



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΕ

## *Εκμετάλλευση και Επεξεργασία Ουρανίου*

Πτυχιακή Εργασία

του

*Καρακατσάνη Πάρι Ανδρέα, GE06074*

που υποβάλλεται στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων  
του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας  
για τη μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης  
του Πτυχίου Μηχανικού Γεωτεχνολογίας Περιβάλλοντος ΤΕ



Κοζάνη, Οκτώβριος 2022

Φθάνοντας στην ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας με τίτλο «Εκμετάλλευση και Επεξεργασία Ουρανίου» νιώθω την υποχρέωση αλλά και την πηγαία αυθόρμητη ενέργεια να ευχαριστήσω ανθρώπους που ο καθένας με το δικό του τρόπο βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτού του πονήματος.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επόπτη της πτυχιακής μου εργασίας τον Αν. Καθηγητή κ. Ιωάννη Καπαγερίδη ο οποίος αποτέλεσε μια από τις πηγές έμπνευσης για την συγγραφή αυτής της εργασίας, αλλά και για την ενθάρρυνση που μου έδωσε αρχικά στο να διαλέξω το θέμα αυτό παρόλες τις δυσκολίες που διέθετε.

Επιπλέον αφιερώνω αυτήν την εργασία στους γονείς μου Έμη και Λεωνίδα αλλά και στην αδερφή μου την Χαριτίμη, και τους ευχαριστώ από καρδιά για την υπομονή και την υποστήριξη όλης της χρονικής περιόδου της έρευνας και της εκπόνησης της εργασίας αυτής αλλά και καθ' όλη την φοίτηση μου στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, στην κατεύθυνση των Μηχανικών Γεωτεχνολογίας Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

## Περίληψη

Στην πτυχιακή εργασία με τίτλο «Εκμετάλλευση και Επεξεργασία Ουρανίου» έγινε μια βιβλιογραφική έρευνα για το ουράνιο το οποίο αναλύθηκε σε ορισμένες ενότητες που αφορούν την εκμετάλλευση και την επεξεργασία του. Αρχικά αναφέρθηκαν μέσω της βιβλιογραφίας γενικές εισαγωγικές πληροφορίες για το ουράνιο ως χημικό στοιχείο και έπειτα αναλύθηκαν τα διάφορα είδη κοιτασμάτων όπου βρίσκεται το ουράνιο.

Έπειτα μελετήθηκαν στατιστικά στοιχεία ανά χώρα για την παραγωγή του ουρανίου, τις ανάγκες σε ουράνιο για τα πρόσφατα έτη, τα πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχοντας υπόψη το πώς επηρεάστηκε η αγορά λόγω ατυχήματος στην Φουκοσίμα. Επιπλέον αναλύθηκαν οι πόροι του ουρανίου και σε ποιες κατηγορίες χωρίζονται σε σχέση με την παγκόσμια παραγωγή.

Στο τρίτο και το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρθηκε η υπαίθρια και η υπόγεια εκμετάλλευση του ουρανίου αναπτύσσοντας σχετικά θέματα που έχουν να κάνουν με την διαχείριση των εργασιών, τα πιθανά προβλήματα, οι διάφορες τεχνικές εξόρυξης και διαχείρισης του στερίου υλικού. Επιπροσθέτως αναφέρθηκαν τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου αλλά και τα πεδία εφαρμογής που έχει η κάθε μέθοδος. Πιο συγκεκριμένα αναλύθηκαν μέθοδοι όπως η μέθοδος ανοικτής κοπής, ανοικτού λάκκου και διάφορες τεχνικές εξόρυξης της υπόγειας εκμετάλλευσης.

