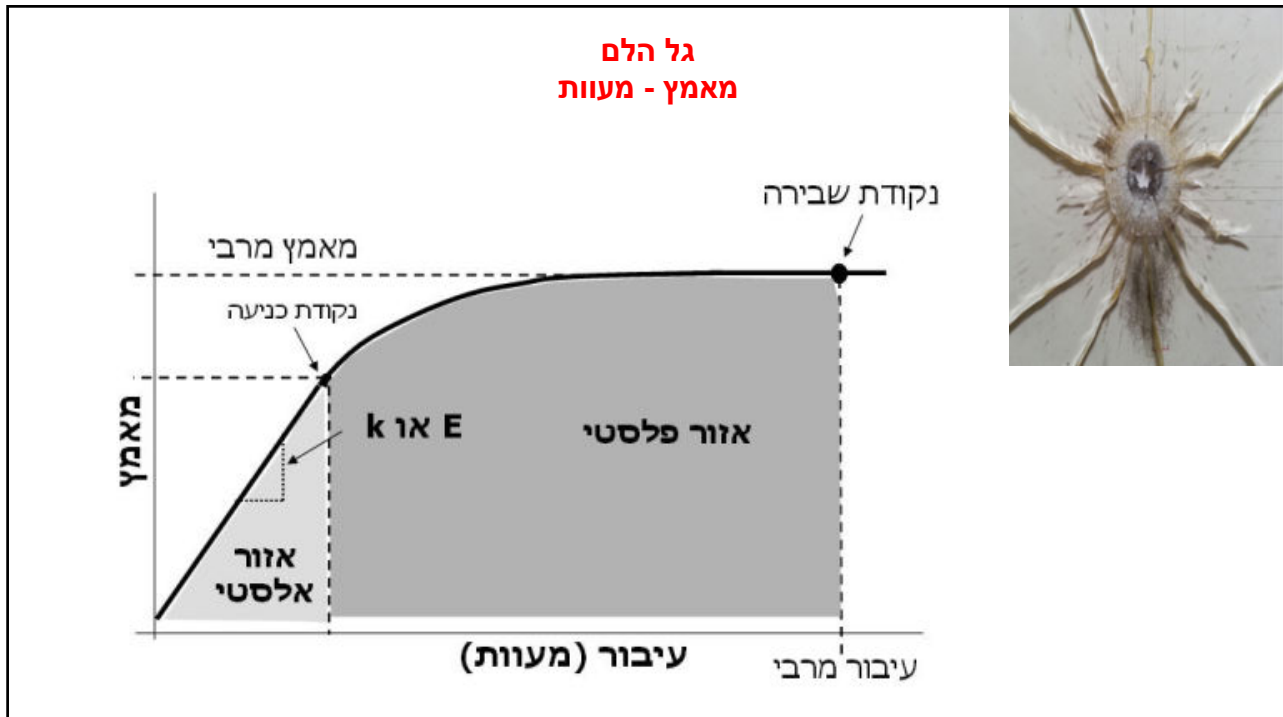


דטונציה



גל הלם

גל הלם

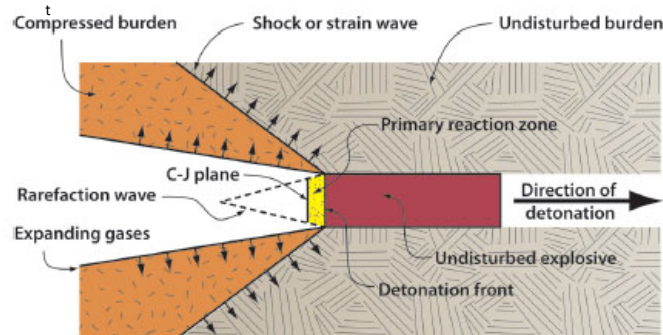
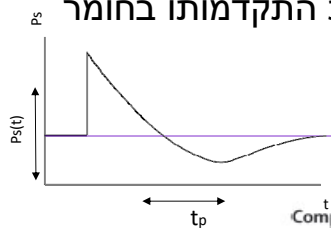
- חזית גל הלם (או גל הלם) היא חזית גל המתקדמת בדומה לחזית גל רגילה. ייחודה בכך שהשינוי בתכונות התווך הינו חד מאוד כמעט בלתי רציף. חזית גל ההלם מתקדמת בתווך מהר יותר מחזית גל רגיל , ואינה מחזורית.
- אפשר לתאר גל הלם כשכבת המעבר בין שני התחומים, התחום המושפע מההפרעה והתחום שאינו מושפע.



