

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 موقع الحرق المتعتمدة باستخدام تقنيات كروماتوغرافية الغاز GC-FID

أ. ابوبكر حسين محمد الطالب ^{1*}، أ. خديجة رمضان عبد السلام دخلية ²

قسم الكيمياء، كلية التربية - العجیلات، جامعة الزاوية، العجیلات، لیبیا ^{2.1}

*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).*

الملخص

المقدمة والهدف: تعد الحرق المتعتمدة من التحديات الجسيمة في التحقيقات الجنائية نظراً لتدمر الأدلة المباشرة. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير وتقديم بروتوكول تحليلي موثوق للكشف عن بقايا السوائل القابلة للاشتعال (الغازولين والكيروسين) في مخلفات الحرق، وذلك لتعزيز القرابة الاستدلالية للمختبرات الجنائية في تحديد مسببات الحريق.

المنهجية: اعتمدت الدراسة على منهجية تجريبية تضمنت تحضير نماذج احتراق محاكاة لركائز متعددة (قماش قطني، صوفى، ورق مقوى، خشب مكتبي، ولوح خشبى لديكور السيارات). تم استخلاص الهيدروكربونات المتبقية باستخدام مذيب

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

النتائج: أظهرت النتائج تسجيل قم 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 للكيروسين، سُجلت قم واضحة في نطاق زمن احتفاظ أطول تراوح بين 11.366 إلى 16.509 دقيقة. أثبتت النتائج وجود تطابق ملحوظ بين أزمنة الاحتفاظ في العينات المحترقة والعينات القياسية، مع رصد اختلافات طفيفة عُزِّيت 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 المقترن أداة جنائية موثوقة تدعم دقة التحقيقات وتعزز القيمة الإثباتية للنتائج التحليلية أمام الجهات القضائية.

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

المقدمة:

تُعدّ الحرائق المتعمرة 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) والكيروسين (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) بمسارعين مختلفين (الغازولين والكيروسين)، 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 والكيروسين لتحديد وجود المادة المسرّعة، وبيان مدى تطابق النمط المأخوذ مع الأنماط المعيارية بدقة.

تكمّن الأهمية العلمية لهذه الدراسة في تقديم دليل تجريبي مباشر لخبراء الأدلة الجنائية، ينتقل من موقع الحريق إلى المختبر وصولاً إلى المخطط التحليلي، مما يعزّز 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 محددات جمع العينات، المحافظة عليها، واختيار المذيب المناسب للاستخلاص، فضلاً عن معايير مطابقة المخططات المعيارية. من خلال ذلك، يمكن للخبراء تقييم استنتاجات مدعومة بتحليل مخبري مقارن 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 والكيروسين. 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 ويدع من قدرة السلطات على اتخاذ الإجراءات المناسبة. ومن هذا المنطلق، تبرز الحاجة لإجراء دراسة تجريبية لتقدير فعالية التقنيات التحليلية الحديثة في الكشف عن بقايا السوائل المشتعلة في مخلفات الحريق.

أهمية الدراسة

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من عدة جوانب:

- **الأهمية الجنائية:** تقدم بيانات علمية موثوقة تساعد في تمييز الحرائق المتعمرة عن الحرائق العرضية، مما يدعم التحقيقات القضائية وتقديم الأدلة المحكمة أمام المحاكم.
- **أهمية علمية:** تعزّز فهم سلوك المركبات البترولية بعد الاحتراق وفعالية الكشف عنها باستخدام GC-FID.
- **أهمية تطبيقية:** تحسين دقة التحاليل المختبرية واختصار الزمن اللازم للفحص.
- **الأهمية البيئية والأمنية:** تمكن 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 المتعمدة 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.
- تقدير فعالية طرق جمع وحفظ العينات من موقع الحرائق المشبوهه 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 وتقدير 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 موقع عام.

منهج الدراسة

منهج تجريبي تحليلي (Experimental-Analytical Approach)، يجمع بين التجارب المخبرية والدراسة التطبيقية لعينات من موقع حريق 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 on Forensic Sciences) E30 on Forensic Sciences، وتحديداً اللجنة الفرعية المعنية بمواد الجريمة. تستند المعايير الأساسية في هذا التصنيف إلى المواصفتين 1387 E1 [2] و 1618 ASTM E1 [1] يعتمد النظام على تقسيم السوائل المشتعلة إلى أصناف رئيسية بناءً على التركيب الكيميائي ونطاق نقطير الألكانات (عدد ذرات الكربون)، كما هو موضح في الجدول (1)

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

الصنف	اسم "امتداد "Peak" الأمثلة	الصنف (يعتمد على عدد كربون الألكان)
1	المقطرات البترولية (LPD) الخفيفة	إيثرات البتروليوم ، وقود مشعل الجيب بعض مذيبات مطاط الصق، VM، P، نافثا
2	الغازولين	كل أصناف الغازولين ذاتي الدفع متضمنة Gasohol
3	المقطرات البترولية (MPD) المتوسطة	الكحولات المعدنية ، بعض مخففات الطلاء بعض فحم التشغيل ، بعض وقود المشاعل بعض المذيبات للمبيدات الحشرية، بعض زيوت المصابيح
4	الكيروسين	زيت الوقود رقم 1 ، وقود الطيران، بخاخات الحشرات ، بعض فحم التشغيل ، بعض مخففات الطلاء ، بعض المذيبات للمبيدات الحشرية ، بعض زيوت المصابيح
5	المقطرات البترولية (HPD) الثقيلة	زيت الوقود رقم 2 ، وقود الديزل

يركز البحث الحالي بشكل محدد على الصنفين الثاني (الغازولين) والرابع (الكيرولين)، نظراً لشيوخ استخدامهما في حوادث الحريق العددي 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 لغيرات فيزيائية وكيميائية ناتجة عن عدة عوامل، أبرزها: التبخر التفاضلي، واختلاف كفاءة الاستخلاص، وعمليات الامتزاز.

يعد الغازولين والكيرولين من الأمثلة النموذجية لتأثير التركيب الكيميائي بظروف "التجوية" (Weathering) يحتوي الغازولين على خليط من الألكانات، المركبات الأروماتية، والنفاثلينات، وتتراوح درجات غليان مكوناته ما بين 30 إلى أكثر من 200 C. وعند تعرض الغازولين للتبخر أو التجوية، تتلاشى المكونات منخفضة درجة الغليان الخفيفة بمعدل أسرع من المكونات الثقيلة مرتفعة درجة الغليان، مما يؤدي إلى تغير نسب المركبات في العينة. وُتُعرف هذه الظاهرة باسم التبخر التفاضلي (Differential Evaporation).

