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود.

الجدول (8) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

| الارتفاع height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|--|
| 1573997 | 8664311 | 11.863 | 1 | أ لوح خلفي لصالون سيارة |
| 1824260 | 8332422 | 13.394 | 2 | |
| 53605 | 2889197 | 14.024 | 3 | |
| 1262655 | 4567408 | 14.505 | 4 | |
| 676587 | 4787360 | 15.046 | 5 | |
| 690238 | 9346336 | 17.936 | 6 | |
| 1066804 | 14170235 | 18.875 | 7 | |
| 1535723 | 18136844 | 21.069 | 8 | |
| 981175 | 15892610 | 28.853 | 9 | |
| 19480 | 417326 | 7.476 | 1 | ب اثار الغازولين في عينة لوح خشبي لصالون سيارة |
| 75850 | 1559166 | 9.757 | 2 | |
| 55712 | 107681 | 10.281 | 3 | |
| 216440 | 390044099 | 7.489 | 1 | ج غازولين قياسي |
| 176133 | 201682 | 9.754 | 2 | |
| 28148 | 30687 | 10.241 | 3 | |



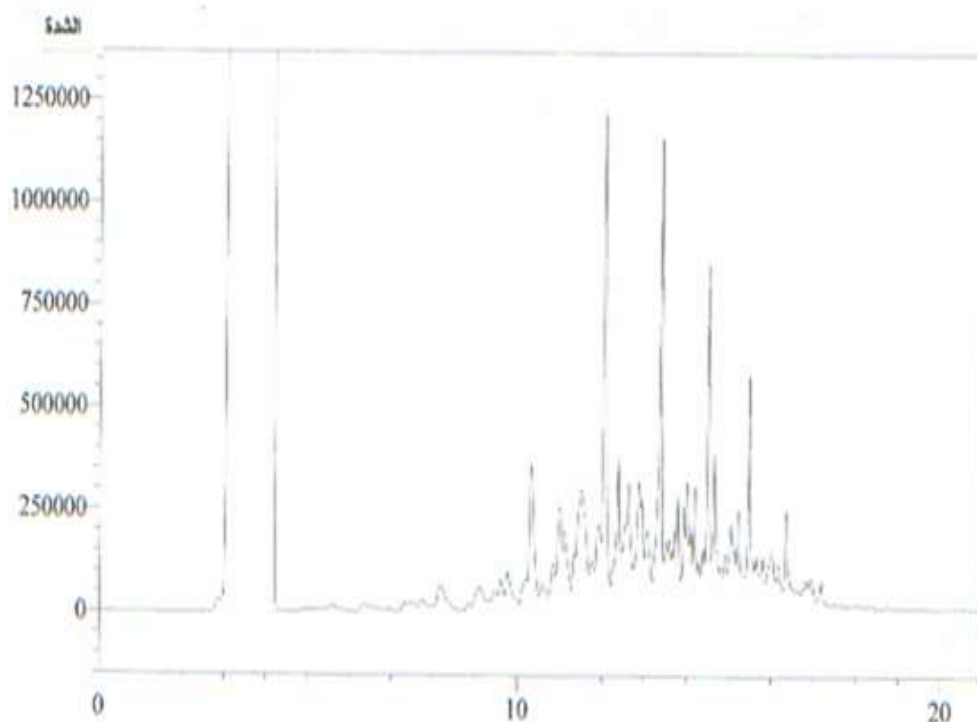
الشكل (6) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من لوح خشبي لصالون سيارة. (ب) عينة من لوح خشبي لصالون سيارة تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

2. نتائج GC-FID المتحصل عليها لعينة الكيروسين القياسية ومخلفات المواد الأساسية التي تم حرقها بهذا الوقود وبدونه.

1.2 الجدول والمخطط (7،9) يظهر نتائج GC-FID لعينة كيروسين المستخدمة كعينة قياسية للمقارنة مع عينات مخلفات الحريق وزمن احتباسها خلال العمود وإثبات وجود متبقيات الكيروسين في العينات التي تم حرقها بهذا الوقود..

جدول (9) يمثل زمن احتباس بعض مركبات الكيروسين القياسي (GC-FID)

