عزل الانفجار الغباري الأوّلي بين مطاحن الحبوب وصوامع تخزينها عبر الأنفاق

د. أحمد صالح العوض[1]

الملخص

تحدثُ الانفجارات الغبارية في الكثير من المنشآت الصناعية كمصانع السكر والحليب المجفّف ومناجم الفحم ومعامل الأدوية ومعامل الورق والمخابز ومطاحن الحبوب وصوامع تخزين الحبوب وغيرها الكثير الكثير. إنّ الانفجارات الغبارية في الواقع هي سلسلة متعاقبة من الانفجارات الأوّلية والثانوية؛ بحيث يحدث بدايةً الانفجار الغباري الأوّلي فيتبعه سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية أشدّ خطراً وتدميراً، فلم يعد يخفى على ذي بصيرة خطر الانفجارات الغبارية وما تسبّبه من كوارث بشرية ومادية يصعب تخيّلها في كثير من الأحيان. إنّ سببَ حدوثها هو تفاعل أغبرة المادة المتناثرة في الهواء والقابلة للاشتعال كغبار القمح أو غبار الدقيق مع أكسجين الهواء بوجود مصدر اشتعال ضمن حيّزٍ مغلق.

يهدف البحث إلى عزل الانفجار الغباري الأوّلي ومنع امتداده وانتشاره عبر الأنفاق بين مطاحن الحبوب وصوامع تخزين الحبوب ومنع وصوله للطرف الآخر، ومن ثمَّ تجنب حدوث سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية؛ وذلك عن طريق حلول علمية وفنية حديثة مبتكرة بإنشاء حواجز بيتونية مسلّحة أو معدنية ضمن النفق تميل بزاوية (^{0} 150) بسماكة (10 cm) وفتحة تنفيس الانفجار الغباري الأوّلي فوق النفق؛ وهي عبارة عن رقائق من الألمنيوم وشبك معدني بحيث تتمزق وتفتح عند أي زيادة طفيفة في الضغط داخل النفق تزيد عن الضغط الجوي؛ للسماح لموجتي الضغط واللهب بالخروج من خلال فتحة التنفيس للوسط المحيط ، وعدم وصول الانفجار الغباري الأوّلي إلى الطرف الآخر.

جرى تصميم وتنفيذ نموذج يحاكي الواقع في مطاحن الحبوب وصوامع تخزينها؛ والنموذج عبارة عن صومعة ومطحنة ونفق بينهما ووشيعة اشتعال كهربائية كمصدر للشرارة وضاغط هواء لنثر الغبار بحركة مضطربة؛ وذلك من أجل إجراء التجارب العملية وبيان مدى فعالية الحواجز المائلة وفتحات التنفيس في عزل الانفجار الغباري الأوّلي ومنع انتشاره وتجنب حدوث سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية؛ تمّ إجراء التجارب العملية على مرحلتين: أمّا الأولى فقد تمّ إجراؤها دون وجود حواجز مائلة وفتحات تنفيس لإظهار كيفية انتقال الانفجار الغباري الأوّلي من الصومعة إلى المطحنة عبر النفق وتحوّله إلى انفجار غباري ثانوي، وأمّا الثانية فقد تمّ إجراؤها مع وجود حاجز ضمن النفق يميل بزاوية (^{0} 150) عن خط الأفق ووجود فتحة لتنفيس موجتي الضغط واللهب الناتجتين عن الانفجار الغباري الأوّلي ومنع وصوله من الصومعة إلى المطحنة ؛ وقد تمّ اعتماد الطريقة السويدية المتبعة عالمياً من أجل حساب مساحة فتحة التنفيس اللازمة والكافية لخروج موجة الضغط وفق العلاقة الرياضية ($A = \frac{0.019}{P_{red}^{0.5}} \cdot V^{0.635}$).

وأخيراً أثبتت النتائج التجريبية أنّ الحواجز المائلة بزاوية (^{0} 150) ضمن النفق مع وجود فتحة لتنفيس موجتي الضغط واللهب الناتجتين عن الانفجار الغباري الأوّلي عزلت الانفجار الغباري الأوّلي ومنعت وصوله من الصومعة إلى المطحنة، حيث تؤدي هذه الطريقة الفنية الحديثة والمبتكرة إلى تغيير مسار موجتي الضغط واللهب وخروجهما عبر فتحة التنفيس للوسط المحيط، ومنع حدوث سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية، ومن ثمَّ الحفاظ على الأرواح البشرية والمنشآت الاقتصادية المهمّة كالمطاحن والصوامع؛ كما وتتمتع هذه الطريقة ببساطة وسهولة التصميم وذات تكلفة مادية منخفضة.

[1] دكتوراه في الهندسة الميكانيكية– قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلة– مطحنة اليرموك بدرعا.

الكلمات المفتاحية: عزل الانفجار الغباري الأوّلي، سلسلة الانفجارات الغبارية الثانوية، حواجز مائلة، فتحة تنفيس موجتي الضغط واللهب.

The isolation Of primary dust explosion between grain mills and Thier storage silos across tunnels

Dr. Ahmad Saleh Al-Awad[(1)]

Abstract

Dust explosions occur in many industrial facilities, including sugar and powdered milk factories, coal mines, drug factories, paper factories, bakeries, grain mills, grain storage silos and many others. By definition, dust explosions are a successive series of primary and secondary explosions, where the primary dust explosion occurs at the beginning, followed by a successive series of secondary dust explosions, which are more dangerous and destructive. The danger of dust explosions and their catastrophic human and physical repercussions are self-evident. They occur as a result of the reaction of flammable dust particles, such as wheat or flour dust, suspended in the air with oxygen, with a source of ignition in a closed chamber.

This research aims to explore how to isolate the primary dust explosion and prevent it from spreading and across the tunnels between the grain mills and grain storage silos and reaching the other side and consequently avoiding the occurrence of a series of secondary dust explosions. This will be done through innovative modern scientific and technical solutions by creating reinforced concrete or metal barriers within the tunnel inclined at an angle 150 ^{0} with a thickness of 10 cm and a primary dust explosion vent above the tunnel. The vent is made up of aluminum flakes and a metal grid that breaks open at any slight increase in pressure inside the tunnel exceeding atmospheric pressure to allow the blast and flame waves to come out through the vent and prevent the primary dust explosion from extending to the other side.