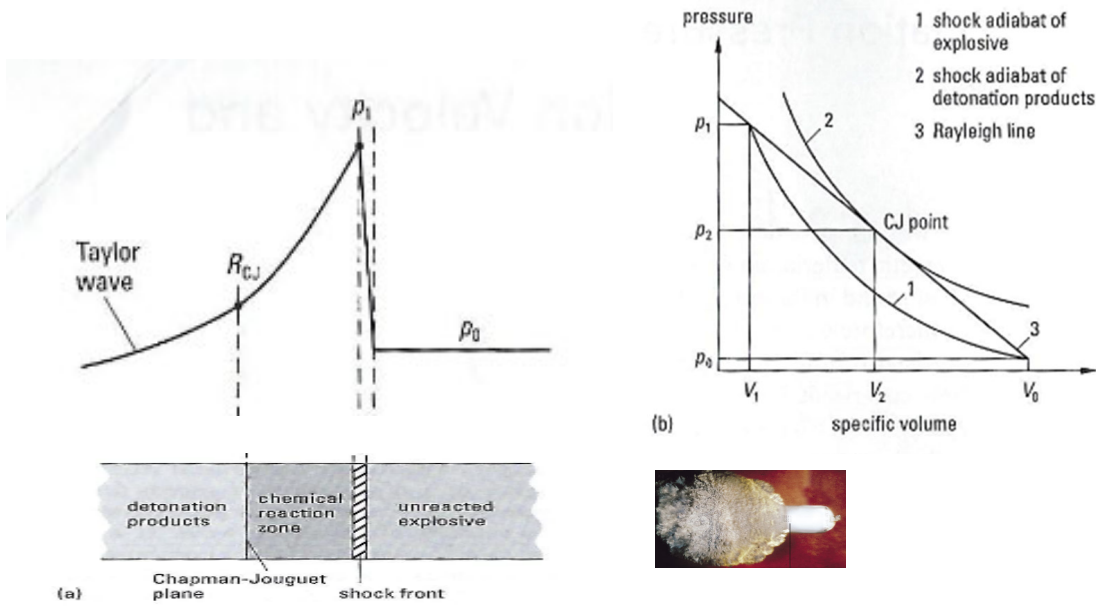
חזית גל הלם באויר – שינוי הלחץ דוחס את האויר ואדי המים שהיו בהם מה שהביא להיווצרות "ענן" קוני המסמם את חזית גל ההלם

גל הלם - דטונציה

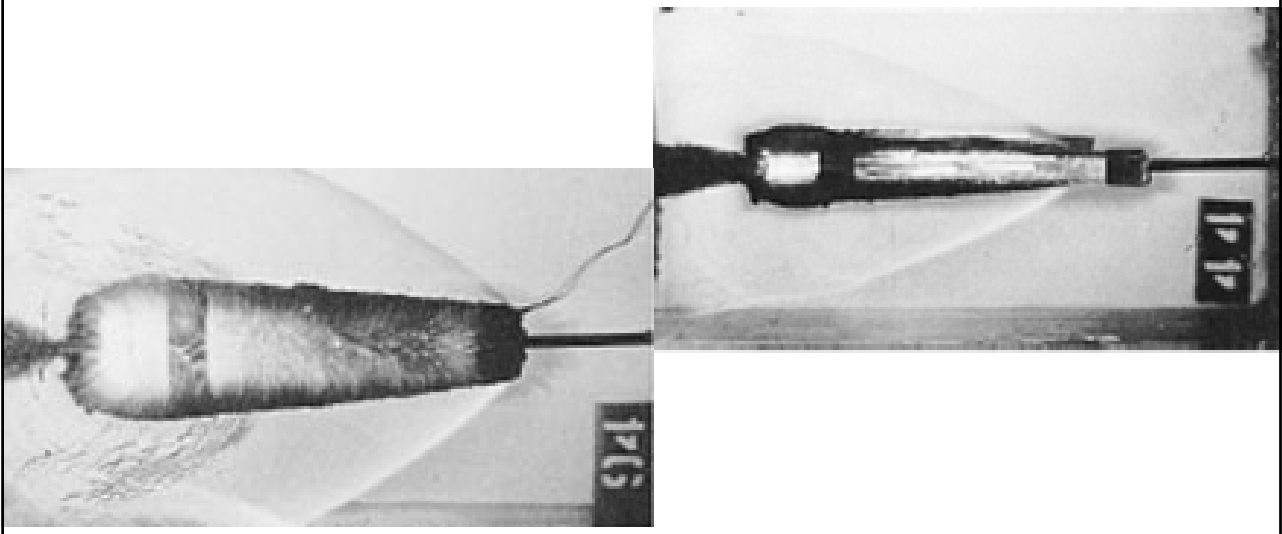
תגובה כימית המתרחשת בחזית גל ההלם ומזינה את התקדמותו בחומר המגיב (חומר הנפץ)