Όσον αφορά την ασφάλεια στα ορυχεία του ουρανίου η εργασία αυτή επικεντρώθηκε στον πιο επικίνδυνο παράγοντα της υπόγειας εκμετάλλευσης του ουρανίου, το ραδόνιο. Για το ραδόνιο διερευνήθηκαν οι διαδικασίες της δημιουργίας του σε ένα ορυχείο και πως είναι ένα προϊόν αποσύνθεσης του ραδονίου, όπως και γενικές πληροφορίες για τα ατομικά του στοιχεία. Επιπλέον δόθηκαν οι βασικές πηγές όπου μπορεί να υπάρξει εκπομπή του ραδονίου στην ατμόσφαιρα, και μέσω δεδομένων από μελέτες περίπτωσης εξηγήθηκαν οι διαφορές στις τιμές ανά κατηγορία εκπομπής. Δόθηκαν επίσης και οι διάφοροι τρόποι μέτρησης του ρυθμού εκπομπής του ραδονίου στην ατμόσφαιρα και αναφέρθηκαν ορισμένα μέτρα που συμβάλουν στην πρόληψη. Τέλος έγινε μια γενική περιγραφή των διαφόρων διαδικασιών της επεξεργασίας του ουρανίου, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην μέθοδο ISL, όπου και όπως βρέθηκε είναι η πιο φιλική προς το περιβάλλον και η πιο οικονομική από τις άλλες συμβατικές μεθόδους. Στα συμπεράσματα έγινε μια ανακεφαλαίωση και διατυπώθηκε η γενική εικόνα του ουρανίου και των ορυκτών του και τεκμηριώθηκε η αρχική θέση πως αποτελούν τα πιο μεγάλης ενεργειακά σημασίας για τον άνθρωπο.

## Abstract

In the thesis entitled "Mining and Processing of Uranium" bibliographic research was done on uranium which was analyzed in certain sections concerning its exploitation and processing. First, general introductory information on uranium as a chemical element was reported through the literature, and then the various types of deposits where uranium is found were analyzed.

Then country-by-country statistics on uranium production, uranium needs for recent years, nuclear power plants and how the market was affected by the Fukushima accident were studied. In addition, uranium resources were analyzed and into which categories they are divided in relation to global production.

In the third and fourth chapter, the open-air and underground exploitation of uranium was mentioned, developing relevant issues related to the management of the work, the possible problems, the various techniques of extraction and management of the sterile material. In addition, the advantages and disadvantages of each method and the fields of application of each method were mentioned. More specifically, methods such as the open cut, open pit method and the underground exploitation techniques were analyzed.

Regarding safety in uranium mines this work focused on the most dangerous factor in underground uranium mining, the radon. For radon, the processes of its creation in a mine and how it is a decay product of radon were investigated, as well as general information about its atomic elements. In addition, the main sources where radon can be emitted into the atmosphere were given, and through data from case studies the differences in values per emission category were explained. The various ways of measuring the emission rate of radon in the atmosphere were also given and some measures that contribute to prevention were mentioned.

Finally, a general description of the various processes of uranium processing was made, with special emphasis on the ISL method, where and as it was found to be the most environmentally friendly and the most economical of the other conventional methods. In the conclusions, a recapitulation was made and the general picture of uranium and its minerals was formulated and the initial position that they are the most energetically important for humans was documented.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	3
Abstract .....	4
1. Το Ουράνιο - Εισαγωγή .....	7
1.2 Κοιτάσματα του Ουρανίου .....	9
2. Πόροι του Ουρανίου .....	15
2.1 Κατηγορίες Παραγωγής Ουρανίου .....	20
3. Εκμετάλλευση του Ουρανίου .....	23
3.1 Μέθοδος Ανοικτής Κοπής .....	23
3.2 Μέθοδος Ανοικτού Λάκκου .....	25
3.3 Μέθοδοι Απομάκρυνσης και Διαχείρισης του Στείρου Υλικού .....	29
3.4 Κύριες Μέθοδοι Αποκάλυψης του Στείρου Υλικού .....	39
3.5 Εργασίες σε Υπαίθριες Εκμεταλλεύσεις.....	42
4. Υπόγεια Εκμετάλλευση .....	46
4.1 Μέθοδοι Πρόσβασης .....	46
4.2 Τεχνικές Εξόρυξης.....	48
5. Το Ραδόνιο .....	51
5.1 Το Ραδόνιο και η Παρουσία του στην Ατμόσφαιρα Υπόγειων Ορυχείων .....	51
5.2 Πηγές Εκπομπής Ραδονίου .....	53
5.2.1 Τοιχώματα του Ορυχείου.....	53
5.2.2 Απορρίμματα Επίκωσης.....	55
5.2.3 Υπόγεια Ύδατα .....	57
5.3 Μέθοδοι Μέτρησης του Ραδονίου .....	58
5.3.1 Μέθοδος με Κάνιστρο Κάρβουνου.....	58
5.3.2 Μέτρηση του Ραδονίου στο Νερό .....	59
5.3.3 Μέσα Ατομικής Προστασίας.....	60
6. Επεξεργασία του Ουρανίου .....	60