To this end, a real-life demonstration that simulates what happens in grain mills and grain storage silos was designed and implemented. The demonstration consists of a silo, a mill, a tunnel between them, an electrical ignition coil as a source of spark and an air compressor to distribute dust in a turbulent movement. The aim is to implement experimental tests and show the effectiveness of inclined barriers and vents in isolating the primary dust explosion, preventing its propagation and eventually avoiding the potential successive series of secondary dust explosions. Experimental tests were carried out in two steps: the first was implemented without inclined barriers and vent to show how the primary dust explosion from the silo to the mill passes through the tunnel and turns into a secondary dust explosion, and the second one is made with the presence of barriers within the tunnel inclined at an angle of 150^0 from the horizon line and the presence of a vent to exit the blast and flame waves resulting from the primary dust explosion and prevent it from passing from the silo to the mill. The Swedish method, adopted worldwide, was used to calculate the necessary and sufficient vent opening area for the pressure wave to exit according to a mathematical equation. $A = \frac{0.019}{P_{red}^{0.5}} \cdot V^{0.635}$

Finally, the experimental results showed that the inclined barriers at an angle of 150 ^{0} within the tunnel, along with the vent to release the pressure and flame waves resulting from the primary dust explosion, were able to isolate the primary dust explosion and prevent it from reaching from the silo to the mill. This modern and innovative method help change the pathway of the pressure and flame waves so as to be released through the vent and out to the surrounding atmosphere, and thus prevent a succession of a series of secondary dust explosions, saving human lives and important economic facilities. In addition, this method is simple, easy to design and cost effective.

[(1)] **Ph.D., Mechanical Eng., Dept. Automotive & Heavy Vehicles Eng., Al-Yarmouk Mill, Dara'a City .**

Key words: primary dust explosion isolation, series of secondary dust explosions, inclined barriers, blast and flame waves vent.

1- المقدّمة:

تتعرض مطاحن الحبوب وصوامع تخزين الحبوب بشكل عام نتيجة العمليات الإنتاجية والصناعية لمخاطر الانفجارات الغبارية المدمّرة؛ التي تحدُثُ بسبب تفاعل غبار القمح أو غبار الدقيق مع أوكسجين الهواء في حال توافر مصدر اشتعال ضمن حيّز مغلق. لا تحدثُ الانفجارات الغباريّة في صوامع ومطاحن الحبوب فحسب بل تحدثُ في كثير من المنشآت الصناعيّة ،كمعامل العلف، والمخابز، ومعامل السّكر، ومعامل الأدويّة، ومعامل الورق والخشب، وغيرها الكثير. فلمْ يعد يخفى على متبصر لمخاطر الانفجارات الغبارية المدمّرة وما تُسبّبه من خسائر بشرية، وخسائر مادية جسيمة تصل في كثير من الأحيان إلى مئات الملايين وربما أكثر من ذلك حسب شدة الانفجار.

إنّ من أهمّ مسؤوليات الباحثين في الانفجارات الغباريّة الحفاظ على الأرواح البشريّة والمنشآت الصناعية والإنتاجية من مخاطر هذه الظاهرة المدمّرة عن طريق اتّخاذ كافة الإجراءات والتدابير الفنية والعلمية اللازمة للوقاية من خطرها.

تتصل بعض مطاحن القمح بصوامع تخزين القمح بنفق؛ وذلك من أجل سحب الأقماح بوساطة سلسلة جرّ الأقماح الموجودة ضمن النفق من الصوامع إلى المطاحن، ينتقل الانفجار الغباري الأوّلي فيما لو حدث بالمطحنة أو بالصومعة إلى الطرف الآخر عبر النفق مسبِّباً سلسلة من الانفجارات الغبارية الثانوية المتعاقبة، ينتج عنها خسائر بشرية ومادية كبيرة، وحرصاً على سلامة الأرواح البشرية وحفاظاً على منشآتنا الصناعية والإنتاجية، تمّ البحث بشكلٍ علمي وفني بطرائق علمية وفنية من شأنها عزل الانفجار الغباري الأوّلي ومنع امتداده عبر الأنفاق ومنع وصوله إلى الطرف الآخر لتجنّب حدوث انفجارات غبارية ثانوية متتالية أشد خطورة وأكثر تدميراً.

2- الهدف من البحث:

يهدف البحث إلى عزل الانفجار الغباري الأوّلي بطرائق فنية وعلمية حديثة، ومنع امتداده وانتشاره عبر الأنفاق بين الصوامع والمطاحن وبالعكس، وتجنّب حدوث سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية وذلك لحماية الصوامع والمطاحن، والحد من مخاطر هذه الظاهرة المدمّرة ما أمكن وذلك بإنشاء حواجز بيتونية مسلّحة أو معدنية ضمن النفق تميل بزاوية (^{0} 150) عن خط الأفق وفتحات تنفيس ضغط الانفجار الغباري الأوّلي لتنفيس موجتي الضغط واللهب ومنع وصولهما إلى الطرف الآخر.

3- أهميَّة البحث:

تكمن أهمية البحث في عدة نقاط أبرزها:

a. إيجاد الحلول الفنية والعلمية المناسبة لمنع تحوّل الانفجارات الغبارية الأوّلية إلى سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية؛ وعزلها ومنع امتدادها بين الصوامع والمطاحن ضمن الأنفاق الواصلة بينهما.
b. حماية المطاحن والصوامع من مخاطر الانفجارات الغبارية والحد من الخسائر البشرية والمادية ما أمكن.
c. بساطة التصميم وسهولته.
d. تكلفة مادية منخفضة.
e. الجِدة والابتكارية ، وقابليته للتطبيق الصناعي.

4- مشكلة البحث:

تكمن المشكلة في عمل المطاحن والصوامع الإنتاجية في عدة نقاط أبرزها:

a. وجود الأنفاق بين الصوامع والمطاحن من أجل سحب الأقماح لاستمرار العملية الإنتاجية.
b. توافر كميّات كبيرة من غبار القمح في المطاحن والصوامع نتيجة عمليات تنظيف الأقماح وغربلتها. فضلاً عن ذلك توافر كميات كبيرة من غبار دقيق القمح في المطاحن.
c. توافر كميّات كافية من أوكسجين الهواء اللازم لتفاعلات الاحتراق.
d. توافر مصادر الاشتعال نتيجة العمليات الصناعية والإنتاجية؛ كمصادر الاشتعال المباشرة مثل: القص والجلخ وعمليات اللحام وغيرها، ومصادر الاشتعال غير المباشرة مثل: الشرارة الكهربائية، والكهرباء الساكنة، والاحتكاك الميكانيكي.