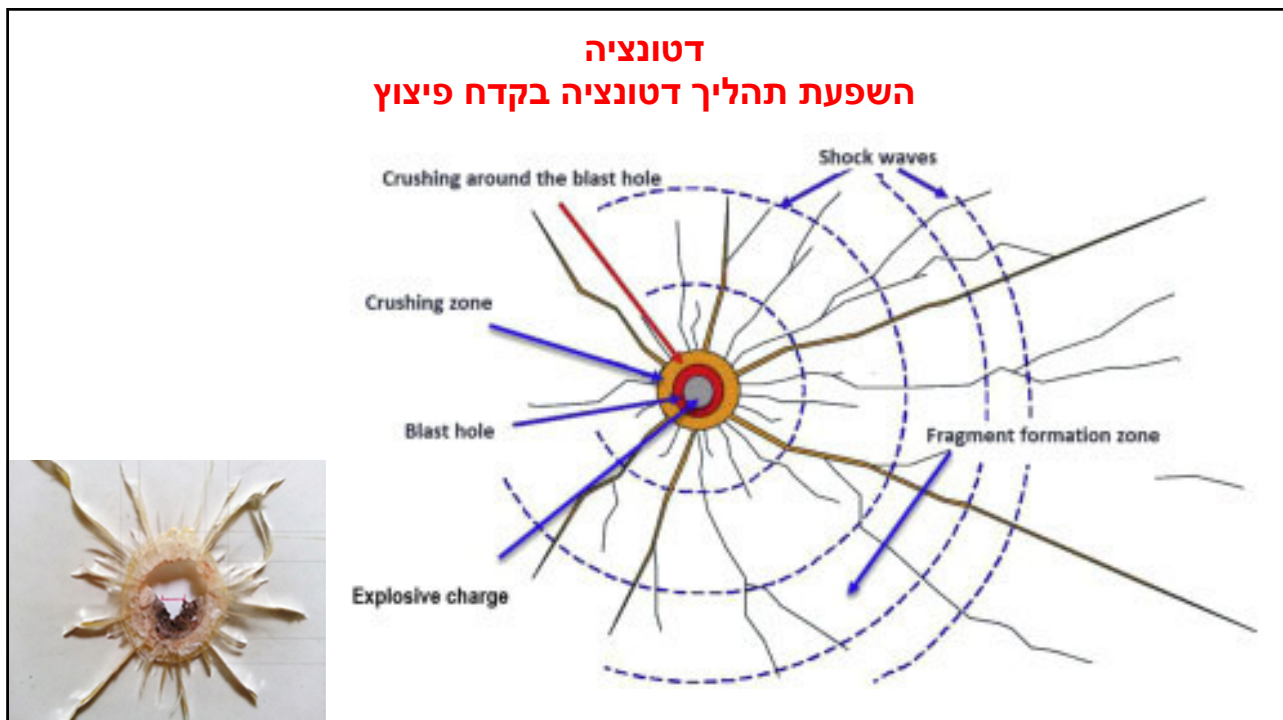
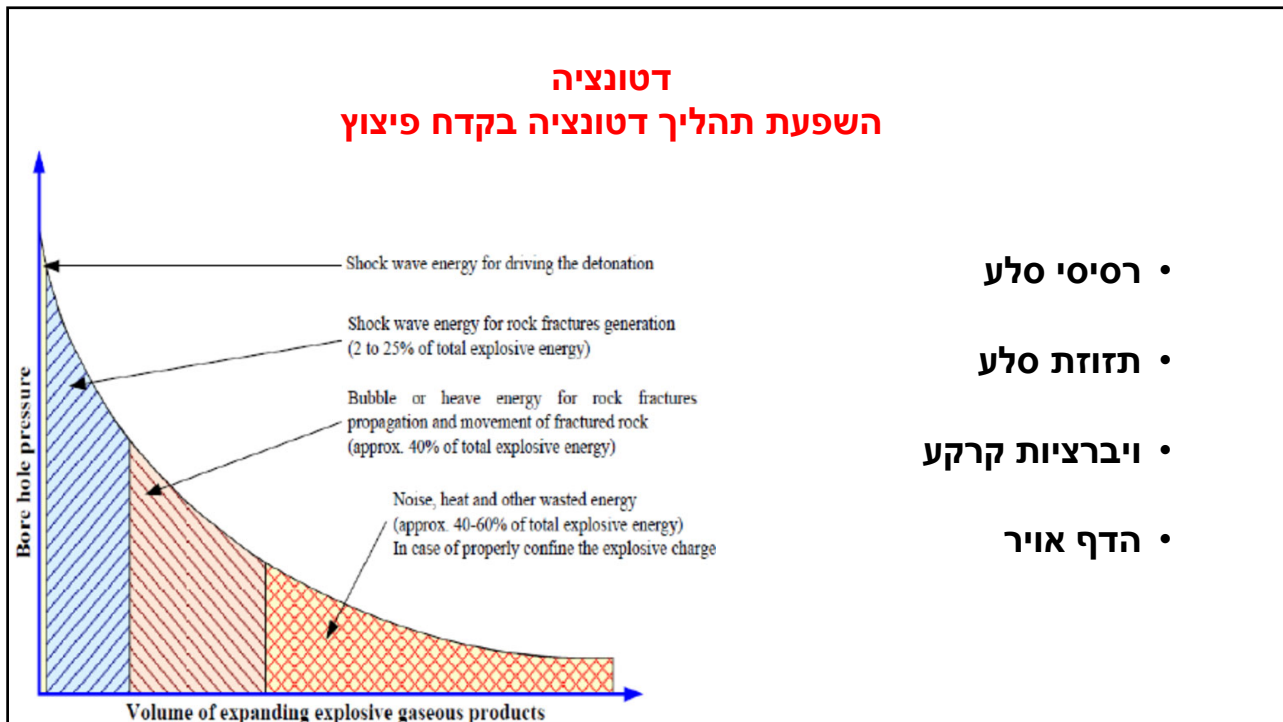