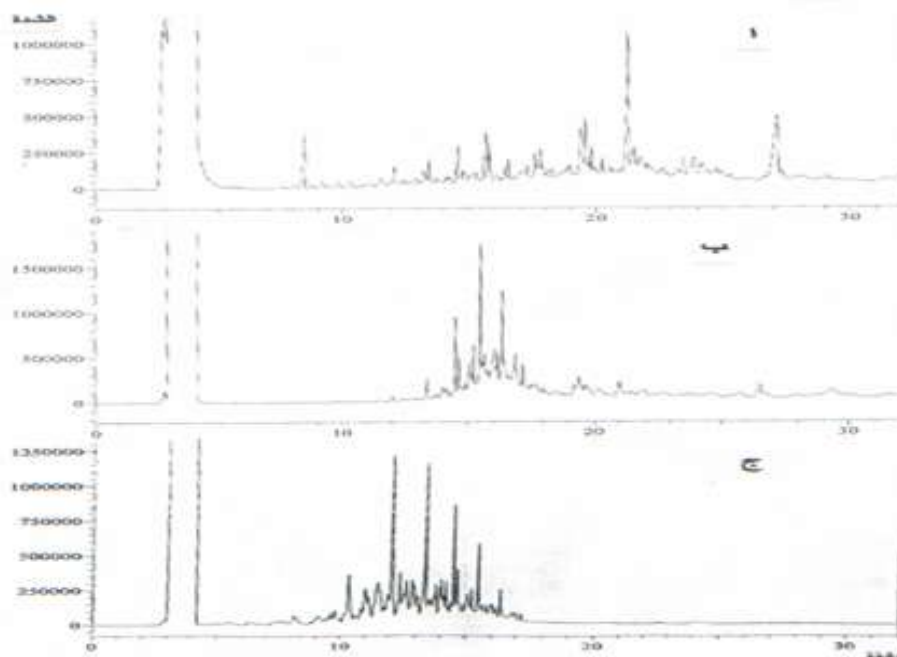
| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|----------------------|
| 355658 | 2651699 | 10.316 | 1 | الكيروسين القياسي |
| 254908 | 187772 | 10.993 | 2 | |
| 1945512 | 1645554 | 11.114 | 3 | |
| 257095 | 4211031 | 11.507 | 4 | |
| 211895 | 1562352 | 11.925 | 5 | |
| 1212475 | 6170326 | 12.049 | 6 | |
| 368226 | 2418395 | 12.379 | 7 | |
| 313916 | 1982047 | 12.868 | 8 | |
| 198707 | 1230885 | 13.074 | 9 | |
| 17844 | 102213 | 13.144 | 10 | |
| 1153595 | 562483 | 13.394 | 11 | |
| 282343 | 1284269 | 13.801 | 12 | |
| 315448 | 1400734 | 14.020 | 13 | |
| 153848 | 691718 | 14.403 | 14 | |
| 850462 | 3013504 | 14.507 | 15 | |
| 573106 | 2283171 | 15.479 | 16 | |
| 138706 | 1445991 | 16.015 | 17 | |
| 241967 | 1387077 | 16.356 | 18 | |



الشكل (7) مخطط GC-FID . لعينة الكيروسين القياسية المستخدمة في الحريق

2.2 الجداول والمخططات (8،10) يظهر نتائج GC- FID لعينة الكيروسين القياسية، عينة قماش قطني تم حرقها باستخدام الكيروسين نفسه، ونفس العينة للقماش القطني تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود. الجداول (10) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

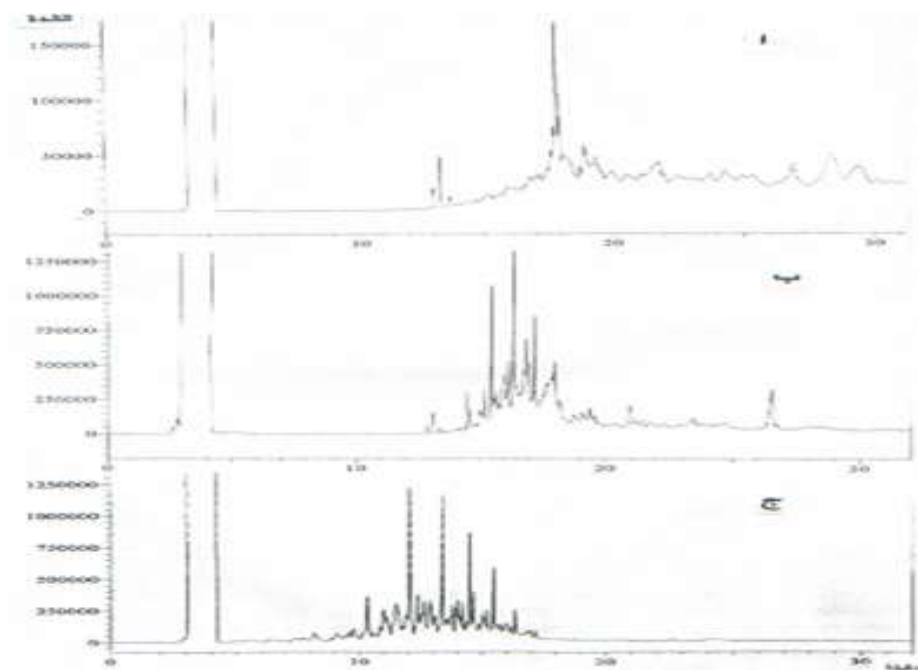
| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|--|
| 381950 | 2378207 | 8.472 | 1 | أ قماش قطني |
| 141367 | 837128 | 12.092 | 2 | |
| 367595 | 1178217 | 15.682 | 3 | |
| 293976 | 1122807 | 15.838 | 4 | |
| 246232 | 1583710 | 17.798 | 5 | |
| 110263 | 1046548 | 18.798 | 6 | |
| 1077621 | 7055532 | 21.204 | 7 | |
| 461347 | 660396 | 27.134 | 8 | |
| 17696 | 213029 | 11.509 | 1 | ب اثار الكيروسيين في عينة قماش قطني |
| 64800 | 361873 | 12.026 | 2 | |
| 249810 | 1186266 | 13.373 | 3 | |
| 542351 | 3301458 | 14.501 | 4 | |
| 1764887 | 7366354 | 15.487 | 5 | |
| 1224045 | 9006271 | 16.366 | 6 | |
| 197095 | 4211031 | 11.507 | 1 | ج كيروسيين قياسي |
| 1212475 | 6170326 | 12.049 | 2 | |
| 1153595 | 5624283 | 13.394 | 3 | |
| 850462 | 3013504 | 14.507 | 4 | |
| 573106 | 2283171 | 15.479 | 5 | |
| 241967 | 1387077 | 16.356 | 6 | |