5- مفهوم عمليتي الاحتراق والانفجارات الغبارية:

أوّلاً: مفهوم عمليَّة الاحتراق:

الاحتراق: هو تفاعلٌ كيميائيٌّ بين مادتين يَنتج عنه حرارة وغازات، ويصحبه لهبٌ، وغالباً ما يكون أحد المادتين هو الأوكسجين، وتَحدث عمليَّة الاحتراق عادةً برفع درجة حرارة مادة ما إلى درجةِ حرارةِ الاشتعال في ظلِّ توافر كميَّة كافية من الأوكسجين، وتنطلق كميَّة من الطاقةِ الحراريَّةِ؛ تعتمد على كميَّة المادة المحترقة، وتُسمى حرارة الاحتراق، عند احتراق مادة ما مكوَّنة من الهيدروكربونات كغبار الدقيق والنشاء وغبار الذرة وغيرها من المواد العضوية الطبيعية والمواد الاصطناعية الناتجة من المواد العضوية كالبلاستيك والأصباغ والمبيدات الحشرية، فإنّ الكربون الموجود في المادة يتفاعل مع الأوكسجين منتجاً غاز ثاني أكسيد الكربون، كما يتفاعل الهيدروجين الموجود في المادة أيضاً مع الأوكسجين منتجاً بخار الماء، وينتج عن هذا التفاعل حرارة مرتفعة. تُبيّن المعادلة الآتية الصيغة العامة لتفاعل الهيدروكربونات مع الأوكسجين:

$$C_xH_y + (x + y/4)O_2 \rightarrow xCO_2 + (y/2)H_2O$$

والجدير بالذكر أنّ نسبة الهيدروكربونات في حبة القمح تبلغ (77-87%) من وزنها على أساس المادة الجافة.[1-2]

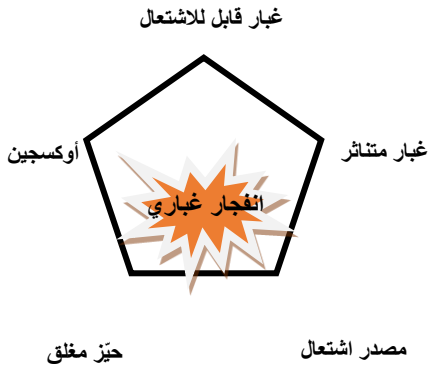
ثانياً: طبيعة الانفجارات الغباريَّة:

a. **تعريفُ الانفجار:** في الواقع هناك أكثر من تعريف للانفجار، ويُعرَّف الانفجار في تعريفين: أمَّا الأوَّل فيركّز على الضَّجيج القويّ الصَّادر عن موجة الضَّغط الهائلة أو موجة الانفجار؛ في حين يُعدُّ التركيز على تحرُّر الطَّاقة الكيميائيَّة أو الميكانيكيَّة المُسبّبة لموجة الضَّغط ثانوياً. يتوافق هذا التعريف مع المعنى الحقيقيّ لكلمة "الثَّوران المفاجئ". [1]

أمَّا التَّعريف الثاني فيركّز على الانفجارات التي يُسبِّبها تحرُّر الطَّاقة الكيميائيَّة؛ يتضمن هذا التعريف انفجارات الغازات والغبار والمواد الصَّلبة، فالانفجار وفقاً لهذا التعريف هو عمليَّةُ كيميائيَّة فرط حراري (Exothermal Process) [2] تُسبِّب ارتفاعاً هائلاً ومفاجئاً في الضَّغط. وفقاً لذلك يتمُّ التَّركيز في تعاريف الانفجارات على أحد أمرين: إمَّا السَّبب أو النَّتيجة؛ أي على مسبِّبات الانفجار: وهو الطاقة الكيميائيَّة، أو على نتائج الانفجار: وهو موجة الضغط الهائلة (Blast Wave). [2]

b. **تعريف الانفجار الغباريّ:** هو أيُّ مادة صلبة تحترق في الهواء، تُحدِث زيادة في السُّرعة والضَّغط، وتتناسب شدَّة الانفجار طرداً مع صغرِ حجم المادة الصَّلبة؛ أيّ عندما يكون حجم الجسيمات الصَّلبة صغيراً جداً، ومتناثرة في الهواء، ومع وجود كميَّة كافية من الأوكسجين، فإنَّ معدَّل الاحتراق يكون سريعاً جداً، والطَّاقة اللازمة لحدوث الاشتعال تكون صغيرة جداً؛ لذلك فإنَّ

اشتعال كميَّة من غبار القمح أو الدقيق المتناثر في الهواء تُحدِث انفجاراً غباريَّاً هائلاً، تَتسبَّب الانفجارات الغباريَّة بكوارث بشريَّة وماديَّة جسيمة؛ يصعب تخيُّلها في كثير من الأحيان. [2-3]. ولحدوث الانفجار الغباري لا بدّ من توافر خمسة شروط بلحظة واحدة، وهي: غبار قابل للاشتعال– غبار متناثر– أوكسجين– مصدر اشتعال– حيّز مغلق؛ تُسمى الشروط الخمسة هذه بمخمّس الانفجار؛ يُبيّن الشكل رقم (1) مخمس الانفجار الغباري.[10]



الشكل رقم (1) مخمّس الانفجار الغباري

وفي حال اجتماع العناصر الأربعة بلحظة واحدة ضمن حيّز مفتوح يحدث حريق وليس انفجاراً.

c. المواد الَّتي تُسبِّب انفجارات غباريَّة:

- المواد العضويَّة الطَّبيعيَّة (حبوب كالقمح – كتان – سكر – فحم– حليب مجفَّف...إلخ).
- المواد العضويَّة الاصطناعيَّة (البلاستيك – الأصباغ – المبيدات الحشريَّة...إلخ).
- المعادن (الألمنيوم – الزِّنك – المغنزيوم....إلخ).[1-4]

d. **العواملُ المؤثِّرةُ في شدَّة الانفجارِ**: إنَّ من أهمِّ العوامل المؤثِّرة في شدَّة الانفجار هي حجم الجسيمات وشكلها ومساحة السَّطح النَّوعيِّ للغبار، فضلاً عن ذلك فهناك عوامل مهمَّة تُؤثِّر في شدَّة الانفجار منها:[2-5]