ويتنتج عن هذه العملية تغير في التركيب الكيميائي للغازولين؛ وقد يكون هذا التغير كمياً (تغير في نسب المركبات) أو كيماياً (اختفاء بعض المركبات عند تجوية شديدة). وتنعكس هذه التغيرات بشكل واضح على المخططات الكروماتوغرافي [7,6,5] GC

دراسات سابقة: (Literature Review)

تناولت العديد من الدراسات طرق الكشف عن السوائل المشتعلة وبما فيها الكشف عن بقايا الغازولين والكيرولين في موقع الحريق المتعتمدة باستخدام تقنية كروماتوغرافيا الغاز GC-FID و GC-MS. طورت إحدى الدراسات منهجة دقيقة لاستخلاص وتحليل بقايا الكيرولين من أقمشة قطنية متقدمة، وأظهرت النتائج أن زمن الحريق وطبيعة النسج يؤثران بوضوح على كمية المتبقى من المركبات، مما يعزز أهمية سرعة جمع العينات ودقة منهجة الاستخلاص.[8] كما درس Lim وأخرون تأثير الزمن بعد الحريق على استرجاع آثار الغازولين من السجاد المحترق باستخدام الاستخلاص بالمذيب GC-FID ، وجدوا أن المركبات الخفيفة تبخر بسرعة خلال الدفانق الأولى، في حين تستمر المركبات الثقيلة وتحليل FID لفصل وتحديد مكونات الكيرولين والديزل بعد تعرضها لعوامل الطقس، وأظهر تحليل-GC FID فقرة واضحة على التمييز بينهما حتى بعد حوث التقادم الكيميائي.[9] وفي دراسة تصنيفية متقدمة، تم استخدام تقنية Passive Headspace لفصل وتحديد مكونات الكيرولين والديزل بعد تعرضهما لعوامل الطقس، وأظهر تحليل-GC FID فقرة واضحة على التمييز بينهما حتى بعد حوث التقادم الكيميائي.[10] كما تناولت دراسات متخصصة الكشف عن بقايا السوائل القابلة للاشتعال من مخلفات حرائق حقيقة عبر GC-FID ، مؤكدة ضرورة الالتزام بمعايير أخذ العينات وطرق التحضير المختبرية لضمان موثوقية النتائج.[11] وفي دراسة تجريبية موسعة، أحرقت مواد مختلفة مثل الأخشاب والأقمشة بعد إضافة الغازولين والكيرولين، ثم جرى تحليل المخلفات باستخدام GC-FID ، وأكملت النتائج أن بصمة الوقود تظل قابلة للتمييز حتى بعد الاحتراق الجزئي.[12] وقدم Bumrah وأخرون مراجعة تحليلية أوضحاوها 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 للقلم والبيانات الكمية يحسن بشكل كبير قدرة التمييز بين أنواع السوائل المشتعلة.[14] كما استخدمت دراسات حديثة أساليب التحليل الكيميائي الإحصائي Chemometrics مع بيانات GC-FID لتمييز الغازولين والكيرولين حتى بعد تعرض العينات للطقس أو الاحتراق الشديد، مؤكدة أن بصمة الكروماتوغرافية تعمل كمؤشر ثابت نسبياً.[15] وفي دراسة مخبرية حديثة أخرى، تم تحليل بقايا عدة سوائل قابلة للاشتعال ومنها الكيرولين 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 التعرض وعدد الشرائط للحصول على نتائج دقيقة.[17]. ركزت دراسات على مقارنة فعالية الاستخلاص بالمذيب وتقنيات الاستخلاص غير التدميرية مثل SPME و Headspace، 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 فياساً كمياً جيداً و GC-MS تعرضاً نوعياً دقيقاً للمكونات المسترجعة.[19] وأظهرت دراسات أجريت على عينات قطنية أن نوع النسج والزمن بعد الحريق يؤثران مباشرة على كمية الكيرولين المسترجعة باستخدام الاستخلاص بالمذيب وتحليل GC-FID.[20] كذلك تمت مقارنة تقنية HS-SPME بطرق الاستخلاص التقليدية وأثبتت أنها الأكثر حساسية للمركبات شديدة التطابير، بينما يتميز الاستخلاص بالمذيب بالقدرة على استرجاع المكونات الثقيلة، في حين يظل GC-MS الأفضل للتحقق النوعي.[21] كما تناولت دراسات مراجعة تقنية طرق الاستخلاص بالمذيب وبيّنت أنها تعطي مقطفات واسعة لكنها قد تحتوي على نواتج احتراق تتدخل مع المركبات الهدف [22] وأظهرت الدراسات الزمنية أن المركبات المتطايرة تختفي خلال دقائق أو ساعات من الحريق، وأن التأخير في جمع

العينات يؤدي إلى فقدان المؤشرات الأولى للمسرعات، مما يتطلب توثيقاً زمنياً دقيقاً واستخدام أكثر من تقنية استخلاص [23]. وشملت دراسات شاملة مقارنة بين الاستخلاص بالمذيب وتقنيات GC-FID وGC-MS، مؤكدةً أن الاستخلاص بالمذيب مناسب للفحص الأولى، بينما يوفر GC-MS قوة أكبر في التعرف النوعي خصوصاً عند وجود تداخلات مع نواتج الاحتراق [24]. كما بيّنت دراسات تطبيقية على عينات السجاد المتفحمة أن الزمن والطقس يؤثراً على استرجاع البنزين، حيث لوحظ فقدان كبير للمركبات المتطرية خلال الساعات الأولى [25]. وأظهرت دراسات معيارية أن إجراءات الكشف الحديثة تعتمد على تقنيات GC-MS كمرجع أساسي للتأكيد 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 التقطر بالبخار وSPME والاستخلاص بالمذيب، مع تقدير لأداء GC-FID و GC \times GC-MS و GC \times Headspace، وأشارت إلى الدور المتقدم للفصل الثنائي البعد في العينات المعقّدة [27]. كما أثبتت تطبيقات HS-SPME فعاليتها العالية في استخلاص بقايا الغازولين والديزل من الأقمصة مع الحفاظ على النمط الطيفي للمركبات المتطرية دون تغييره [28]. وأظهرت تقنيات GC \times GC أو GC-FID قدرتها على فصل مئات المركبات الناتجة من التحلل الحراري بشكل أفضل من GC-MS التقليدي [29]. كما بيّنت 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 \times GC-TOFMS [30]. وناقشت دراسات تحليلية تأثير التحلل الحراري الذي يؤدي إلى ظهور مركبات تداخل مع إشارات المسرعات، مما يستلزم استخدام قواعد بيانات واسعة وتقنيات فصل عالية الدقة للتغلب على هذا التداخل [31]. وخلصت مقارنات بين التقطر بالبخار والاستخلاص بالمذيب و Passive Headspace إلى أن كل تقنية مناسبة لفئة معينة من المركبات حسب تطبيقاتها وتركيزها [32]. وأخيراً، طبقت دراسات حديثة تقنيات GC-FID مع أساليب التحليل النطوي (Chemometrics) لتصنيف أنواع الوقود وتمييزها حتى بعد تعرضها للحرق أو الظروف الجوية، مما يعزز دور GC-FID عند دمجه مع الإحصاء المتقدم [33].