6.1	Σύνθλιψη και Θρυμματισμός .....	61
6.2	Εμπλουτισμός του Μεταλλεύματος .....	64
6.3	Μέθοδος In Situ Leaching .....	65
6.4	Κάθαρση του Ουρανίου Μέσω Οξειδωτικών και Αλκαλικών .....	67
7.	Συμπεράσματα .....	68
	Βιβλιογραφία .....	70

## 1. Το Ουράνιο - Εισαγωγή

Το ουράνιο είναι ένα χημικό στοιχείο το οποίο συμβολίζεται με U, εμφανίζεται με μεταλλικό-γκρι χρώμα και έχει το μεγαλύτερο ατομικό βάρος από όλα τα χημικά στοιχεία. Ανήκει στην κατηγορία των ακτινιδών του περιοδικού πίνακα (Πίνακας 1.2) και έχει ατομικό αριθμό 92 (Πίνακας 1.1.). Σε ένα άτομο U συναντάμε 92 πρωτόνια και 92 ηλεκτρόνια, από τα οποία τα 6 είναι ηλεκτρόνια σθένους (*The Mineralogy of Uranium*, n.d.).

Το ουράνιο το οποίο βρίσκεται στην φύση ή αλλιώς “φυσικό ουράνιο” συναντάται συνήθως υπό την μορφή ορυκτών όπως ο ουρανινίτης (UO<sub>2</sub>), ο ωτουνίτης (Ca(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·10–12H<sub>2</sub>O) και ο καρνοτίτης (K<sub>2</sub>(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>[VO<sub>4</sub>]<sub>2</sub> · 3H<sub>2</sub>O). Το ουράνιο διαχωρίζεται από ορυκτά όπως ο ουρανίτης και στην συνέχεια αποσπάται και χρησιμοποιείται για διάφορες χρήσεις, κυρίως όμως χρησιμοποιείται στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (*Nuclear Fuel Facts: Uranium*, n.d.). Το ουράνιο είναι ένα χημικό στοιχείο μεγάλης ενεργειακής σημασίας για την ανθρωπότητα καθώς φέρει ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία το καθιστούν πιο ενεργειακά αποδοτικό, όταν συγκριθεί το με άλλα χημικά στοιχεία όπως ο άνθρακας. Πιο συγκεκριμένα το ουράνιο έχει μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή την απόδοση στην παραγωγή ενέργειας που το κάθε κιλό μπορεί να προσφέρει (Hore-Lacy, 2016).

### Πίνακας 1.1.: Γενικά χαρακτηριστικά του U

Πηγή: (*The Mineralogy of Uranium*, n.d.)

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Ατομικός Αριθμός	92
Στάνταρ Ατομικό Βάρος (Ar)	238.02891
Ηλεκτρονιακή Δομή	5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
Κατάσταση της Ύλης	Στερεό
Σημείο Τήξης	1408 K
Σημείο Βρασμού	4200 K
Πυκνότητα	19.05 g/cm <sup>3</sup>

Από όλο το εύρος των ορυκτών του ουρανίου, ο ουρανινίτης (UO<sub>2</sub>) έχει το μέγιστο οικονομικό ενδιαφέρον καθώς χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλο ορυκτό του ουρανίου, για την παραγωγή πυρηνικών καυσίμων, λόγω της ευκολίας που παρουσιάζει το συγκεκριμένο ορυκτό στην εξόρυξη του σε σύγκριση με άλλα ορυκτά του ουρανίου. (Merit, 1971). Ο ουρανίτης ανήκει στην ομάδα των οξειδίων των ορυκτών. Αποτελεί ένα ορυκτό το