- التركيبُ الكيميائيُّ للغبار (نسبة الكربون والهيدروجين في المادة ونسبة الرُّطوبة).
- درجة الحرارة والضَّغط الأوَّليَّين.
- النِّسبة المئويَّة للغبار المُتناثر في الهواء.
- تركيز الغبار وتوزُّعه في الهواء، أي تجانس الخليط من عدمه.
- الحركة المُضطربة الأوَّليَّة للغبار.
- توليد الحركة الاضطرابيَّة في الأجزاء غيرِ المحترقة من غمامة الغبار (موقع مصدر الاشتعال له دور مهم).
- تشوُّه جبهة اللَّهب.
- انتقال الحرارة بالإشعاع (يعتمد ذلك على درجة حرارة اللَّهب؛ والَّذي يعتمد بدوره على التَّركيب الكيميائيِّ للجسيمات).

e. آلية حدوث الانفجارات الغبارية الثانوية:

تحدث الانفجارات الغبارية وفق سلسلة متعاقبة من الانفجارات ،تتألف من انفجار أوّلي يتبعه سلسلة من الانفجارات الغباريّة الثانوية.[5-7]

إنَّ الهدفَ المهمّ من السَّيطرة والتَّحكم بالانفجار الغباريّ هو الحدُّ أو التَّقليل من الانفجارات الأوّلية (Primary Dust Explosions) ضمن الآلات والتجهيزات الميكانيكيَّة، في حين يكون الهدف الأكثر أهميَّة هو تجنُّب حدوث الانفجارات الغبارية الثانويَّة (Secondary Dust Explosions)، لأنَّ موجة الانفجار (Blast Wave) النَّاتجة عن الانفجار الأوّلي تَسحب معها رواسب الغبار المتراكم على الأرضيات وعلى التجهيزات الميكانيكيَّة والكهربائيَّة مُسبِّبةً انفجاراً ثانويَّاً أشدَّ، وأكثر خطورة من الانفجار الأوّلي كما هو مبيّن في الشكل الآتي رقم (2)، كما يمكن للانفجار الأوّلي أنْ ينتقلَ عبر الأنفاق الواصلة بين المطاحن والصوامع مسبّباً انفجارات ثانوية مدمّرة.[7-8]

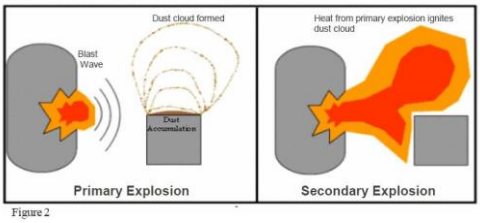


Figure 2

الشَّكل (2) آليَّة تعاقب الانفجارات الغباريَّة الثَّانويَّة

تسير موجة الضغط الناتجة عن الانفجار الأوّلي بسرعة أعلى من سرعة موجة اللهب؛ تُسبّب موجة الضغط تناثراً للغبار الموجود في طريقها؛ فتتبعها موجة اللهب التي تؤدي إلى اشتعال الغبار المتناثر في الهواء مما ينتج عنه انفجارات غبارية ثانوية. كما هو ملاحظ في الشكل رقم (2). كما تُسبِّب موجة الانفجار الأوَّليَّة زيادة واضحة في الضَّغط؛ الأمر الَّذي يؤدي إلى حدوث اهتزازات قويَّة في البناء ،ونتيجة لذلك يتناثر الغبار العالق على جدران البناء وعلى سطوح الآلات الميكانيكيَّة والتجهيزات الكهربائيَّة مُسبِّباً انفجارات ثانويَّة أخرى.[6]

f. **تركيزُ الغبارِ القابل للانفجار**: يُعرَّف تركيز الغبار على أنَّه كتلة الغبار في واحدة الحجم؛ وواحدته (g/m^3)، لا يمكن للغبار أنْ يُحدِثَ انفجاراً ما لم يكن تركيز الغبار ضمن حدود معينة (ضمن التَّركيز القابل للانفجار) أو ما يُعرف بالتركيز الأدنى المدمّر (Minimum Concentration). إنّ المجالَ القابل للانفجار يمتدُّ من ($50\text{-}100\ g/m^3$) إلى ($2\text{-}3\ kg/m^3$) أي ضمن مجال ضيِّق جداً. ويعدُّ المجال الأوَّل مجالاً فقيراً بالغبار وغنيَّاً بالأوكسجين، في حين يعدُّ المجال الثاني غنيَّاً بالغبار وفقيراً بالأوكسجين. تختلف حدود تركيز الغبار الأدنى القابل للانفجار باختلاف المادة، فعلى سبيل المثال: إنَّ التركيزَ الأدنى لغبار القمح والدقيق هو ($50\text{-}70\ g/m^3$)، وأعلى من ذلك يكون الانفجار أشدّ خطورة.[2]

g. **الانفجارات الغبارية في أمريكا:**

حصلَ في أمريكا العديد من الانفجارات الغبارية في الصوامع ومطاحن العلف ومطاحن الدقيق وغيرها. يُبيّن الجدول رقم (1) إحصائية الانفجارات الغبارية في أمريكا بين عامي (1996) و (2005).[2]

الجدول رقم (1) إحصائيات الانفجارات الغبارية في أمريكا

عدد الانفجارات	106
عدد الموتى	16
عدد الجرحى	126
عدد المنشآت	
الصوامع	51
مطاحن العلف	25
مطاحن الذرة	4
مطاحن الأرز	1
أخرى	21

يُبيّن الشكلان رقم (3) و(4) انفجاراً غبارياً في صوامع (DeBruce) الأمريكية، والتي تعدّ من أكبر الصوامع في العالم؛ وتتألف من (310) خلية.

الشكل رقم (3) انفجار غباري في صوامع (DeBruce)

الشكل رقم (4) انفجار غباري في صوامع (DeBruce)

كما حدث أيضاً في أمريكا في عام (2003) انفجار غباري في مصنع (Services West Pharmaceutical) للأدوية، أدّى إلى وفاة (6) عمال، ودمار هائل في المصنع أدّى إلى إغلاقه نهائياً. يُبيّن الشكل رقم (5) منظراً للمصنع الدوائي المدمّر.