المواد والطرق materials and methods

الأالية والأجهزة المستخدمة (Instrumentation and Apparatus)

استخدم في هذا البحث جهاز كروماتوغرافيا الغاز المزود بكاشف التأين اللبني (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 وتنشيف طرق التحليل تمت عبر برنامج تحكم مخصص مثبت على الحاسوب المتصل بالجهاز.

اعتمدت الدراسة على مجموعة من الظروف التشغيلية الثابتة، الموضحة في الجدول (2).

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

المواد الكيميائية المستخدمة (Materials and Chemicals)

أولاً: المواد المسّرعنة للاحتراق (Accelerants)

تم استخدام الغازولين والكيروسين كمسرعات اشتعال رئيسية. جرى الحصول على العينات من محطة وقود محلية تابعة لمصفاة الزاوية لتكريير 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 موقع الحرائق:

قمash قطني - قماش صوفي - ورق مقوى - خشب مكتبي - لوح داخلي لصالون سيارة. تم لاحقاً تحليل أثر الاحتراق عليها في وجود المسرّعات المذكورة.

ثالثاً: المذيب المستخدم (Solvent)

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

تحضير العينات (Sample Preparation)

بعد تحضير العينات خطوة أساسية في الكشف عن المقادير الضئيلة من متبقيات السوائل المساعدة على الاشتعال في مخلفات الحرائق. وتهدف هذه العملية إلى فصل المركبات المتطرورة 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 بقطع المواد المختارة - وهي القطن والصوف والورق المقوى واللوح الداخلي لصالون السيارة إلى مقاطع تترواح أبعادها بين 30×20 سم و 75×50 سم، وذلك بما يتناسب مع سمك المادة وخصائصها الفيزيائية لضمان تجانس ظروف الاحتراق. عقب ذلك، رُشت كل قطعة بنحو 50 مل من الغازولين ثم أضرمت فيها النار إلى أن وصلت إلى مرحلة القفح الكامل. ولضمان الحفاظ على المركبات المتطرورة ومنع التلوث الخارجي، جُمعت العينات مباشرة بعد الاحتراق في أكياس بلاستيكية محكمة الإغلاق وموسومة بدقة.

و واستخلاص المتطايرات الناتجة عن الاحتراق، وُضعت العينات في قمع فصل وأضيف إليها 100-150 مل من ثانوي إيثيل الإثير بوصفه مذيباً عضوياً مناسباً لاستخلاص المركبات الهيدروكربونية. رُجح القمع لمدة خمس دقائق مع تهويته بشكل متقطع لتفريغ الضغط الداخلي ومنع فقدان المذيب. وبعد ذلك، رُشح المستخلص باستخدام ورق ترشيح مناسب وجُمع الراشح في كأس زجاجي نظيف. أجريت عملية ترکيز المستخلص باستخدام تيار من النيتروجين الجاف لتقليل حجمه إلى نحو 2 مل مع الحفاظ على المركبات المتطرورة، ثم نُقلت العينات المركزية إلى أنابيب محكمة الإغلاق تمهيداً لتحليلها. وقد أعيد 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 GC-FID

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، وسُجّل الطيف الناتج لاعتماده مرجعاً قياسياً للمقارنات اللاحقة.

عقب ذلك، حُقنت العينات المستخلصة من المواد المحروقة بالغازولين بالحجم نفسه (1 ميكرو لتر)، وسُجلت المخططات الكروماتوغرافية الناتجة وقارنت 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 كقاعدة مرجعية للتفرق بين المركبات الطبيعية ومتبقيات المسرّعات. وقد أجريت المقارنة النهائية عبر تحليل العلاقات بين المخططات القياسية والمخططات الناتجة عن العينات المحروقة بالمسرع، ومقارنتها في الوقت ذاته بالمخططات المسجلة لعينات التحكم. وقد أسممت هذه المنهجية في التحديد الدقيق لوجود أو عدم وجود متبقيات المواد المسرّعة للاشتعال، وقد جرى عرض النتائج ومناقشتها بصورة تفصيلية في فصل النتائج.

النتائج RESULTS

أوضح التجارب التي أجريت 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.

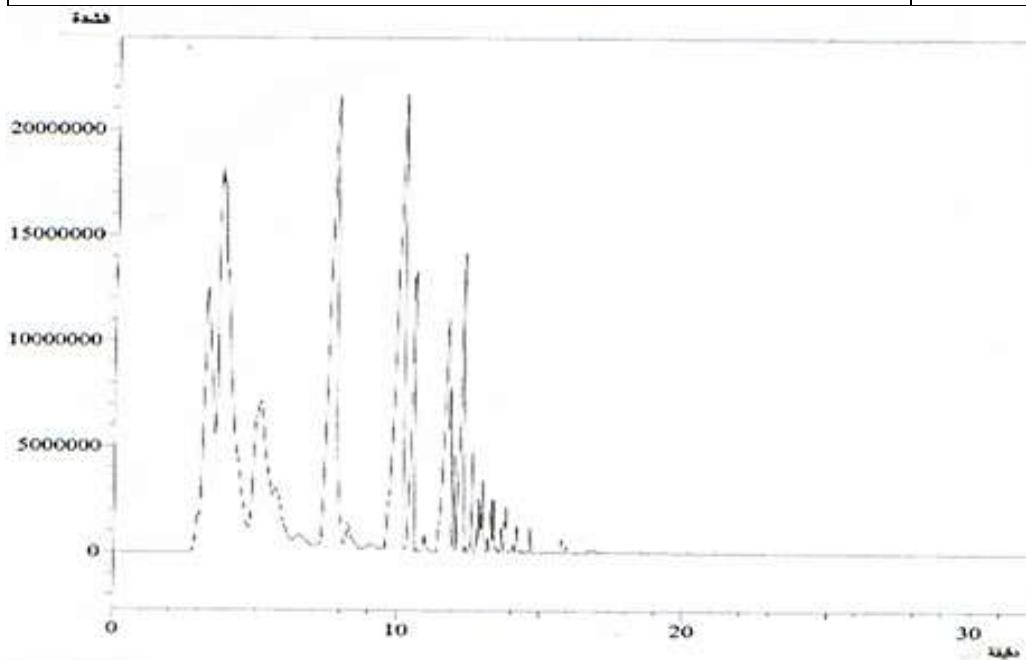
كما يتضح من النتائج المتحصل عليها لعينة الغازولين والكيروسين القياسية وعينات مخلفات المواد الأساسية (قماش قطني، قماش صوفي، ورق مقوى، خشب مكتبي، قطع خشبية لصالون سيارة) التي تم حرقها بهذا الوقود.