דטונציה
שיווי משקל בין מגיבים לתוצרים



דטונציה
צורת החזית כתלות במהירות





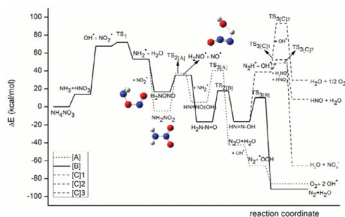
דטונציה – גורמי היווצרות

- חיכוך – בעיקר חום
- מכה גלי הלם מכאניים + חום
- חשמל סטטי
- חום
- ריאקטיביות

ריאקטיביות סיכוני תאימות כימית אמוניום ניטרט

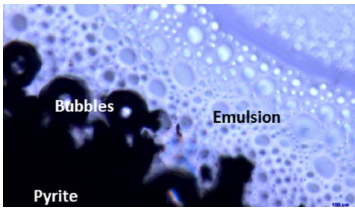
Table 1: Some major AN accidents

Year, Place	Substances involved	Effects
1921, Oppau - Germany	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{NH}_4\text{NO}_3$	Explosion
1947, Canada	NH_4NO_3	Fire
1947, Texas City - USA	NH_4NO_3 (pure)/ NH_4NO_3 -sulphur	Explosion
1954, Finland (ship)	NH_4NO_3 /paper/copper acetoarsenite	Fire followed by explosion
1994, Sergeant Bluff - USA	NH_4NO_3	Explosion
2000, Aunay-Sous-Crecy - France	NH_4NO_3 /organic materials	Decomposition of AN
2001, Toulouse - France	NH_4NO_3 /sodium salt of dichloroisocyanuric acid (SDIC)	Explosion



Melting 169 °C
 Boiling 210 °C
 Deflegrate 325 °C (confined)
 Detonation >260 °C
 (confined and high heating rate)

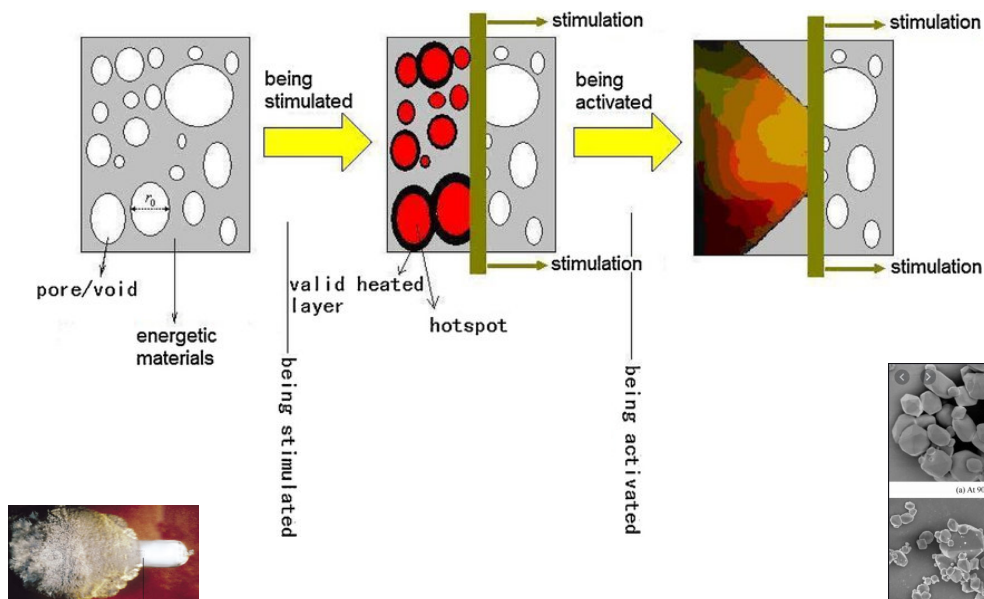
ריאקטיביות סיכוני תאימות כימית אמוניום ניטרט



פיריט (זהב שוטים)

INCOMPATIBILITIES: Acetic acid, Acetic anhydride + nitric acid, Acids, Alkali metals, Aluminum powder, Aluminum chloride, Ammonia, Ammonium chloride, Ammonium dichromate, Antimony powder, Barium chloride, Barium nitrate, Bismuth powder, Brass powder, Cadmium powder, Calcium powder, Calcium chloride, Charcoal, Chlorates, Chloride salts, Chromium powder, Chromium (VI) salts, Cobalt powder, Copper powder, Cyanoguanidine, Fertilizers, Flammable liquids, Hydrocarbon oils, Iron Powder, Iron(II) sulfide, Iron(III) chloride, Lead powder, Magnesium powder, Manganese powder, Metal powders, NaOC, Nickel powder, Nonmetals, Oils, Organic fuels, Organic matter, Phosphorus, Potassium powder, Potassium chromate, Potassium dichromate, Potassium nitrate, Potassium permanganate, Reducing materials, Sawdust, Sodium, Sodium chloride, Sodium perchlorate, Stainless steel powder, Stearates, Sugar, Sulfur, Tin powder, Titanium powder, Trinitroanisole, Urea, Water (hot), Wax, Zinc powder.