الشكل رقم (5) منظراً للمصنع الدوائي المُدمّر

وهناك الكثير الكثير من الانفجارات الغبارية حدثت في العالم كبريطانيا وإيطاليا وفرنسا وأستراليا وغيرها من البلدان. [1]

h. الانفجارات الغبارية في سوريا:

حدث انفجار غباري في عام (1999) في مطحنة اليرموك بدرعا أدّى إلى وفاة (19) شخصاً؛ وجرح (25) آخرين؛ معظم جروحهم حروق خطيرة.

أدّى إلى أضرار مادية في البناء والتجهيزات الميكانيكية والكهربائية قُدّرت بمئة مليون ليرة سورية آنذاك. فضلاً عن ذلك سبّب الانفجار كوارث إنسانية كبيرة وتوقف العملية الإنتاجية في المطحنة مدة عامين ونيّف.

وفي عام (2005) حصل انفجار غباري في صومعة حبوب في مرفأ اللاذقية؛ أدّى إلى وفاة (16) شخصاً، وخسائر مادية كبيرة كتدمير المبنى الملاصق للصومعة، وانهيار البرج المعدني المؤلف من سبع طبقات [9]. وغيرها العديد من الانفجارات على امتداد الجغرافية السورية في مدن سورية. يُبيّن الشكلان (6) و(7) بعض مشاهد الانفجارات الغبارية في سوريا.

الشكل رقم (6) تدمير كامل لبلاطة في قسم الطحن

الشكل رقم (7) تدمير سطح عنابر التخزين

6- مرحلة التصميم:

- **مقدّمة:**

يوجد في الجمهورية العربية السورية العديد من مطاحن القمح مشادة بجانب صوامع تخزين القمح والمرتبطة ببعضها بنفق من أجل سحب الأقماح بوساطة سلسلة جرّ الأقماح من الصوامع إلى المطاحن كما هو مبيَّن في الشكل رقم (8).

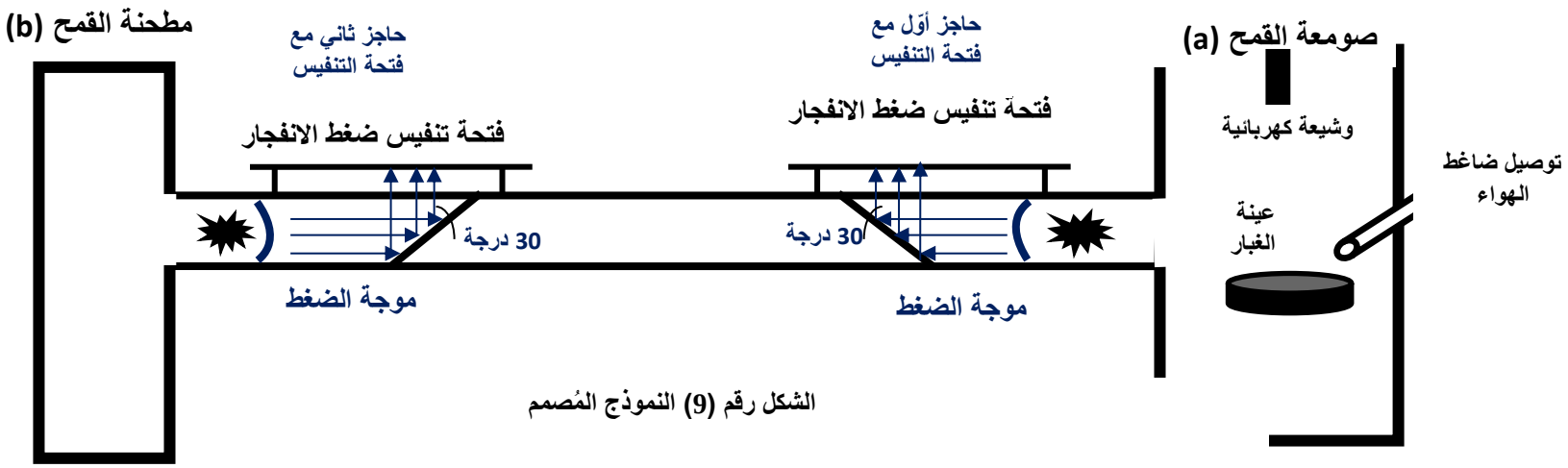
الشكل رقم (8) صومعة بجانب مطحنة

ونتيجة العملية الإنتاجية في المطاحن والصوامع يتناثر غبار الدقيق والقمح، وفي بعض الأحيان تتوافر مصادر الاشتعال نتيجة العمليات الصناعية كالشرارة الكهربائية والاحتكاك الميكانيكي وغيرها من مصادر الاشتعال المتعدّدة؛ الأمر الذي يؤدي إلى حدوث انفجار غباريّ أوّلي في ظل توافر كميّة كافية من الأوكسجين وحيز مغلق، يمكن لهذا الانفجار أنْ يمتدَ وينتشرَ عبر النفق، الأمر الذي يُسبّب حدوث سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية أشد خطورة وأكثر تدميراً؛ ينتج عن هذه الانفجارات نتائج كارثية بالأرواح البشرية والتجهيزات الميكانيكية والكهربائية وفي البناء أيضاً. لمنع امتداد الانفجار الغباري الأوّلي ووصوله من الصومعة إلى المطحنة وبالعكس، تمَّ البحث بشكلٍ جديّ بإيجاد حلول فنيّة وعلميّة مناسبة لعزل الانفجار الغباري الأوّلي ومنع تحوّله إلى سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية.

من أجل دراسة هذه الظاهرة المدمّرة؛ تمّ تصميم نموذجاً يحاكي الواقع في المطاحن والصوامع المرتبطة ببعضها بنفق لسحب الأقماح.

- **تصميم النموذج:**

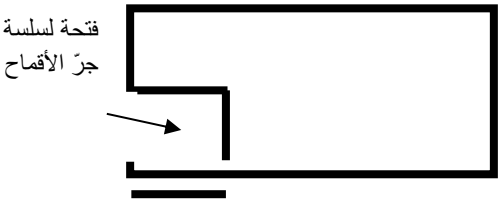
يتألف النموذج المُصمّم من أسطوانتين من البلاستيك المقوى الشفاف؛ أما الأسطوانة الأولى والتي تمثل الصومعة (a) فقطرها (20 cm) وارتفاعها (21 cm) مع وجود فتحة بأسفلها بقطر (1 cm) لتركيب خرطوم ضاغط الهواء؛ ترتفع فتحة الضاغط عن الأفق مسافة (6 cm)، وأما الأسطوانة الثانية والتي تمثل المطحنة (b) فقطرها (10 cm) وارتفاعها (21 cm)، تتصلان ببعضهما بنفق بلاستيكي شفاف أيضاً؛ مقطعه مربع طول ضلعه (6 cm)؛ وطوله (23 cm)؛ ويرتفع عن الأفق مسافة (7 cm)؛ يُبيّن الشكل رقم (11) في الصفحة الآتية مخططاً توضيحياً للنموذج المُصمّم مع **ملاحظة** أنّ تنفيذ حاجز واحد من جهة الصومعة يفي بالغرض لإجراء التجارب العملية أمّا التنفيذ على الواقع يجب أن يكون حسب النموذج المُصمّم في الشكل رقم (9).