الشكل (8) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من قماش قطني. (ب) عينة من القماش القطني تم حرقها مع الكيوسين. (ج) عينة الكيوسين القياسية.

3.2 الجداول والمخططات (9،11) يظهر نتائج GC- FID لعينة الكيوسين القياسية، عينة قماش صوفي تم حرقها باستخدام الكيوسين نفسه، ونفس العينة للقماش الصوفي تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود. الجداول (11) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

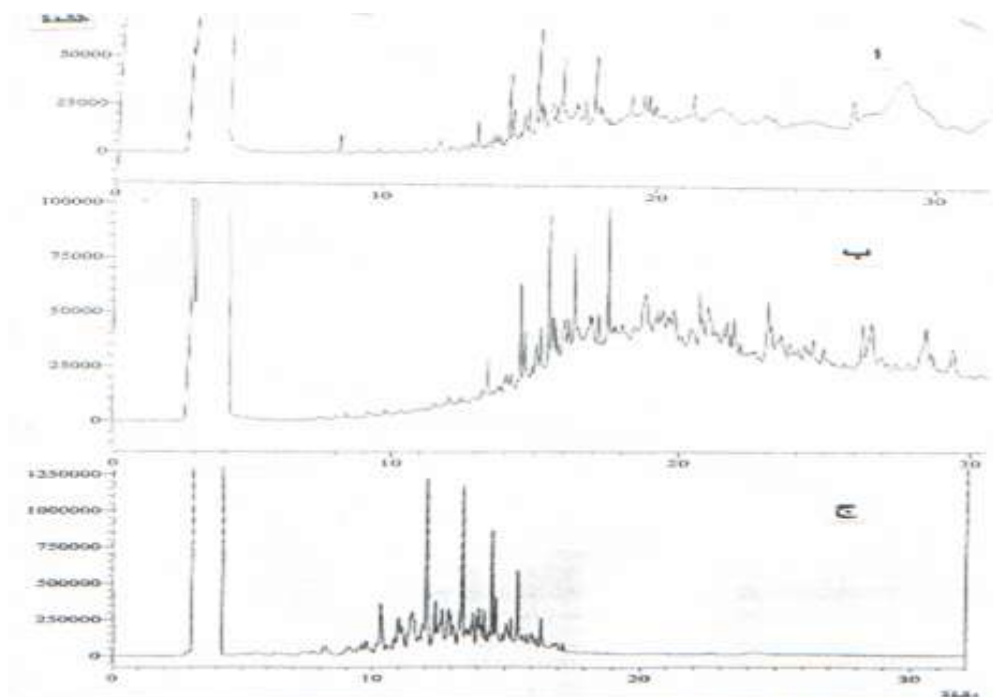
| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|--|
| 44771 | 174133 | 13.202 | 1 | أ قماش صوفي |
| 8543 | 29388 | 13.580 | 2 | |
| 9201 | 64919 | 15.834 | 3 | |
| 14989 | 101465 | 16.745 | 4 | |
| 20165 | 213673 | 17.452 | 5 | |
| 58068 | 267921 | 17.722 | 6 | |
| 152498 | 819788 | 17.833 | 7 | |
| 37007 | 514899 | 18.923 | 8 | |
| 61917 | 272652 | 12.862 | 1 | ب اثار الكيوسين في عينة قماش صوفي |
| 148109 | 590508 | 13.136 | 2 | |
| 300899 | 986181 | 14.486 | 3 | |
| 1070520 | 4101581 | 15.469 | 4 | |
| 419908 | 4167453 | 16.018 | 5 | |
| 1420293 | 8990218 | 16.363 | 6 | |
| 313916 | 19820347 | 12.868 | 1 | ج كيوسين قياسي |
| 17844 | 102213 | 13.144 | 2 | |
| 153848 | 691718 | 14.403 | 3 | |
| 573106 | 2283171 | 15.479 | 4 | |
| 138706 | 1445991 | 16.015 | 5 | |
| 241967 | 1387077 | 16.356 | 6 | |