דטונציה היווצרות Hot Spots באמצעות גל הלם

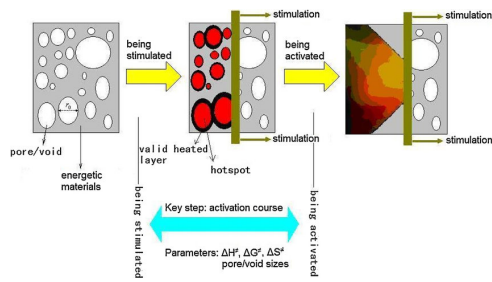


דטונציה היווצרות Hot Spots באמצעות גל הלם

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

0.1-10 μ m
0.01 - 1.0 ms
גבישים, פולימרים, נוזלים ועוד
> 450 °C

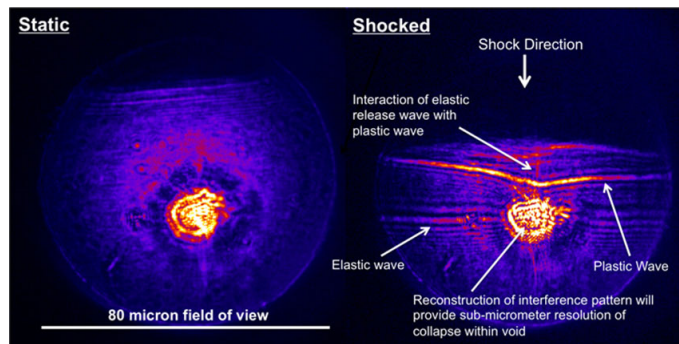
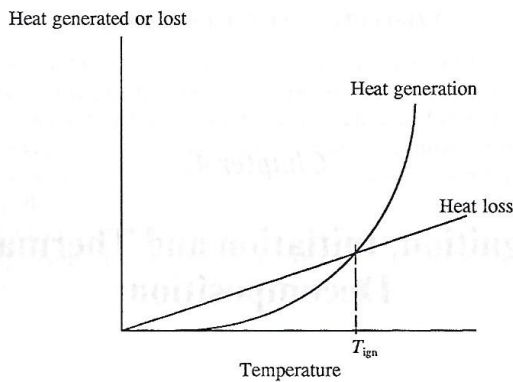
קוטר
זמן מופע
השפעת מבנה פנימי
טמפרטורת גז מינימלית



נקודות חמות והתפתחות תגובת דטונציה

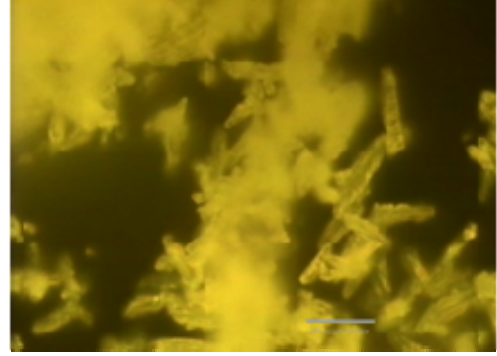
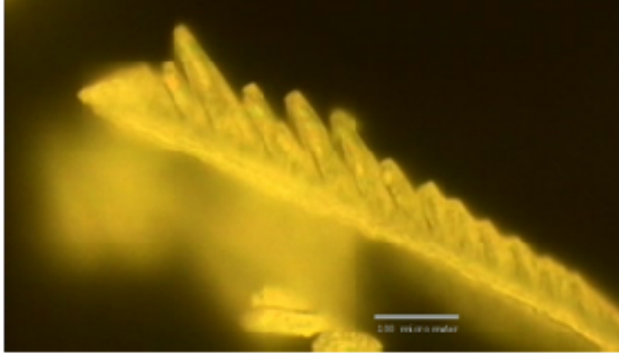
Explosive	Temperature of ignition via hot spots	Temperature of thermal ignition
Primary explosive		
Tetrazene	~430	140
Mercury fulminate	~550	170
Lead styphnate	430-500	267
Lead azide	430-500	327-360
Secondary explosives		
PETN	400-430	202

דטונציה היווצרות Hot Spots באמצעות גל הלם



PETN crystal 10 micron

דטונציה
היווצרות Hot Spots באמצעות חיכוך קצוות גבישים



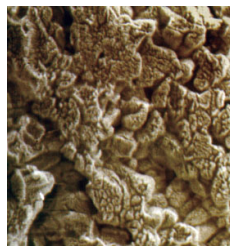
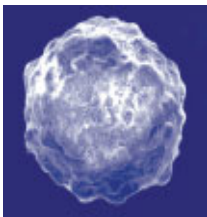
Lead azide

דטונציה
גורמים משפיעים

מדידת מהירות דטונציה

Explosive	Typical VOD m/sec
Civil	
ANFO	~2500-4500
Emulsion	~3400-5400
Military	
HMX	9100
RDX	7500
PETN	8200
TNT	6900

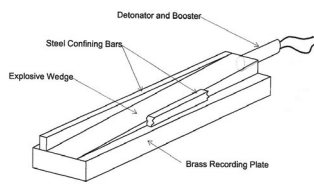
דטונציה - גורמים משפיעים



- צפיפות
- כליאות
- הרכב כימי
- זרזים
- טמפרטורה
- משקל, גודל וצורת יזם ומאיץ
- זמן המתנה בקדח הפיצוץ
- קירבה לקוטר קריטי
- קירבה לצפיפות קריטית
- שיטת טעינה
- תכנון הפיצוץ (פאות חופשיות, שיחרור, זמני השהייה, כיוון יזימה)
- אידושים דינמיים (במהלך תגובת הדטונציה)
- גובה עמודת חומרי הנפץ
- תנאי סביבת העבודה
- תנאי ייצור
- תנאי הובלה

דטונציה גורמים משפיעים קוטר קריטי

- קוטר קריטי הינו הקוטר שמעליו חומר הנפץ יעבור תגובת דטונציה ומתחתיו הוא יעבור דפלגרציה או שריפה בלבד.
- גובה קריטי הינו הגובה שמעליו החומר יעבור תגובת דטונציה ומתחתיו החומר יעבור דפלגרציה או שרפה.



דטונציה גורמים משפיעים קוטר קריטי

קוטר הקריטי של אפנו הוא 75 מ"מ, כלומר

- אם אטען קדח של 50 מ"מ עם אפנו אקבל דפלגרציה או שרפה, בשום אופן לא דטונציה.
- אם אני אטען קדח של 80 מ"מ עם אפנו אני אקבל דטונציה.
- באפנו הגבול בין דטונציה לדפלגרציה הוא 75 מ"מ.