الشكل رقم (9) النموذج المُصمم

يوضح الشكل أنّه يمكن أن يحدث الانفجار الغباري الأوّلي بالصومعة كما يمكن أن يحدث

تمّ حساب طول الحاجز المائل بدلالة زاوية الميل؛ فكان طوله (12 cm)؛ كما تمّ قص فتحة بعرض (2 cm) وطول (3 cm) من أجل دخول سلسلة جرِّ الأقماح ضمن الحاجز، كما هو مبيّن في الشكل رقم (10).



الشكل رقم (10) الحاجز المائل

تمّ اختيار زاوية ميل الحاجز (^{0} 150) حسب الخبرة بالانفجارات الغبارية بالمطاحن والصوامع والهدف منها تخفيف قوة موجة الضغط على الحاجز المائل مقارنة مع الحاجز قائم الزاوية؛ وإنّ اختيار زاوية أكبر يؤدي إلى زيادة في طول الحاجز ضمن النفق وهذا لا مبرر له.

أمّا طريقة حساب مساحة فتحة التنفيس فهناك طرائق كثيرة لحسابها نذكر منها: الطريقة البيانية المعتمدة من قبل الجمعية الوطنية الأمريكية للحماية من الحرائق (NFPA)؛ والطريقة النرويجية؛ وطريقة (DONAT)؛ والطريقة السويدية؛ وغيرها من الطرائق [2]. أما خلال هذه التجربة فقد تمّ اعتماد الطريقة السويدية لسهولة تطبيقها وتوافر كافة المعطيات اللازمة لحساب مساحة فتحة التنفيس. لذلك تمّ حساب مساحة الفتحة فوق النفق اللازمة والكافية لتنفيس موجة الضغط من المعادلة الآتية:

$$A = \frac{0.019}{P_{red}^{0.5}} \cdot V^{0.635}$$

حيث:

A: مساحة فتحة التنفيس [m^2].

V: حجم الأسطوانة الأولى؛ الصومعة [m^3].

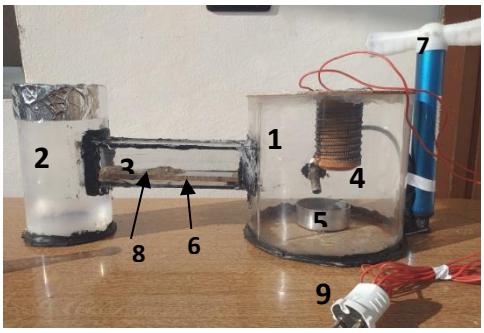
P_{red}: قيمة الضغط الأعظميّ الداخلي المسموح به أو ضغط حد الخطورة [bar].

ملاحظة: ينبغي ألّا تتجاوز قيمة الضغط الأعظمي (P_{red}) عن الحدود المسموح بها للبناء أو للآلة؛ ويجب أن يتمزق غطاء فتحة التنفيس عند أي زيادة طفيفة بالضغط داخل الصومعة أو الآلة أو أي حالة مدروسة تزيد عن الضغط الجوي، وعليه يجب ألّا نسمح لوصول الضغط داخل البناء أو الآلة لضغط حد الخطورة لـ (P_{red}).

$V = 0.006594\ [m^3]$
$P_{red} = 1.1\ [bar]$
$A = 0.000746822\ [m^2] = 7.4\ [cm^2]$

7- مرحلة التنفيذ:

تمّ تركيب الوشيعة الكهربائية في أعلى الصومعة (a)؛ وإغلاقها من الأعلى والأسفل بقطعتين خشبيتين سماكة (5 mm) لكلّ منهما إغلاقاً تاماً لتهيئة البيئة المناسبة لحدوث الانفجار الغباري الأوّلي؛ ثمّ تركيب خرطوم ضاغط الهواء في مكانه المحدّد لنثر الغبار داخل الصومعة بحركة مضطربة ويمكن استخدام النفخ بالفم لنثر الغبار؛ ومن ثمّ تركيب النفق الشفاف الواصل بين الصومعة (a) والمطحنة (b). وتمّ إغلاق الأسطوانة الثانية (b) من الأسفل بوساطة قطعة خشبية سماكة (5 mm) وإغلاقها من الأعلى برقائق القصدير وإحكام الإغلاق بشكل جيد. كما هو مبيّن في الشكل رقم (11)



الشكل رقم (11) النموذج المنفّذ

حيث تمثل الأرقام الموجودة على الشكل ما يأتي:

1- الصومعة (a). المطحنة (b).
2- النفق الواصل بين الصومعة والمطحنة.
3- وشيعة كهربائية. عينة غبار القمح.
4- سلسلة جر الأقماح ضمن النفق.
5- ضاغط هواء.
6- غبار قمح متراكم فوق سلسلة جر الأقماح.
7- قابس كهربائي.

- **التجربة الأولى:**

العينة المستخدمة في التجربة هي غبار القمح الناتج من عمليات تنظيف الأقماح وغربلتها في الصوامع والمطاحن؛ وهو عبارة عن شعيرات حبة القمح الموجودة فوقها وأجزاء متناهية الصغر من قشرة حبة القمح الناتجة خلال عمليات نقل الأقماح وسحبها بوساطة سلاسل جر الأقماح نتيجة احتكاك الأقماح بعضها ببعض من جهة واحتكاك الأقماح مع سلاسل الجر وآلات التنظيف والغربلة من جهة أخرى؛ وهذا الغبار قابل للاشتعال، يُبيّن الشكل رقم (12) عينة غبار القمح.