الشكل (9) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من قماش صوفي. (ب) عينة من القماش الصوفي تم حرقها مع الكيوسين. (ج) عينة الكيوسين القياسية.

4.2 الجداول والمخططات (10،12) يظهر نتائج GC- FID لعينة الكيوسين القياسية، عينة ورق مقوى تم حرقها باستخدام الكيوسين نفسه، ونفس العينة للورق مقوى تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود. الجداول (12) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

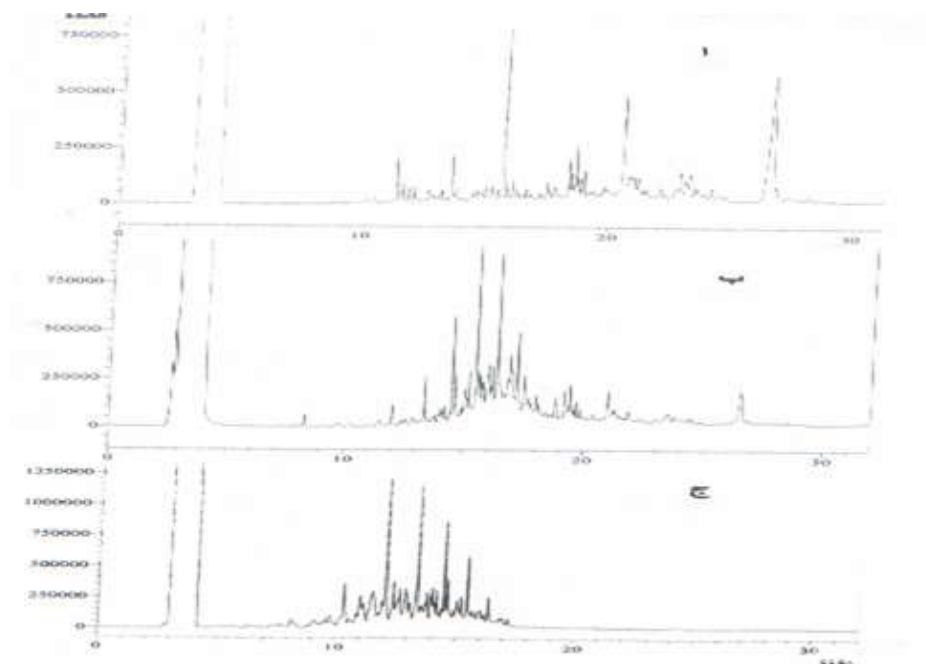
| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|--|
| 9263 | 33050 | 8.388 | 1 | أ ورق مقوى |
| 3842 | 30541 | 12.098 | 2 | |
| 14369 | 51926 | 13.448 | 3 | |
| 36829 | 113230 | 14.574 | 4 | |
| 58709 | 205207 | 15.555 | 5 | |
| 18968 | 180031 | 16.117 | 6 | |
| 42286 | 191855 | 16.444 | 7 | |
| 40474 | 244430 | 17.604 | 8 | |
| 4260 | 12649 | 13.159 | 1 | ب اثار الكيوسين في عينة ورق مقوى |
| 17250 | 60116 | 13.371 | 2 | |
| 47016 | 141011 | 14.491 | 3 | |
| 73062 | 239608 | 15.464 | 4 | |
| 21880 | 206770 | 16.014 | 5 | |
| 51450 | 234923 | 16.346 | 6 | |
| 17844 | 102213 | 13.144 | 1 | ج كيوسين قياسي |
| 1153595 | 5624283 | 13.394 | 2 | |
| 153848 | 691718 | 14.403 | 3 | |
| 573106 | 2283171 | 15.479 | 4 | |
| 241967 | 1387077 | 16.356 | 5 | |



الشكل (10) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من ورق مقوى. (ب) عينة من ورق مقوى تم حرقها مع الكيوسين. (ج) عينة الكيوسين القياسية.