דטונציה גורמים משפיעים קוטר קריטי

- קוטר הקריטי של אצבע אמולסיה הוא כ 17 מ"מ, כלומר
- טעינת קדח באצבע אמולסיה בקוטר הקטן מ 17 מ"מ תאפשר יזימה לתהליך דפלגרציה ללא דטונציה או שריפה. אם אני אטען קדח של 20 מ"מ עם אצבע אמולסיה בקוטר 15 מ"מ אני אקבל דפלגרציה או שרפה בלבד.
- טעינת קדל באצבע אמולסיה סקוטר גדול מ 17 מ"מ תאפשר יזימה לתהליך דטונציה.

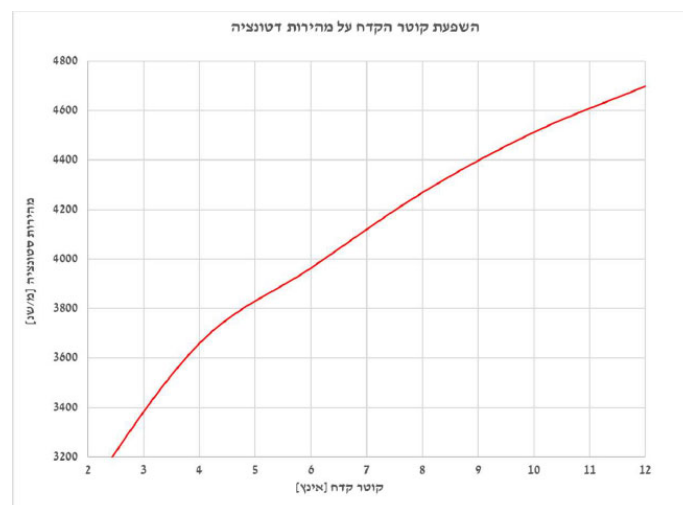
דטונציה גורמים משפיעים קוטר קריטי

- קוטר הקריטי של אמולסיה בתפזורת הוא 50 מ"מ כלומר,
- אם אני אטען קדח של 45 מ"מ עם אמולסיה ?
- אם אני אטען קדח של 50 מ"מ עם אמולסיה בתפזורת אני אקבל דטונציה.
- זה אומר שהגבול באמולסיה בתפזורת בין לדטונציה לדפלגרציה הוא 50 מ"מ.

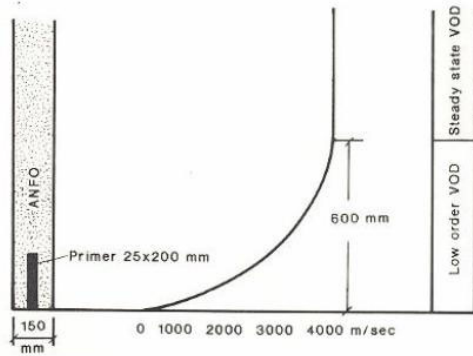
דטונציה גורמים משפיעים קוטר קריטי

- קוטר הקריטי של TNT הוא 17 מ"מ, כלומר,
- פיצוץ גוש TNT בעובי קטן מ 17 מ"מ לא יאפשר תגובת דטונציה אידיאלית.
- גוש בעובי גדול מ 17 מ"מ כן יאפשר תגובת דטונציה.

דטונציה גורמים משפיעים קוטר קריטי



דטונציה גורמים משפיעים תלות המהירות בגובה עמודת חומר הנפץ

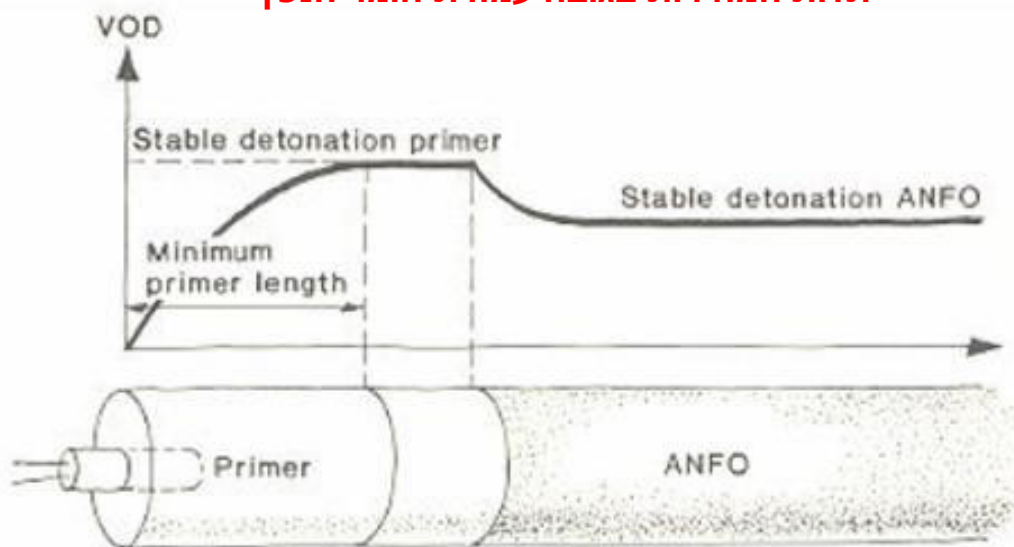


Effect of inefficient primer. Most of the energy is wasted, as it takes more explosive in reaching the steady state VOD