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 غازولين المستخدمة كعينة قياسية للمقارنة مع عينات مخلفات الحريق ووزن 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	الغازولين القياسي
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	

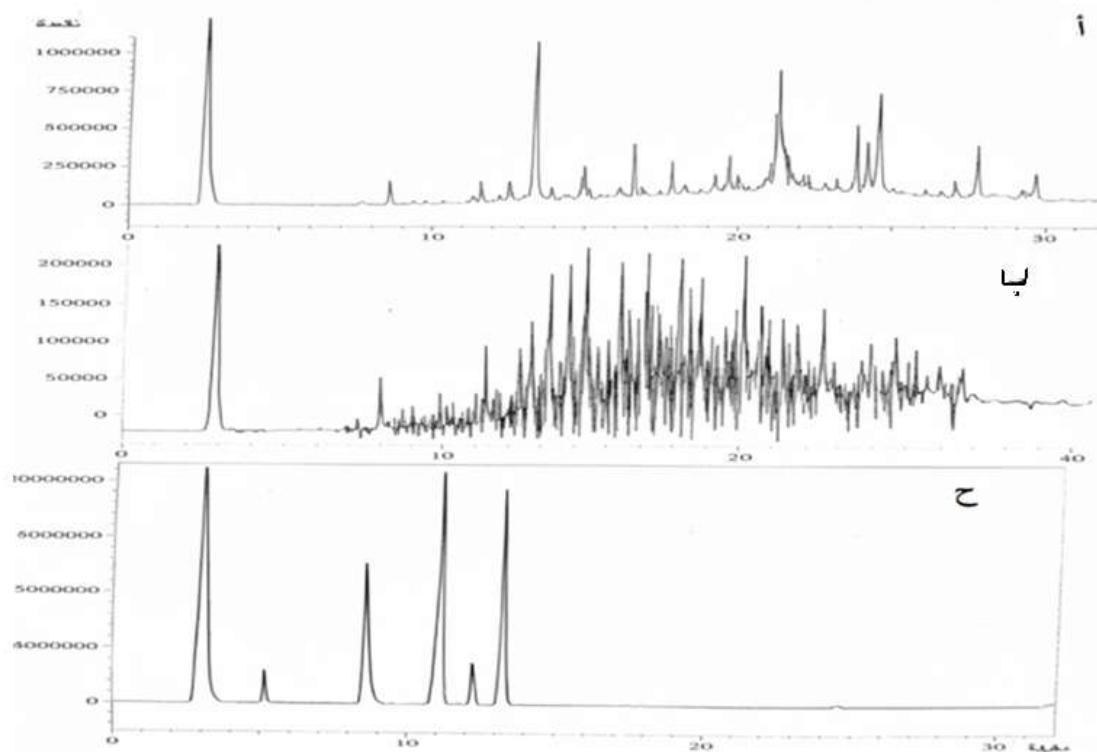


الشكل(1) مخطط GC-FID لعينة الغازولين القياسية المستخدمة في الحريق

2.1 الجداول والمخططات (2,4) يظهر نتائج GC-FID لعينة الغاز ولعينة القياسية، عينة قماش قطني تم حرقها باستخدام الغازولين نفسه، ونفس العينة لقماش القطني تم حرقها بدون استخدام الوقود و زمن 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
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
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
21646640	390044099	7.489	2	
21749204	369035063	10.163	3	
13051560	70023218	10.342	4	
13350146	38558062	10.811	5	فياسي
				غازولين
				قماش
				قطني

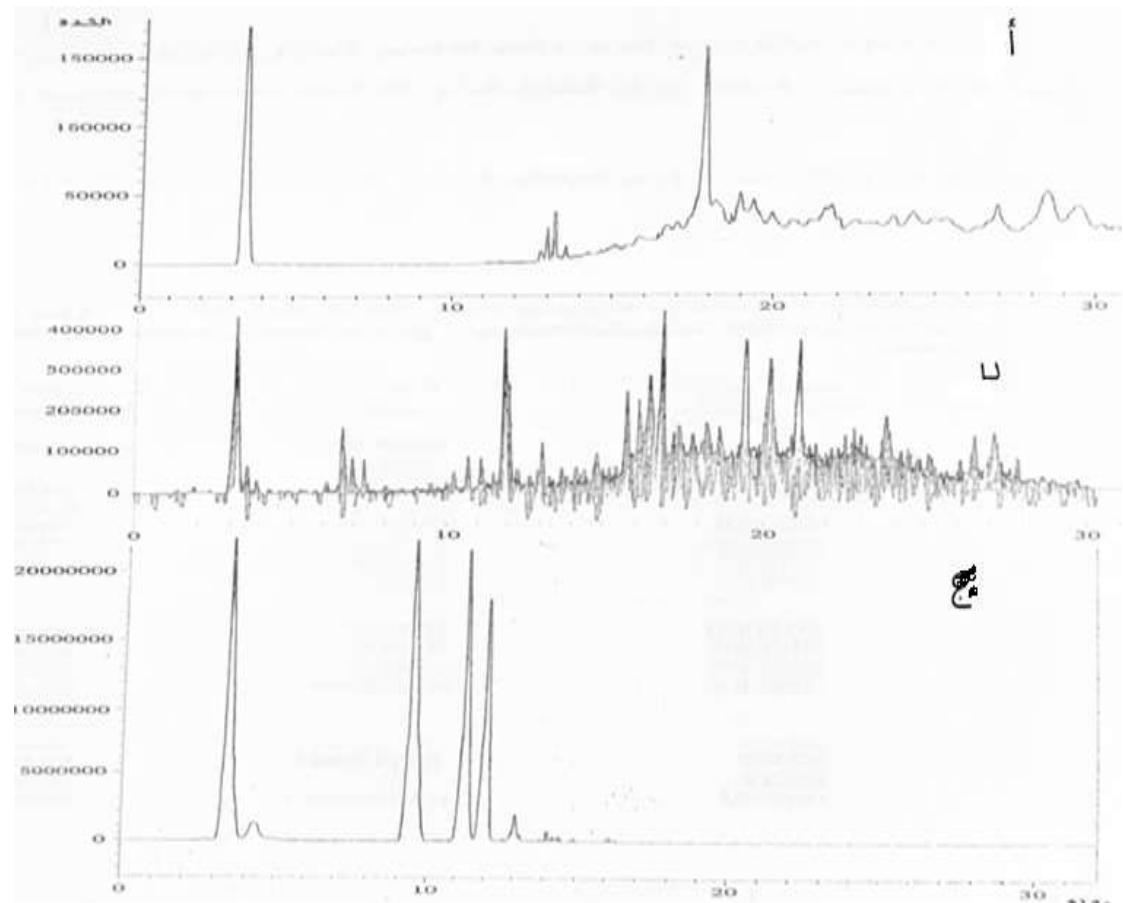


الشكل (2) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المكونة من قماش قطني. (ب) عينة من القماش القطني تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

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 و زمن الاحتباس خلال العمود.