5.2 الجداول والمخططات (11،13) يظهر نتائج GC- FID لعينة الكيوسين القياسية، عينة خشب مكتبي تم حرقها باستخدام الكيوسين نفسه، ونفس العينة للخشب المكتبي تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود. الجداول (13) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

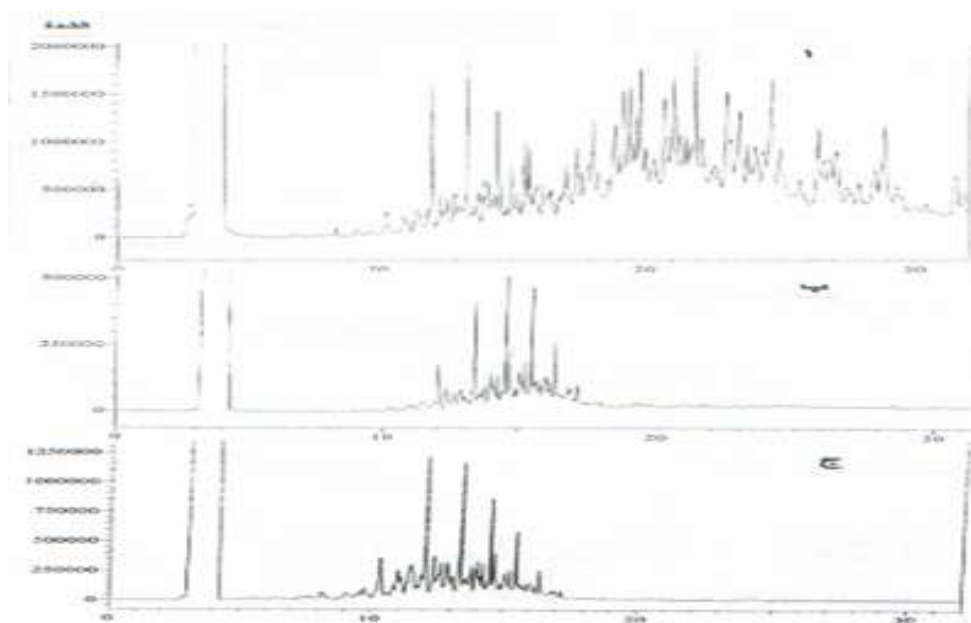
| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|---|
| 216346 | 1006971 | 11.409 | 1 | أ خشب مكتبي |
| 216182 | 814794 | 13.643 | 2 | |
| 870603 | 2832925 | 15.688 | 3 | |
| 260028 | 1080403 | 18.657 | 4 | |
| 47961 | 3307288 | 20.546 | 5 | |
| 117550 | 1209292 | 20.804 | 6 | |
| 108510 | 1013733 | 21.1511 | 7 | |
| 564360 | 7869930 | 26.626 | 8 | |
| 110389 | 625674 | 12.018 | 1 | ب اثر الكيوسين في عينة خشب مكتبي |
| 398899 | 209167 | 12.854 | 2 | |
| 263111 | 1091731 | 13.361 | 3 | |
| 572833 | 1855528 | 14.486 | 4 | |
| 269606 | 1507028 | 14.634 | 5 | |
| 934943 | 3568557 | 15.465 | 6 | |
| 89599 | 3985549 | 16.350 | 7 | |
| 1212475 | 6170326 | 12.049 | 1 | ج كيوسين قياسي |
| 313916 | 1982047 | 12.868 | 2 | |
| 1153595 | 5624283 | 13.394 | 3 | |
| 153848 | 691718 | 14.403 | 4 | |
| 573106 | 2283171 | 15.479 | 5 | |
| 241967 | 1387077 | 16.356 | 6 | |



الشكل (11) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من خشب مكتبي. (ب) عينة من خشب مكتبي تم حرقها مع الكيوسين. (ج) عينة الكيوسين القياسية.
 6.2 الجداول والمخططات (12،14) يظهر نتائج GC- FID لعينة الكيوسين القياسية، عينة خشبية لصالون سيارة تم حرقها باستخدام الكيوسين نفسه، ونفس العينة الخشبية لصالون سيارة تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود.

الجدول (14) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

| الارتفاع Height | المساحة Area | زمن الاحتباس Retention Time | Peak Number | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|---|
| 1573997 | 8664311 | 11.863 | 1 | أ لوح خشبي لصالون سيارة |
| 1824260 | 8332422 | 13.394 | 2 | |
| 53605 | 2889197 | 14.024 | 3 | |
| 1262655 | 4567408 | 14.505 | 4 | |
| 676587 | 4787360 | 15.046 | 5 | |
| 690238 | 9346336 | 17.936 | 6 | |
| 1066804 | 14170235 | 18.875 | 7 | |
| 1535723 | 18136844 | 21.069 | 8 | |
| 981175 | 15892610 | 28.853 | 9 | |
| 178469 | 948792 | 12.028 | 1 | ب اثار الكيوسين في عينة لوح خشبي لصالون سيارة |
| 83879 | 591358 | 12.363 | 2 | |
| 78434 | 494790 | 12.868 | 3 | |
| 415596 | 1845399 | 13.370 | 4 | |
| 503302 | 1686679 | 14.487 | 5 | |
| 460100 | 1649115 | 15.457 | 6 | |
| 250130 | 1321131 | 16.336 | 7 | |
| 1212475 | 6170326 | 12.049 | 1 | ج كيوسين قياسي |
| 368226 | 2418395 | 12.379 | 2 | |
| 313916 | 1982047 | 12.868 | 3 | |
| 1153595 | 5624283 | 13.394 | 4 | |
| 153848 | 691718 | 14.403 | 5 | |
| 57106 | 2283171 | 15.479 | 6 | |
| 241967 | 1387077 | 16.356 | 7 | |