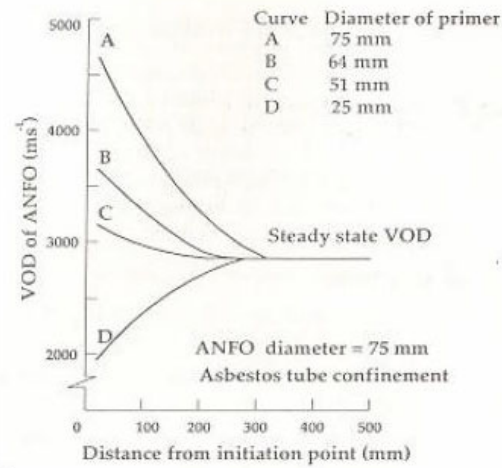
The steady state velocity of ANFO for different blasthole diameters

Blasthole diameter mm	VOD m/s
89	3,700
102	3,800
152	4,200
270	4,400

דטונציה גורמים משפיעים תלות המהירות בגובה עמודת חומר הנפץ

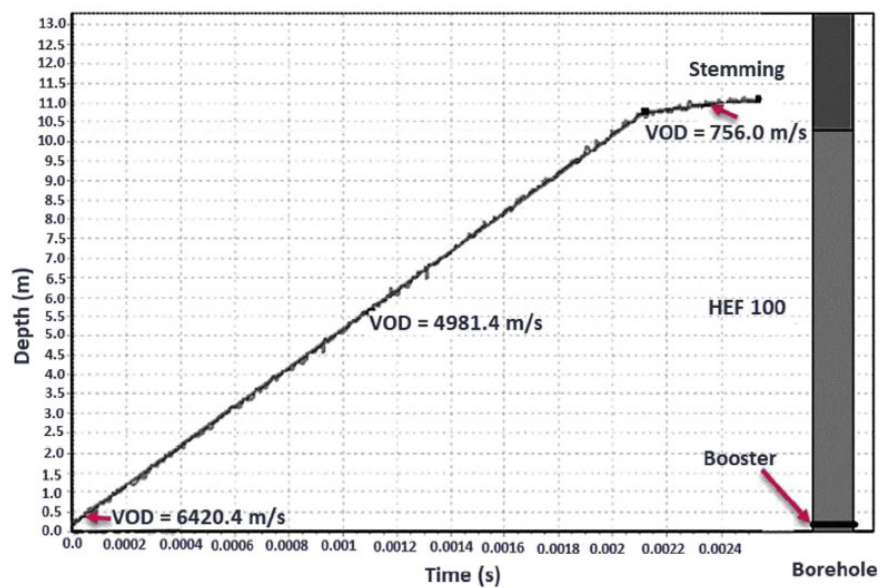


דטונציה גורמים משפיעים השפעת קוטר המאיץ

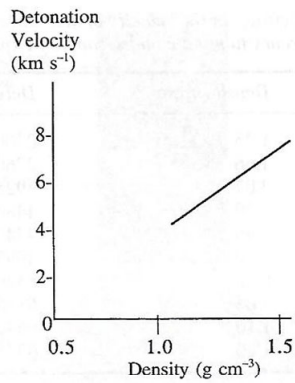


Effect of primer diameter on ANFO VOD.

דטונציה גורמים משפיעים תלות המהירות בגובה עמודת חומר הנפץ



דטונציה גורמים משפיעים צפיפות



$$P_{C-J} = \rho_0 \times VOD_{km/sec} \times (1 - 0.7125 \times \rho_0^{0.04})$$

$$P_{C-J}: GPa \text{ (} 1GPa = 10 \text{ Kilobar)}$$

$$\rho_0: g/cm^3$$

$$VOD: km/sec$$

דטונציה גורמים משפיעים צפיפות

$$= 1.55 \times 6.85_{km/sec} \times (1 - 0.7$$

$$P_{C-J}: GPa \text{ (} 1G$$

$$\rho_0:$$

$$VOD$$

$$P_{C-J} = \rho_0 \times VOD_{km/sec} \times (1 - 0.7125 \times \rho_0^{0.04})$$

TNT

Density: 1.55 g/cm³

VOD: 6.85 km/sec

g/cm³
m/sec

דטונציה גורמים משפיעים צפיפות

$$P_{C-J} = 1.55 * 6.85_{km/sec} * (1 - 0.7125 X 1.55^{0.04}) = 2.92 \text{ GPa} = 29.2 \text{ KiloBar}$$