οποίο έχει μαύρο χρώμα με ημιμεταλλική λάμψη. Ο σχισμός του είναι (111) εμφανής. Ο θραυσμός του οστρακώδης. Έχει σκληρότητα 5-6 στην κλίμακα Mohs και κυβικό σύστημα κρυσταλλικής δομής. Τέλος θεωρείται ως ένα άκαμπτο ορυκτό το οποίο είναι ισχυρά ραδιενεργό. Όσον αφορά την κοιτασματολογία απαρτίζει συστατικό των θειούχων πηγματικών, των υδροθερμικών φλεβών αλλά και των γρανιτών. Επίσης σε ιζηματογενή κοιτάσματα πρόσχωσης εμφανίζεται δευτερογενώς. Μπορεί επίσης να οξειδωθεί με ταυτόχρονη λήψη πολυάριθμων ξένων στοιχείων και έχει διαπιστωθεί πως διαβρώνεται εύκολα (Σαββίδης, 2019).



**Εικόνα 1.1.:** Ουρανινίτης: Βυτίζ, Περιοχή Příbram, Περιφέρεια της Κεντρικής Βοημίας, Δημοκρατία της Τσεχίας.

**Πηγή:** (*Uraninite: Mineral Information, Data and Localities.*, n.d.)



**Πίνακας 1.2.:** Περιοδικός πίνακας των χημικών στοιχείων.

Πηγή: Χημεία Γ΄ Γυμνασίου – Βιβλίο Μαθητή (Εμπλουτισμένο)

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mb	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La-Lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Th	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac-Actinides	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub						
Lanthanides			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Actinides			89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

## 1.2 Κοιτάσματα του Ουρανίου

Το ουράνιο εμφανίζεται σε διάφορων ειδών γεωλογικά περιβάλλοντα, όπως επίσης και σχεδόν σε κάθε στάδιο του γεωλογικού κύκλου. Τα πρώτα κοιτάσματα ουρανίου εκτιμάται ότι δημιουργήθηκαν πρώτη φορά πριν από περίπου 2.800 εκατομμύρια χρόνια, στην Νεοαρχαϊκή (Neoproterozoic) υποπερίοδο του Αρχαϊκού αιώνα, ενώ εκτιμάται ότι κανένα κοιτάσμα δεν υπάρχει έπειτα από την γεωλογική χρονολογία 3.1 Ga (Hore-Lacy, 2016a) (Σαββίδης, 2007).

Στο σήμερα το μεγαλύτερο καθορισμένο κοιτάσμα το κατέχει η Αυστραλία, και πιο συγκεκριμένα βρίσκεται στην περιοχή Olympic Dam, η οποία λειτουργεί πλέον και ως ορυχείο χαλκού, ουρανίου, αργύρου και χρυσού από την εταιρεία BHP, το οποίο βάση της ετήσιας έκθεσης της BHP επίκειται στους 2.960 Mt OC Sulphide και 555 Mt UG Sulphide με 0,21 και 0,50 kg/tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub> αντίστοιχα (BHP, 2018) (Hore-Lacy, 2016a).

Τα κοιτάσματα του ουρανίου έχουν χωριστεί σε διάφορων ειδών κατηγορίες με ορισμένα κριτήρια. Τα κριτήρια των παρακάτω κατηγοριών έχουν τεθεί βάση της σημασίας που έχουν ως πηγές ορυκτών πόρων και ως προς την ικανότητα τους να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των

πυρηνικών αντιδραστήρων, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κατηγορίες αυτές ονομάζονται παρακάτω, έπειτα γίνεται μια γενική περιγραφή της κάθε κατηγορίας και αναφέρονται παραδείγματα τέτοιων κοιτασμάτων σε διάφορες τοποθεσίες:

- I. Κοιτάσματα σχετιζόμενα με ασυνέχεια
- II. Κοιτάσματα ψαμμίτη
- III. Κοιτάσματα χαλαζία, χαλκιού και κροκαλοπαγές
- IV. Κοιτάσματα φλέβων (vein deposits)
- V. Σύνθετα λατυποπαγή κοιτάσματα
- VI. Ενδογενή κοιτάσματα
- VII. Κοιτάσματα φωσφορίτη
- VIII. Λατυποπαγή κοιτάσματα που έχουν υποστεί κατάρρευση (collapse breccia pipe deposits)
- IX. Ηφαιστειακά κοιτάσματα
- X. Κοιτάσματα σε επιφανειακό περιβάλλον
- XI. Μετασωματικά κοιτάσματα
- XII. Μεταμορφικά κοιτάσματα
- XIII. Λιγνίτη
- XIV. Κοιτάσματα μαύρου σχιστόλιθου
- XV. Άλλοι τύποι κοιτασμάτων