الشكل (12) مخططات GC-FID. (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من لوح خشبي لصالون سيارة. (ب) عينة من لوح خشبي لصالون سيارة تم حرقها مع الكيوسين. (ج) عينة الكيوسين القياسية.

مناقشة النتائج (Discussion)

كفاءة التحديد النوعي وموثوقية البصمة الكيميائية أظهرت النتائج التحليلية المستخلصة باستخدام تقنية كروماتوغرافيا الغاز المزودة بكاشف التأين اللهب (GC-FID) كفاءة عالية في الكشف النوعي عن متبقيات الغازولين والكيوسين في العينات المحترقة. إن التطابق الملحوظ بين أزمنة الاحتفاظ (t_R) للمركبات القياسية وتلك المستخلصة من نماذج المحاكاة يؤكد موثوقية هذه التقنية في التعرف على المسرعات الكيميائية حتى بعد تعرضها لظروف الاحتراق الواقعية. وبالمقابل، فإن خلو العينات المحترقة ذاتياً (عينة الضابطة) من أي قمم مماثلة، يعزز الفرضية العلمية بأن متبقيات الوقود الهيدروكربوني تعمل "كبصمة كيميائية" مستقرة نسبياً، مما يمنحها قيمة إثباتية عالية في التحقيقات الجنائية المتعلقة بالحوادث العمدية.

تأثير الركيزة وسلوك المركبات الكروماتوغرافي كشفت الدراسة أن أزمنة الاحتفاظ للغازولين تأثرت بشكل طفيف بطبيعة الوسط الحامل (الركيزة)، حيث لوحظت اختلافات يسيرة في مواقع القمم بين القماش، الورق، والخشب. يُعزى ذلك علمياً إلى ما يعرف بـ "تأثير المصفوفة" (Matrix Effect)، حيث تؤثر الخصائص الفيزيائية والكيميائية لكل مادة على كيفية احتجاز جزيئات الوقود داخل مسامها أو تفاعلها مع نواتج التحلل الحراري للركيزة نفسها. وفي سياق متصل، أظهر الكيوسين نمط قمم أكثر استقراراً وانتظاماً عبر مختلف المواد، مما يعكس ثبات سلوكه الكروماتوغرافي نظراً لاحتوائه على سلاسل هيدروكربونية أثقل وأقل تطايراً مقارنةً بالغازولين.

تفسير بقاء المتبقيات بعد الاحتراق يُعزى استمرار وجود هذه المتبقيات المتطايرة بعد الحريق إلى عدة عوامل تقنية وبيئية متداخلة؛ أبرزها ظاهرة "الاحتراق غير الكامل" الناتجة عن محدودية الأكسجين وسط الدخان الكثيف، أو تركز الوقود في مسام الركائز بعيداً عن اللهب المباشر (تأثير الفتيلة). كما يلعب التدخل السريع لفرق الإطفاء دوراً حاسماً في "تثبيت" البنية الكيميائية للمركبات ومنع اكتمال تحللها الحراري. وتدعم هذه الاستنتاجات التوصيات الجنائية بضرورة الجمع الفوري للعينات وحفظها في عبوات محكمة الإغلاق لمنع ضياع المكونات الطيارة.

التوصيات الجنائية والأفاق المستقبلية تثبت الدراسة أن تقنية GC-FID تعد أداة فحص أولي (Screening Tool) فعالة للمختبرات الجنائية للتمييز بين أنواع الوقود. ولرفع دقة النتائج، توصي الدراسة بإنشاء "مكتبة رقمية" محلية لأزمنة الاحتفاظ الخاصة بالوقود المتاح في الأسواق، وتطوير أنظمة "التعرف النمطي" (Pattern Recognition) لتقليل احتمالية الخطأ في التفسير.

وعلى الرغم من نجاح هذه التقنية، إلا أن الحالات الجنائية المعقدة أو العينات ذات التراكيز الضئيلة قد تتطلب الدمج مع تقنية كروماتوغرافيا الغاز المقترنة بمطياف الكتلة (GC-MS) لضمان التحديد الجزيئي القاطع. وفي الختام، يُقترح توسيع نطاق البحث ليشمل وقود الديزل ودراسة أثر وسائط الإطفاء المختلفة (مثل الرغوة الكيميائية) على معدلات استرداد المتبقيات، مع التأكيد على تدريب الكوادر الميدانية لضمان سلامة السلسلة الجنائية من مسرح الحادث إلى التقرير النهائي.