الجدول (5) 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	
8157	74412	7.437	1	ب اثار 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 قياسى
90736	271604	8.299	2	
28148	30687	10.245	3	
13051560	70023218	10.342	4	
13350146	38558062	10.811	5	

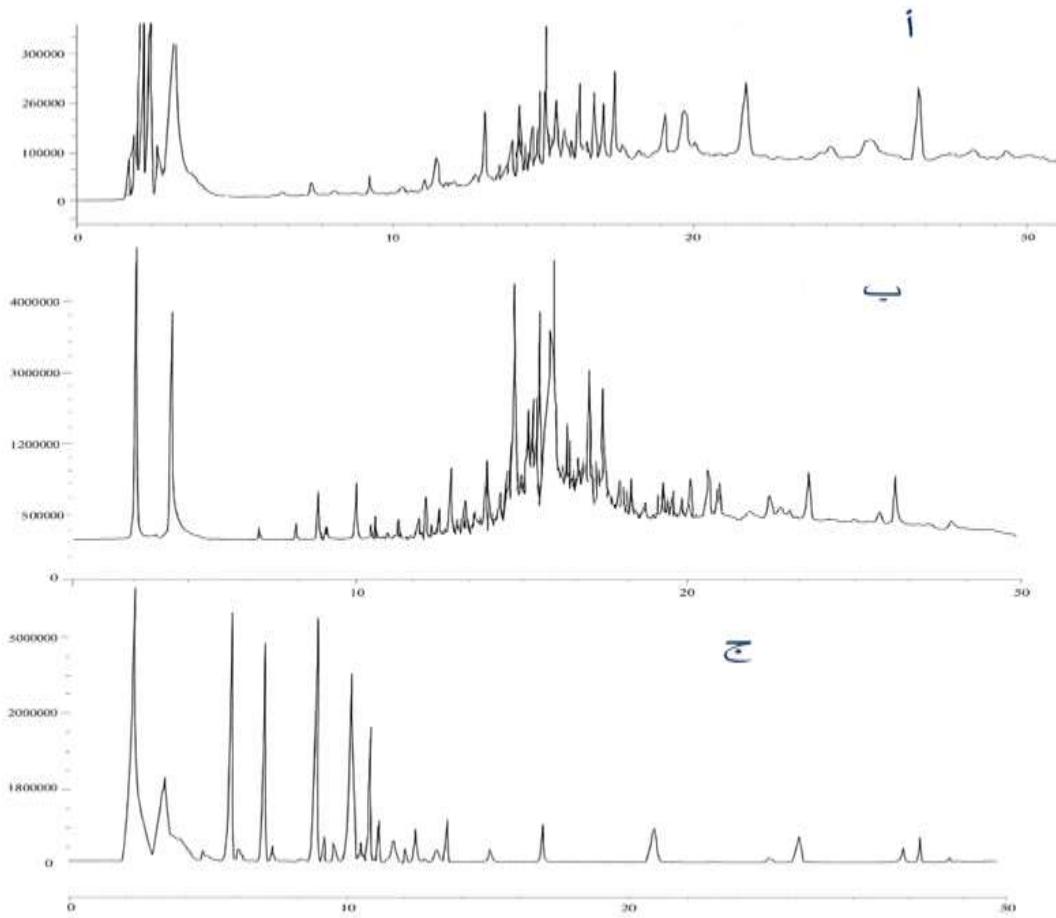


الشكل (3) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المكونة من قماش الصوفى. (ب) عينة من القماش الصوفى تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

4.1 الجداول والمخططات (4,6) يظهر نتائج GC-FID لعينة الغازولين 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 اثار 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 قياسى
449153	10302586	9.078	2	
354815	11566	11.58	3	
1273202	5870774	14.666	4	

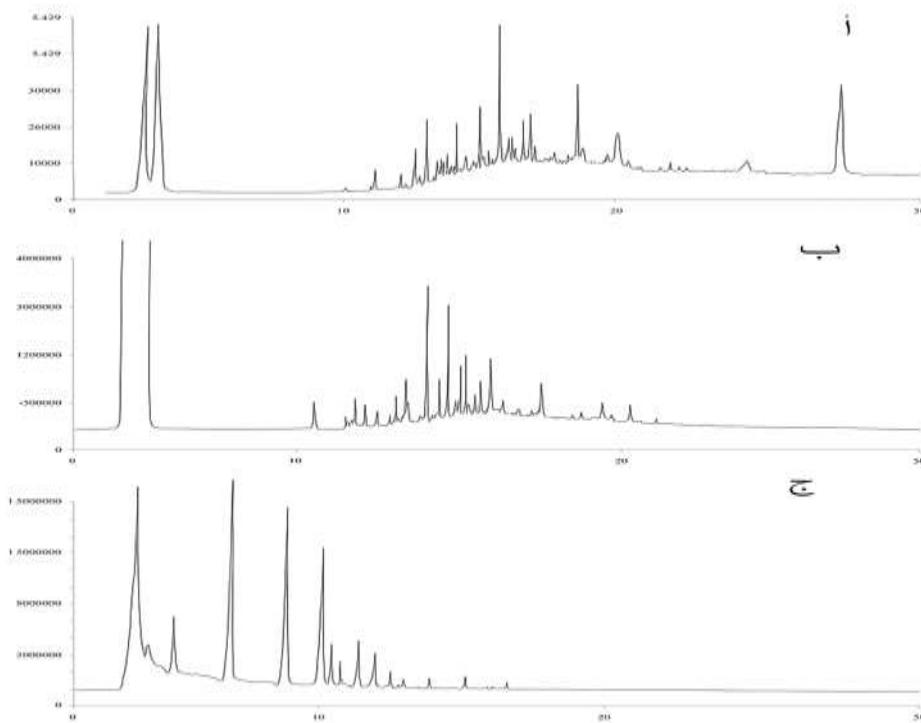


الشكل (4) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المكونة من الورق المقوى. (ب) عينة من الورق المقوى تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

5.1 الجداول والمخططات (5,7) يظهر نتائج GC-FID لعينة الغازولين 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
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 اثار 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
21646640	390044099	7.489	2	
189073	210569	9.513	3	
176133	201682	9.754	4	
قياس				غازولين

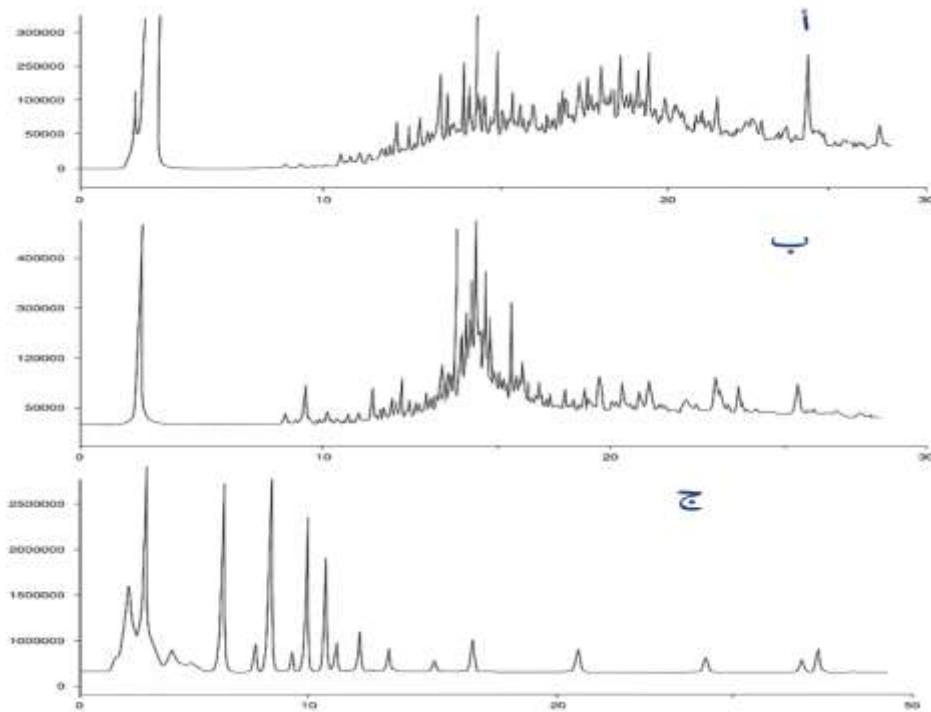


الشكل (5) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المكونة من خشب مكتبي. (ب) عينة من خشب مكتبي تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