الشكل رقم (12) عينة غبار القمح

تمّ وضع العينة في الأسطوانة (a) قبل إحكام إغلاقها في مكانها المحدّد أسفل فتحة خرطوم ضاغط الهواء لتأمين نثر الغبار داخل الصومعة بحركة مضطربة. كما تمّ وضع قليلٍ من غبار القمح في مدخل النفق فوق سلسلة جرّ الأقماح قبل إحكام الإغلاق أيضاً. بعد ذلك تمّ توصيل التيار الكهربائي بالوشيعة الكهربائية، ومن ثمّ استخدام ضاغط الهواء لنثر غبار القمح ضمن الأسطوانة. يُبيّن الشكل رقم (13) اشتعال الوشيعة الكهربائية بعد توصيل التيار الكهربائي.

الشكل رقم (13) اشتعال الوشيعة الكهربائية

أدّت الحرارة الناتجة عن وشيعة الاشتعال إلى اشتعال غبار القمح المتناثر بحركة مضطربة؛ الأمر الذي سبّب حدوث انفجار غباري أوّلي. نتجَ عنه موجتا ضغط ولهب؛ أدّت موجة الضغط إلى نثر الغبار المتراكم في مدخل النفق؛ كما أدّت موجة اللهب إلى اشتعاله وحدوث انفجار غباري ثانوي امتدَ إلى المطحنة وسبّب تمزق سطح المطحنة المكوّن من رقائق القصدير. يُبيّن الشكل رقم (14) الانفجارين الغباريين الأوّلي والثانوي؛ كما يُبيّن تمزق سطح المطحنة وخروج موجة اللهب منه.

الشكل رقم (14) انفجار غباري أوّلي وثانوي

- **التجربة الثانية:**

العينة المستخدمة في التجربة هي دقيق القمح الناتج من عمليات طحن الأقماح، يُبيّن الشكل رقم (15) العينة المستخدمة.

الشكل رقم (15) عينة دقيق القمح

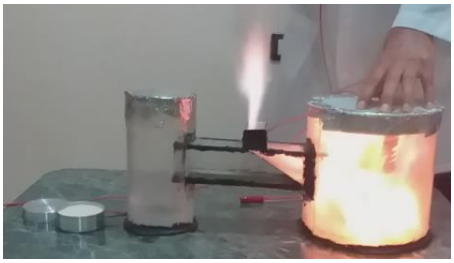
بعد الانتهاء من التجربة الأولى بنجاح؛ تمّ تفكيك النموذج وبعدها تمّ إجراء التعديلات الفنية اللازمة وتركيب حاجز يميل عن الأفق بزاوية (^{0} 150) داخل النفق؛ تمّ فتح النفق من الأعلى عند الحاجز وإغلاق الفتحة بمادة غير مقاومة للضغط بحيث تتمزق عند حدوث أي زيادة طفيفة في الضغط تزيد عن الضغط الجوي كرقائق الألمنيوم، ويمكن تركها مفتوحة للوسط المحيط. مساحة فتحة التنفيس ($7.5\ cm^2$) المحسوبة سابقاً من المعادلة أعلاه وفق الطريقة السويدية. تمّ

وضع عينة دقيق القمح في أسفل الصومعة (a). يُبيّن الشكل رقم (16) النموذج المستخدم مع حاجز داخل النفق، ويُبيّن الشكل رقم (17) فتحة التنفيس.

الشكل رقم (16) الحاجز المائل داخل النفق

الشكل رقم (17) فتحة تنفيس الضغط فوق النفق

بعد تجهيز الأسطوانتين والنفق والحاجز المائل وفتحة التنفيس وإحكام الإغلاق من جديد؛ تمّ توصيل التيار الكهربائي بالوشيعة الكهربائية ونثر دقيق القمح بوساطة ضاغط الهواء أو بالنفخ بخرطوم بوساطة الفم؛ مما أدّى إلى اشتعاله وحدوث انفجار غباري أوّلي في الصومعة (a) نتج عنه موجتا ضغط ولهب؛ خرجت موجة الضغط تتبعها موجة اللهب من أضعف منطقة وهي النفق؛ اعترض مسار موجتي الضغط واللهب الحاجز المائل؛ وغيّر مسارهما إلى أعلى النفق لتجد موجة الضغط فتحة التنفيس وتخرج إلى الوسط المحيط وبذلك نكون قد منعنا وصول الانفجار الغباري الأوّلي إلى المطحنة (b) ومن ثمَّ منع حدوث انفجار غباري ثانوي أشد خطراً وتدميراً، ونكون أيضاً قد حافظنا على الأرواح البشرية وحافظنا على المطحنة من دمار محتّم. كما هو مبيّن في الشكل رقم (18).



الشكل رقم (18) خروج موجة اللهب من خلال فتحة التنفيس للوسط المحيط

8- مناقشة النتائج التجريبية:

- **التجربة الأولى؛**

عند نثر الغبار القابل للاشتعال كونه من مواد هيدروكربونية داخل الصومعة بحركة مضطربة؛ يتفاعل مع أوكسجين الهواء الموجود داخل الصومعة (a) وبوجود مصدر اشتعال؛ يؤدي إلى حدوث عملية الاحتراق تحت حجم ثابت (Isochoric Process) ومن ثمَّ حدوث انفجار غباري أوّلي كون عملية الاحتراق حدثت ضمن حيّز مغلق؛ فعند احتراق غبار القمح عند حجم ثابت فإنّ حجم نواتج عملية الاحتراق يزداد. ينتج عن الانفجار الغباري الأوّلي موجة ضغط هائلة بسبب الزيادة المفاجئة والهائلة في حجم غازات الاحتراق؛ وموجة لهب ذات درجة حرارة مرتفعة؛ تسير موجة اللهب بسرعة تحت صوتية؛ تُسبّب موجة اللهب في انضغاط الغازات في مقدّمة موجة اللهب وانضغاط الغبار غير المحترق المتناثر أمام موجة اللهب، يَنتج عن ذلك موجة ضغط هائلة تسير بسرعة عالية جداً يزداد ضغطها الأعظمي إلى أعلى من الضغط الجوي بكثير. تخرج الموجتان من أضعف نقطة وهي النفق لتجد أمامها غبار القمح المتراكم في النفق فوق سلسلة جرّ الأقماح، مما يؤدي إلى تناثره بفعل موجة الضغط، وتسخينه بفعل موجة اللهب وتفاعله مع الأوكسجين واحتراقه، الأمر الذي يؤدي إلى حدوث انفجار غباري ثانوي يصل إلى المطحنة (b)، تؤدي موجة الضغط الناتجة عن الانفجار الغباري الأوّلي والثانوي إلى اهتزاز المطحنة الأمر الذي يؤدي إلى تناثر غبار القمح والدقيق العالق على الأسطح والجدران الداخلية للمطحنة، وتناثر الأغبرة