الخاتمة

تُظهر نتائج هذه الدراسة أن تقنية كروماتوغرافيا الغاز المزودة بكاشف اللهب GC-FID تمتلك قدرة عالية على الكشف عن متبقيات الغازولين والكيروسين في مخلفات الحرائق المتعمدة، وذلك من خلال التطابق الواضح في أزمنة الإحتباس بين المركبات القياسية وبين المركبات المفصولة من العينات المحترقة بالوقود. وقد أثبتت المقارنات أن العينات التي أحرقت دون إضافة سوائل مشتعلة لا تُظهر أي قمم مطابقة للغازولين أو الكيروسين، مما يؤكد موثوقية التقنية في التمييز بين الحرائق المتعمدة والحرائق التي لا تستخدم فيها مواد مسرعة للاشتعال.

كما تشير النتائج إلى أن جزءاً من المركبات الهيدروكربونية يبقى قابلاً للرصد حتى بعد الاحتراق، نتيجة لعوامل مثل نقص الأكسجين، وتجمع الوقود في مناطق يصعب وصول اللهب إليها، أو الإطفاء السريع للحريق. وتؤكد هذه المعطيات أهمية التحليل الكروماتوغرافي كأداة أساسية في التحقيقات الجنائية المتعلقة بمسببات الحرائق، لما يوفره من أدلة دقيقة يمكن الاعتماد عليها في تحديد نوع الوقود المستخدم وربط العينة بمصدر الاشتعال.

تُبرز هذه الدراسة الدور الحيوي لتقنيات الفصل والتحليل الكيميائي في كشف آثار الوقود في مسارح الحرائق، وتدعم استخدامها كمنهجية علمية موثوقة تسهم في تعزيز جودة الأدلة واستخلاص الاستنتاجات الجنائية الدقيقة.

Compliance with ethical standards

Disclosure of conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Reference

1. American Society for Testing and Materials (1995) "ASTM E 1387 – 95 Standard Test Method for Ignitable Liquid Residues in Extracts from Fire Debris Samples by Gas Chromatography " , Annual Book of ASTM Standards , PP. 510 – 517.
2. American Society for Testing and Materials (1997) "ASTM E 1618 – 97 Standard Guide For Identification of Ignitable Liquid Residues in Extract from Fire Debris Samples By GC Chromatography – Mass Spectrometry" Annual Book of ASTM Standards,PP 654 – 659.
3. Stauffer, E. and J. Almirall (2001) " Identification and Characterization of Interferin Products in Fire Debris Analysis", Florida International University, Miami, Florida.
4. Scottbodle. E. (2007) " Multivariate Pattern Recognition of Petroleum- Based Accelerants and Fuels " University of Akron.
5. Eric Stauffer . Julia A. Dolan . Reta Newman " book of Fire Debris Analysis " <http://books.elsevier.companions/9780126639711>.
6. Hirz , R. and A. M. Rizzi (1991) " Stimulation of Concentration Changes in Complex Volatile Mixtures During Evaporation by Using Gas Chromatography " , Chromatography , 31,PP. 224-232.
7. Q. ran (1999) " Sample Preparation and Data Interpretation for Analysis of accelerants In Fire Debris " University Alabama .
8. Lewis, J., & Lewis, S. (2012). *Recovery of kerosene residues from burned cotton fabrics using solvent extraction and GC-FID analysis*. Forensic Science International, 221(1–3), 45–52.
9. Lim, J., Lee, S., & Kim, H. (2018). *Time-dependent loss of gasoline residues from burned carpets analyzed by solvent extraction and GC-FID*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 134, 189–196.
10. Turner, D. A., & Goodpaster, J. V. (2011). *Passive headspace adsorption for differentiation of kerosene and diesel in weathered fire debris using GC-FID*. Journal of Forensic Sciences, 56(3), 708–715.
11. Stauffer, E., Dolan, J. A., & Newman, R. (2008). *Fire debris analysis: Guidelines for sampling and GC-based identification of ignitable liquids*. Fire Technology, 44(2), 139–152.
12. Kirk, P. L., & Lentini, J. J. (2013). *Characterization of ignitable liquid residues from burned substrates using GC-FID and GC-MS*. Journal of Forensic Science and Criminology, 1(2), 1–12.
13. Bumbrah, G. S., Krishan, K., & Kanchan, T. (2017). *Advances in fire debris analysis: Role of GC-FID in the identification of ignitable liquid residues*. Egyptian Journal of Forensic Sciences, 7(1), 1–9.
14. Maldonado, H., & Ríos, J. (2019). *Interpretation of GC-FID chromatographic patterns in ignitable liquid residue analysis*. Forensic Chemistry, 13, 100144.
15. DeHaven, A., & Goodpaster, J. V. (2017). *Chemometric differentiation of ignitable liquids using GC-FID data*. Talanta, 164, 601–609.
16. Ruffell, A., & Montenegro, L. (2020). *GC-FID characterization of kerosene and gasoline residues in complex fire scenes*. Journal of Forensic Sciences, 65(4), 1202–1212.
17. Dorr, H., & Steiner, S. (2015). *Use of activated charcoal strips for concentration of ignitable liquid residues prior to GC-FID analysis*. International Journal of Analytical Chemistry, 2015, 1–9.
18. Bumbrah, G. S. (2017). *Analysis of petroleum products in fire debris residues by gas chromatography: A literaturereview*.

Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/a83a/c2afda0ee292b827099fe39464f735e71a0c.pdf>

19. Sampat, A. A. S., Jain, A., Singh, Y., & Shah, A. (2018). *Detection and characterization of ignitable liquid residues in forensic fire debris samples*. *Chromatography*, 5(3), 43.
<https://www.mdpi.com/2297-8739/5/3/43>
20. Juniper Publishers. (2019). *Isolation and characterization of kerosene from fire debris*. *Journal of Forensic Sciences & Criminal Investigation*, JFSCI.MS.ID.555846.
<https://juniperpublishers.com/jfsci/JFSCI.MS.ID.555846.php>
21. Tankiewicz, M., Morrison, C., & Biziuk, M. (2013). *Application and optimization of headspace solid-phase microextraction for GC-FID determination of petroleum products*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026265X12002500>
22. Martín-Alberca, C., González-Rodríguez, J., & García-Ruiz, C. (2016). *Analytical tools for the analysis of fire debris: A review*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003267016305499>
23. Various authors (2010–2022). *Studies on weathering effects and volatile loss in ignitable liquid residues (comparative analytical evaluations using GC-FID/GC-MS)*. Examples: Sampat et al. (2018), Lim et al. (2018). Sample link: <https://www.mdpi.com/2297-8739/5/3/43>
24. Bumbrah, G. S. (2017). *Analysis of petroleum products in fire debris residues by gas chromatography: A literature review*. *Arab Journal of Forensic Sciences and Forensic Medicine*.
<https://journals.naass.edu.sa/index.php/AJFSFM/article/view/319/pdf>
25. Lim, P. W., Abdullah, A. F. L., & Chang, K. H. (2018). *Forensic gas chromatography analysis of time-elapsd gasoline in fire scene investigation*. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 22(1), 9–18.
https://mjas.analis.com.my/wp-content/uploads/2018/10/Lim_22_1_9.pdf
26. ASTM International. (2014). *ASTM E1618 – Standard test method for ignitable liquid residues in extracts from fire debris samples by gas chromatography–mass spectrometry*. (ASTM E1387).
https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20230517/E/E%201618%20-%202014.pdf
27. Review Article. (2018). *Sample preparation for the analysis of fire debris: Past and present*. *Journal of Separation Science*.
<https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jssc.201800556>
28. Steffen, A., et al. (1996). *Determination of liquid accelerants in arson suspected fire debris*. *Analytical Chemistry* (RSC).
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1996/ac/ac9963300129>
29. Frysinger, G. S., & Taylor, et al. (n.d.). *Forensic analysis of ignitable liquids in fire debris by comprehensive two-dimensional gas chromatography (GC×GC)*.
https://www.researchgate.net/publication/11322967_Forensic_Analysis_of_Ignitable_Liquids_in_Fire_Debris_by_Comprehensive_Two-Dimensional_Gas_Chromatography
30. Sampat, A. A. S., et al. (2018). *Detection and characterization of ignitable liquid residues by GC×GC-TOFMS*. *Chromatography* (MDPI).
<https://www.mdpi.com/2297-8739/5/3/43>
31. Mohammed, A. (2022). *Fire chemistry and forensic analysis of fire debris*.
<https://iasj.rdd.edu.iq/journals/uploads/2024/12/25/b5f0281f01268a2c70e44b4c77e104ce.pdf>
32. ResearchGate Source. (n.d.). *A solid-phase microextraction method for the detection of ignitable liquids in fire debris*.
https://www.researchgate.net/publication/5380838_A_Solid-phase_Microextraction_Method_for_the_Detection_of_Ignitable_Liquids_in_Fire_Debris
33. Sigman, M. E., et al. (2020). *Chemometric applications in fire debris analysis*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*.
<https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/am-pdf/10.1002/wfs2.1368>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **AJAPAS** and/or the editor(s). **AJAPAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.