6.1 الجداول والمخططات (6،8) يظهر نتائج GC-FID لعينة الغازولين القياسية، لوح خشبي لصالون سيارة تم حرقها باستخدام الغازولين نفسه، ونفس العينة للوح خشبي لصالون سيارة تم حرقها بدون استخدام الوقود و زمن 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	
1824260	8332422	13.394	2	
53605	2889197	14.024	3	أ لوح خلفي
1262655	4567408	14.505	4	لصالون
676587	4787360	15.046	5	سيارة
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
75850	1559166	9.757	2	في عينة لوح
55712	107681	10.281	3	خشبي لصالون
				سيارة
216440	390044099	7.489	1	ج
176133	201682	9.754	2	غازولين
28148	30687	10.241	3	قياسى



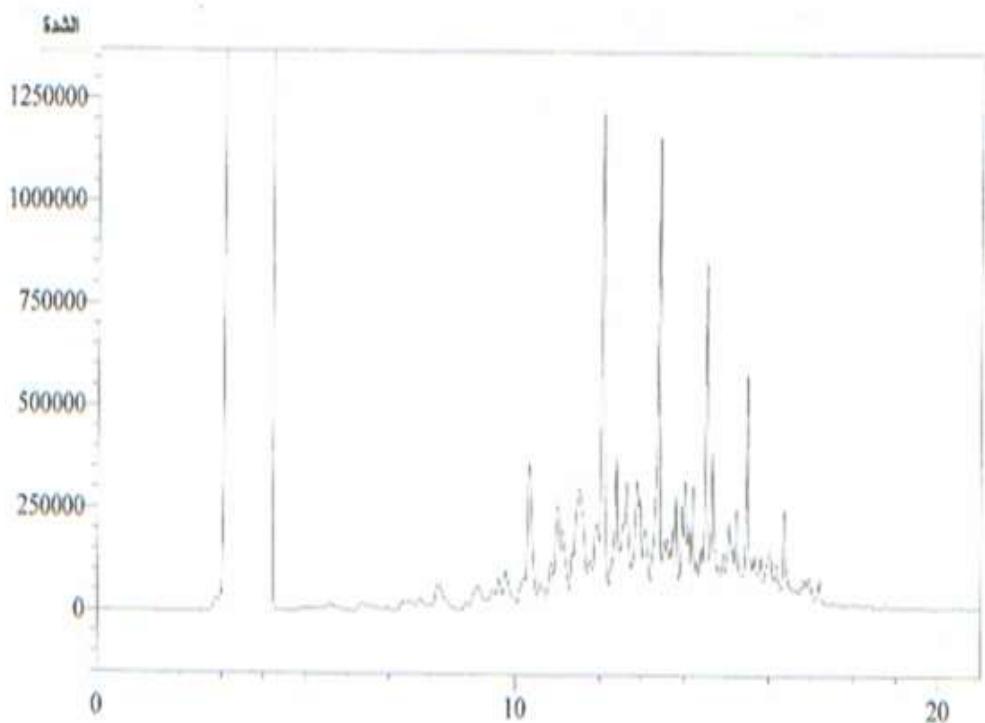
الشكل (6) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من لوح خشبي لصالون سيارة. (ب) عينة من لوح خشبي لصالون سيارة تم حرقها مع الغازولين. (ج) عينة الغازولين القياسية.

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 ولإثبات وجود متبقيات الكيروسين في العينات التي تم حرقها بهذا الوقود.

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

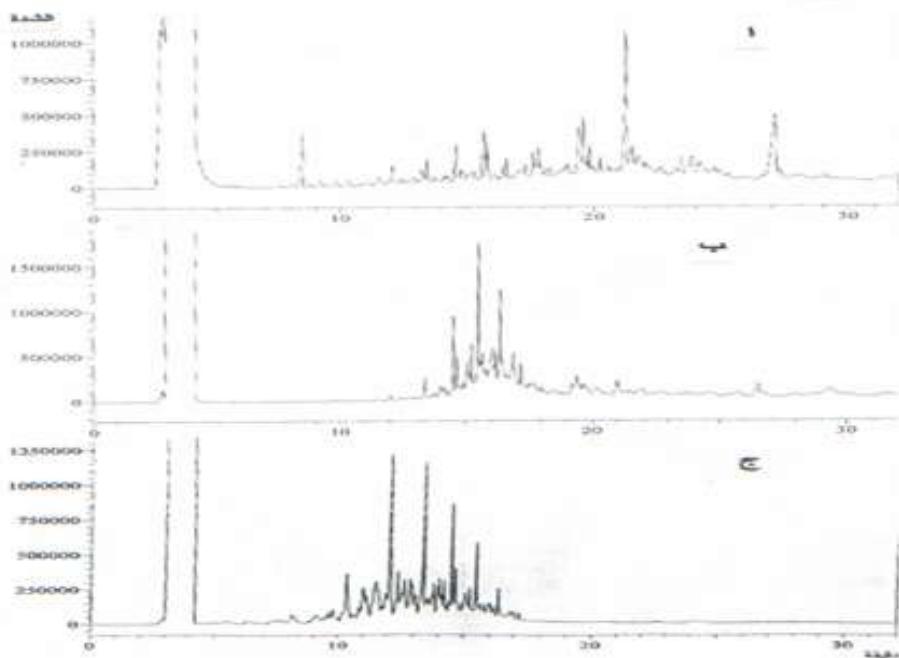
الارتفاع Height	المساحة Area	زمن الاحتباس Retention Time	Peak Number	
355658	2651699	10.316	1	الكيروسين القياسي
254908	187772	10.993	2	
1945512	1645554	11.114	3	
257095	4211031	11.507	4	
211895	1562352	11.925	5	
1212475	6170326	12.049	6	
368226	2418395	12.379	7	
313916	1982047	12.868	8	
198707	1230885	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 (10،8) 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 الكيروسين 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 كيروسين قياسى
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	