$$P_{C-J}: \text{GPa} (1 \text{GPa} = 10 \text{Kilobar})$$

$$\rho_0: \text{g/cm}^3$$

$$\text{VOD}: \text{km/sec}$$

TNT

Density: 1.55 g/cm³

VOD: 6.85 km/sec

דטונציה גורמים משפיעים צפיפות

צפיפות ורגישות ליזימה

אנפו

צפיפות 0.72-0.68 : רגיש לנפץ

צפיפות 0.76-0.73: רגיש למאיץ אמולסיה בקוטר עד 50 מ"מ

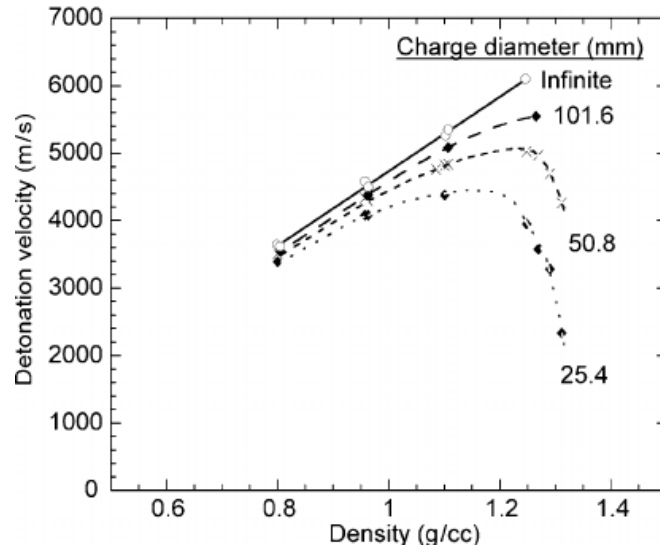
צפיפות 0.77-0.85: רגיש למאיץ אמולסיה 65-80 מ"מ

אמולסיה

צפיפות 1.02-1.10 רגיש לנפץ

צפיפות 1.15-1.30 רגיש למאיץ אמולסיה בקוטר 80 מ"מ

דטונציה גורמים משפיעים צפיפות



Effect of density on detonation velocity for an emulsion explosive

דטונציה גורמים משפיעים טמפרטורת הצתה עצמית

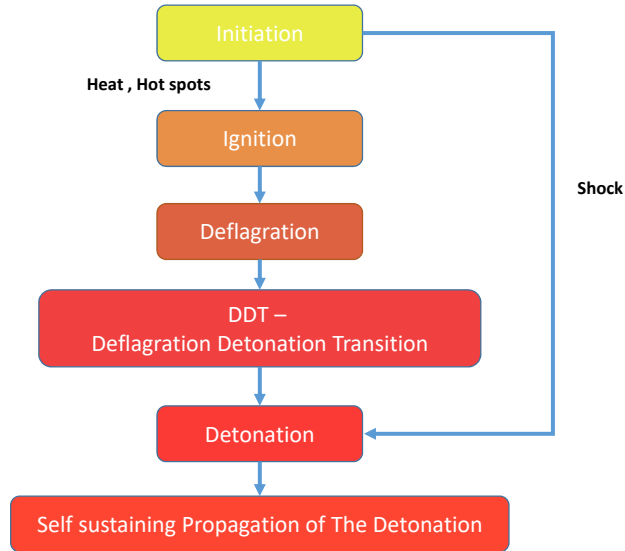
חומרי נפץ עוברים תהליך דפלגרציה ו/או דטונציה כתוצאה מחשיפה לטמפרטורה שמעל לטמפרטורת הצתה עצמית

סוג 9: חנקת האמון (אמוניום ניטרט) מוספגת בחומר דלק נוזלי שהוא **בעל נקודת הבזק גדולה מ-65°C**; חנקת האמון מוספגת בחומר

דלק נוזלי כאמור, בתוספת נסורת עץ, אבקת אלומיניום או חומר דומה;

Explosive	Temperature of ignition via hot spots	Temperature of thermal ignition
Primary explosive		
Tetrazene	~430	140
Mercury fulminate	~550	170
Lead styphnate	430-500	267
Lead azide	430-500	327-360
Secondary explosives		
PETN	400-430	202

דפלגרציה לדטונציה



	בעירת חומר שאינו חומר נפץ	תהליך בעירת חומר פירוטכני	תהליך דטונציה
1	הצתה בלהבה, ניצוץ, טמפרטורה גבוהה	הצתה בלהבה, ניצוץ, טמפרטורה גבוהה הלם מכאני	הצתה בלהבה ניצוץ טמפרטורה גבוהה הלם מכאני
2	לא ניתן להצתה בתנאי רטיבות	לא ניתן להצתה בתנאי רטיבות	ניתן ליזימה בתנאי רטיבות
3	נדרש מקור אספקת חמצן חיצוני	מקור החמצן לבעירה מצוי בתווך החומר עצמו	מקור החמצן לבעירה מצוי בתווך החומר עצמו
4	בעירה עם להבה ללא רעש	רעש עמום ולחיסה	רעש חזק
5	בעירה עם תוצרי גזים יחסית מעטים	תוצרי גז רבים (משמש בהודפים להנעה רקטית)	תוצרי גלי הלם וגז
6	מהירות בעירה נמוכה	קצב התגובה מתחת למהירות הקול בתווך החומר	קצב תגובה מעל מהירות הקול בתווך החומר
7	התקדמות מבוססת על הולכת חום בקרינה	התקדמות מבוססת על הולכת חום בקרינה	התקדמות מבוססת על גלי הלם
8	קצב הבעירה עולה עם עליית הלחץ מעל אזור הבעירה	קצב הבעירה גובר עם עלייה בלחץ בסביבת הבעירה	מהירות דטונציה מושפעת במעט מעליית לחץ בסביבת התגובה
9	אינה מושפעת מחוזק המעטפת	אינה מושפעת מחוזק המעטפת	מושפעת מחוזק המעטפת
10	אינה תלויה בגודל החומר הדליק	הבעירה אינה מושפעת מגודל החומר הפירוטכני	מהירות הדטונציה מושפעת מקוטר המטען (קוטר קריטי)
11	לעולם אינה עוברת תהליך מעבר	עשויה לעבור לתגובת דטונציה בתנאים	דעיכת דטונציה אינה משתנה לדפלגרציה