المتراكمة فوق التجهيزات الميكانيكية والكهربائية أيضاً؛ وعند وصول موجة اللهب والتي تسير خلف موجة الضغط تجد أمامها غباراً متناثراً يتم تسخينه وارتفاع حرارته بفعل موجة اللهب مما يؤدي إلى اشتعاله مرة ثانية وثالثة وهكذا مما يؤدي إلى نشوء موجات ضغط قوية ومتعاقبة تؤدي إلى تدمير المطحنة بشكل كامل، كما حدث في التجربة الأولى حيث أدّت موجة الضغط إلى تمزق سطح المطحنة المكوّن من رقائق القصدير؛ حيث يمثل سطح المطحنة أضعف نقطة في البناء. كما هو مبيّن في الشكل رقم (14). مع ملاحظة أنّه تمّ إجراء هذه التجربة دون وجود حاجز في النفق.

- **التجربة الثانية؛**

تحدث عملية الاحتراق كما حدثت في التجربة الأولى؛ يؤدي اشتعال دقيق القمح- المكوّن من (77-87 من مواد هيدروكربونية- إلى زيادة حجم غازات الاحتراق مما يؤدي إلى نشوء موجة ضغط هائلة؛ تسير موجة الضغط بسرعة فائقة تتبعها موجة اللهب، تبحث موجة الضغط عن أضعف نقطة للخروج منها ولا تجد أمامها إلاّ النفق فتخرج منه؛ تصطدم موجة الضغط بالحاجز المائل الأمر الذي يؤدي إلى تغيير مسار موجة الضغط حسب زاوية ميل الحاجز مما يؤدي إلى خروج موجة الضغط تتبعها موجة اللهب من خلال فتحة التنفيس إلى الوسط المحيط؛ وبذلك نكون قد منعنا وصول الانفجار الغباري الأولي إلى المطحنة، ومن ثمَّ منْع حدوث سلسلة من الانفجارات الغبارية الثانوية المتعاقبة الأشد خطراً وتدميراً، والنتيجة الحفاظ على الأرواح البشرية والحفاظ على المطحنة من دمار محتّم. الأمر الذي يؤكد فعالية الحواجز في عزل الانفجار الغباري الأوّلي، ومنع وصوله إلى الطرف الآخر، ومنع تحوّله إلى سلسلة من الانفجارات الغبارية الثانوية. وفي حال حدوث الانفجار الغباري الأوّلي في المطحنة ينبغي تركيب حاجز يناظر الحاجز الأوّل لمنع وصول الانفجار من المطحنة إلى الصومعة كما هو مبيّن في الشكل رقم (9).

ملاحظة: يُبيّن الفيديو الموجود على القرص المضغوط المرفق بهذا البحث مراحل التجربة الأولى وآلية حدوث الانفجارات الغبارية، وكذلك التجربة الثانية؛ علماً أنّه تمّ نثر الغبار بوساطة الفم بدلاً من الضاغط وذلك لضعف الضاغط، والهدف هو نثر الغبار بحركة مضطربة وبغض النظر عن الأداة المستخدمة.

9- التوصيات والنتائج:

أثبتت النتائج التجريبية ما يأتي:

1. انتقال الانفجار الغباري الأوّلي من الصومعة إلى المطحنة عبر النفق.
2. أدّى الانفجار الغباري إلى تمزيق سطح المطحنة الذي يمثل النقطة الأضعف في المطحنة نتيجة موجة الضغط، ولولا هذه النقطة الضعيفة لتمّ تدمير المطحنة بالكامل.
3. فعالية الحواجز المائلة في منع تحوّل الانفجار الغباري الأوّلي إلى سلسلة متعاقبة من الانفجارات الغبارية الثانوية الأشد خطراً وتدميراً.
4. فعالية الحواجز المائلة في تغيير مسار موجتي الضغط واللهب الناتجتين عن الانفجار الغباري الأوّلي، والحيلولة دون وصولهما إلى المطحنة.
5. فعالية فتحة التنفيس في تنفيس موجتي الضغط واللهب وخروجهما إلى الوسط المحيط.
6. الحفاظ على المطحنة من تدمير محتّم، والأهمّ من ذلك الحفاظ على الأرواح البشرية.
7. المجال مفتوح أمام الباحثين لعزل الانفجار الغباري الأوّلي ضمن الآلات كالروافع الكيلية والفلاتر والحلزونات الناقلة.

REFERENCES المراجع

1. **https://www.wikipedia.org/.**
2. **ECHKOFF K. ROLF. (2003) "Dust explosion in the process industries." United States of America; Elsevier Science publications; ISBN 0-7506-7602-7.**
3. **M.F. Ivanov 1, A. D. Kiverin 1, M. A. Liberman. (2003) "Ignition of Deflagration and Detonation Ahead of the Flame due to Radiative Preheating of Suspended Micro Particles" Russian Academy of Science, Moscow 125412, Russia.**
4. **http://arabian-chemistry.com/.**
5. ***Ritsu Dobashi*. (2007) "FLAME PROPAGATION DURING DUST EXPLOSIONS; Dept. of Chemical System Engineering, Shool of Engineering, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN.**
6. **Robert Zalosh (2007) "Dust Explosion Fundamentals: Ignition Criteria and Pressure Development" Wellesley, MA 02481.**
7. **Ballal, D. R., and A. H. Lefebvre. (1977) "Ignition and Flame Quenching in Flowing Gaseous Mixtures." Proceedings of the Royal Society (London) A357, pp. 163-1 81.**
8. **Verhaegen, H. (1989, June) "Safety, a Management Task." Proceedings of the Sixth International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries." Oslo:Norwegian Society of Chartered Engineers.**
9. **http://archive.thawra.sy/_archive.asp?FileName=56390610220051224131409.**

المراجع العربية:

10. **العـوض أحمـد؛ (2018) "الانفجـارات الغباريـة المـدمرة"– الشـركة العامـة للمطـاحن، الجمهوريـة العربيـة السورية.**

Received	**2020/07/18**	**إيداع البحث**
Accepted for Publ.	**2021/01/20**	**قبول البحث للنشر**