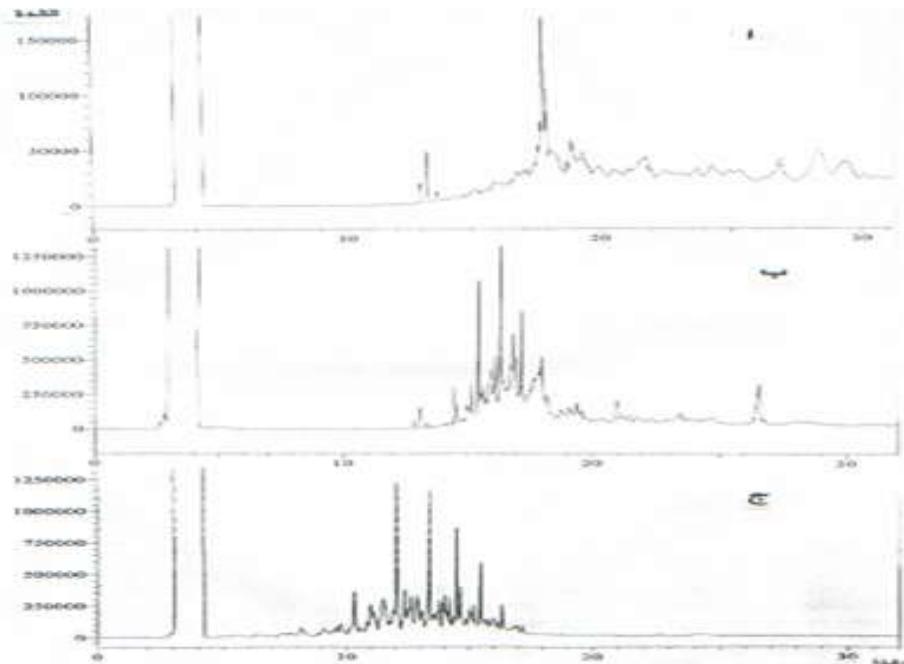


الشكل (8) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المكونة من قماش قطني. (ب) عينة من القماش القطني تم حرقها مع الكيروسين. (ج) عينة الكيروسين القياسية.

3.2 الجداول والمخططات (9) يظهر نتائج GC-FID لعينة الكيروسين القياسية، عينة قماش صوفي تم حرقها باستخدام الكيروسين نفسه، ونفس العينة للقماش الصوفي تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود.

الجدول (11) يظهر زمن الاحتباس لبعض المركبات لكل من العينات الثلاثة.

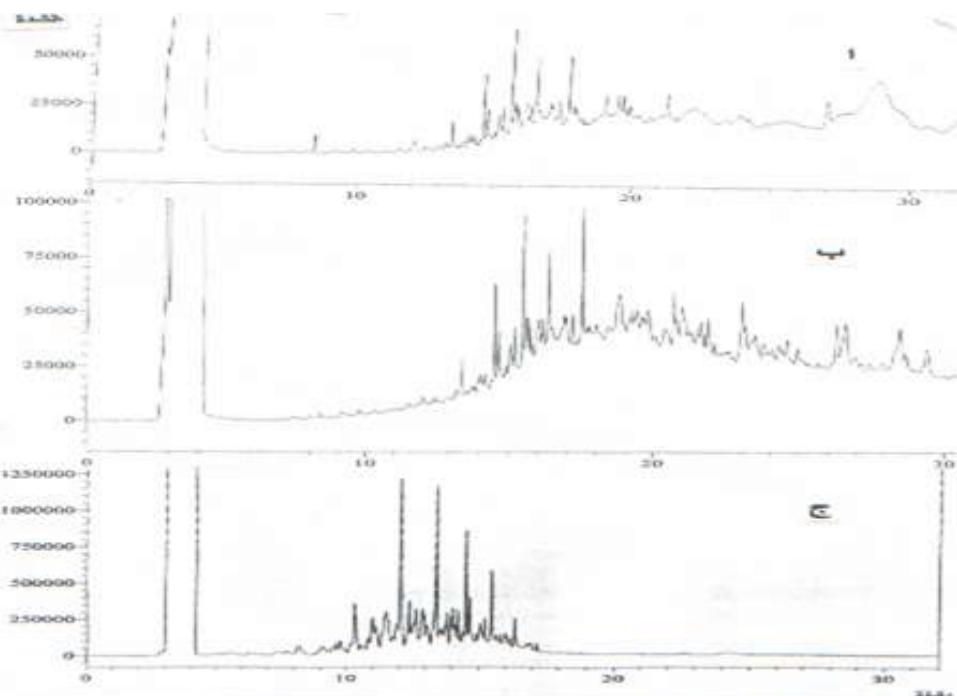
الارتفاع Height	المساحة Area	زمن الاحتباس Retention Time	Peak Number	
44771	174133	13.202	1	أ قماش صوفي
8543	29388	13.580	2	
9201	64919	15.834	3	
14989	101465	16.745	4	
20165	213673	17.452	5	
58068	267921	17.722	6	
152498	819788	17.833	7	
37007	514899	18.923	8	
61917	272652	12.862	1	ب اثار الكيروسين 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 كيروسين قياسى
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 المكونة من قماش صوفي. (ب) عينة من القماش الصوفي تم حرقها مع الكيروسين. (ج) عينة الكيروسين القياسية.

4.2 الجداول والمخططات (10,12) يظهر نتائج GC-FID لعينة الكيروسين القياسية، عينة ورق مقوى تم حرقها باستخدام الكيروسين 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
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
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
1153595	5624283	13.394	2	
153848	691718	14.403	3	
573106	2283171	15.479	4	
241967	1387077	16.356	5	

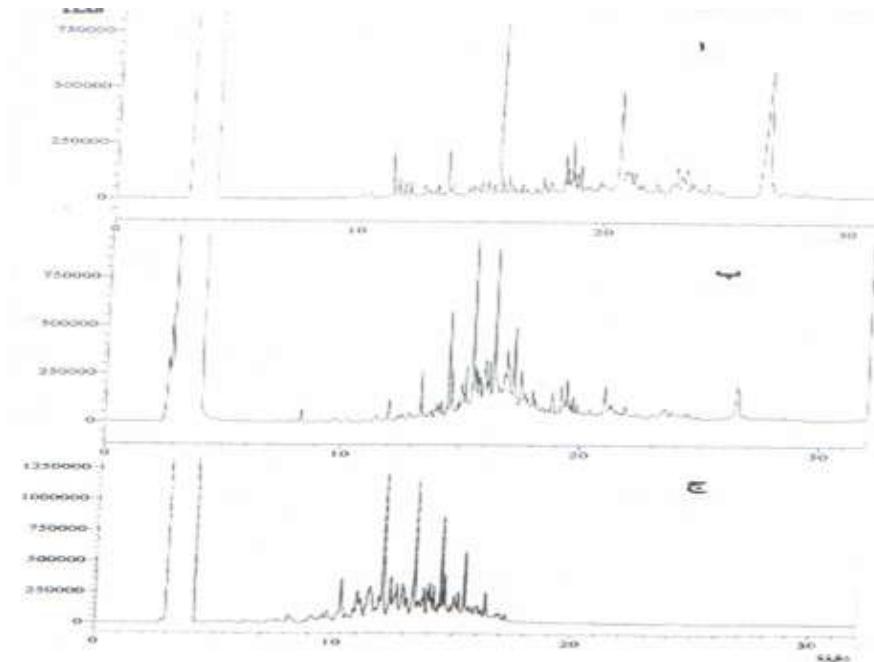


الشكل (10) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المتكونة من ورق مقوى. (ب) عينة من ورق مقوى تم حرقها مع الكيروسين. (ج) عينة الكيروسين القياسية.

5.2 الجداول والمخططات (11،13) يظهر نتائج GC-FID لعينة الكيروسين القياسية، عينة خشب مكتبي تم حرقها باستخدام الكيروسين نفسه، ونفس العينة للخشب المكتبي تم حرقها بدون استخدام الوقود وزمن الاحتباس خلال العمود.

الجدول (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 اثار الكيروسين 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 كيروسين قياسى
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	

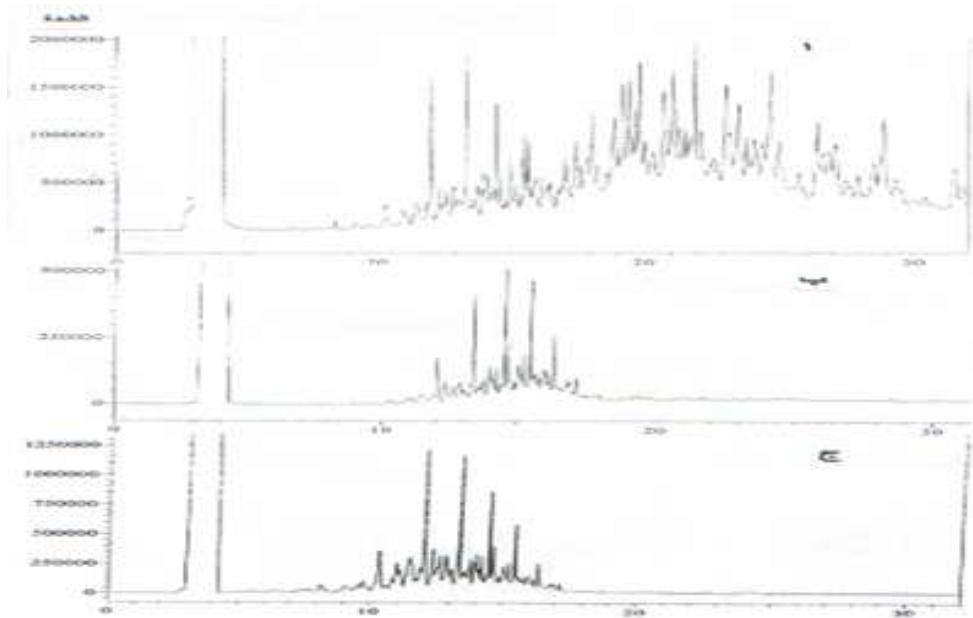


الشكل (11) مخططات GC-FID . (أ) عينة محترقة للمادة الأساسية المكونة من خشب مكتبي. (ب) عينة من خشب مكتبي تم حرقها مع الكيروسين. (ج) عينة الكيروسين القياسية.

6.2 الجداول والمخططات (12,14) يظهر نتائج GC-FID لعينة الكيروسين القياسية، عينة خشبية لصالون سيارة تم حرقها باستخدام الكيروسين 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 الكيروسين 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 كيروسين قياسى
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 المتركونة من لوح خشبي لصالون سيارة. (ب) عينة من لوح خشبي لصالون سيارة تم حرقها مع الكيروسين. (ج) عينة الكيروسين القياسية.

مناقشة النتائج (Discussion)

كفاءة التحديد النوعي وموثوقية البصمة الكيميائية أظهرت النتائج التحليلية المستخلصة باستخدام تقنية كروماتوغرافيا الغاز المزودة بكاشف التأين اللهبي (GC-FID) كفاءة عالية في الكشف النوعي عن متبقيات الغازولين والكيروسين في العينات المحترقة. إن التطابق الملحوظ بين أزمنة الاحتفاظ $t_{R\$}$ (المركيبات القياسية وتلك المستخلصة من نماذج المحاكاة يؤكد موثوقية هذه التقنية في التعرف على المسرفات الكيميائية حتى بعد تعرضها لظروف الاحتراق الواقعية. وبالنسبة، فإن خلو العينات المحترقة ذاتياً (عينة الضابطة) من أي قم مماثلة، يعزز الفرضية العلمية بأن متبقيات الوقود الهيدروكربوني تعمل "ببصمة كيميائية" مستقرة نسبياً، مما يمنحها قيمة إثباتية عالية في التحقيقات الجنائية المتعلقة بالجرائم العمدية.

تأثير الركيزة وسلوك المركبات الكروماتوغرافي كشفت الدراسة أن أزمنة الاحتفاظ للغازولين تأثرت بشكل طيف بطبيعة الوسط الحامل (الركيزة)، حيث لوحظت اختلافات بسيطة في موقع القمم بين القماش، الورق، والخشب. يُعزى ذلك علمياً إلى ما يُعرف 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 الكيروسين نمط قمم أكثر استقراراً وانتظاماً عبر مختلف المواد، مما يعكس ثبات سلوكه الكروماتوغرافي نظراً لاحتواه على سلاسل هيدروكربونية أثقل وأقل تطايرًا مقارنة بالغازولين.

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

ال tüوصيات الجنائية والأفاق المستقبلية تثبت الدراسة أن تقنية GC-FID تعد أداة فحص أولى (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) "للتقليل 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 المتركونة بمتغير الكتلة (GC-MS) لضمان التحديد الجزيئي القاطع. وفي الختام، يقترح توسيع نطاق البحث ليشمل وقود الديزل ودراسة أثر وسائل 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 المعتمدة، وذلك من خلال التطابق الواضح في أزمنة الاحتباس بين المركبات القياسية وبين المركبات المفصولة من العينات المحترقة بالوقود. وقد أثبتت المقارنات أن العينات التي أحرقت دون إضافة سوائل مشتعلة لا تُظهر أي قيم مطابقة للغازولين أو الكيروسين، مما يؤكد موثوقية التقنية في التمييز بين الحرائق المعتمدة والحرائق التي لا تستخدم فيها مواد مسّعة 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. وتوكّد هذه المعطيات أهمية التحليل الكروماتوغرافي كأدلة أساسية في التحقيقات الجنائية المتعلقة بمسبيات الحرائق، لما يوفره من أدلة دقيقة يمكن الاعتماد عليها في تحديد نوع الوقود المستخدم وربط العينة بمصدر الاشتعال.

ثُبّرّت هذه الدراسة الدور الحيوي لتقنيات الفصل والتحليل الكيميائي في كشف آثار الوقود في مسارات 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", Floridain 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.com/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 literature review*.

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.nauss.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-elapsed 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.