I. Αρχικά την πρώτη κατηγορία αφορούν τα **κοιτάσματα σχετιζόμενα με ασυνέχεια**. Πρωτοεμφανίστηκαν πριν από 1.600 με 1.800 εκατομμύρια χρόνια, σε μία ορογενική περίοδο αλλά και σε νεότερες γεωλογικές χρονολογίες (International Atomic Agency, 1993). Κοιτάσματα τέτοιου είδους φιλοξενούν χώρες όπως η Αυστραλία στον ποταμούς Αλιγάτορες και ο Καναδάς στο Σασκάτσουαν. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι τέτοιου είδους κοιτάσματα μπορούν να εμπεριέχουν και χημικά στοιχεία όπως ίχνη χρυσού αλλά και Ni, As, και Mo.

II. Τα **κοιτάσματα ψαμμίτη** όσον αφορά το ουράνιο περιέχονται μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία πετρώματα έχουν υποστεί εναπόθεση κάτω από περιθώρια της θάλασσάς ή κάτω από διάφορα ποτάμια σημεία.

Σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων του ψαμμίτη, αλλά και με προϋπόθεση την παρουσία πηλόλιθου (mudstone) ή ιλυόλιθου, τα κοιτάσματα ψαμμίτη χρησιμοποιούνται με την μέθοδο in-situ leaching για την εξόρυξη του ουρανίου. Τέτοιο παράδειγμα χρήσης υπάρχει στην Βουλγαρία και στις Η.Π.Α..

Το κύριο ιζηματογενές πέτρωμα (host rock) μπορεί να χαρακτηριστεί ως σχετικά εύθρυπτο και με μεσαίους – χονδρόκοκκους κόκκους. Επιπλέον οι ψαμμίτες αυτού του είδους εμπεριέχουν οργανική ύλη, που προέρχεται από φυτά, αλλά και πυρίτες. Από αυτά τα κοιτάσματα λοιπόν, σε περίπτωση που είναι ανοξειδωτά, προκύπτουν μεταλλεύματα που εμπεριέχουν ουράνιο υπό την μορφή των ορυκτών coffinite ( $U(SiO_4) \cdot nH_2O$ ) και ουρανινίτη ( $UO_2$ ). Σε περίπτωση όμως που έχουν υποστεί οξείδωση προκύπτουν δευτερεύον ορυκτά του ουρανίου όπως ο uranophane ( $Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 5H_2O$ ) και ο τιουγιαμουνίτης (tyuyamunite,  $Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 5H_2O$ ). Επιπροσθέτως μεταλλεύματα από κοιτάσματα ψαμμίτη μπορούν να συμπεριλαμβάνουν παραπροϊόντα όπως σελήνιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο και χαλκό.

III. Τα **κοιτάσματα χαλαζία, χαλκιού και κροκαλοπαγές** αποτελούν την τρίτη κατηγορία των κοιτασμάτων του ουρανίου. Αυτή η κατηγορία αυτή είναι περιορισμένη σε προτεροζωικά πετρώματα τα οποία είχαν ως κύριο χαρακτηριστικό την έλλειψη οξυγόνου. Ουράνιο βρέθηκε σε τέτοιου είδους κοιτάσματα σε χώρες όπως η Ινδία και η Βραζιλία. Επίσης υπάρχει και το παράδειγμα της εκμετάλλευσης του ουρανίου ως δευτερεύον προϊόν, σε ένα ορυχείο χρυσού στην λεκάνη του Witwatersrand, Αφρική.

IV. Τα **κοιτάσματα φλεβών (vein deposits)** αποτελούν κατά κανόνα κοιτάσματα στα οποία το ουράνιο βρίσκεται μαζί με άλλα μέταλλα. Τέτοια μέταλλα είναι το νικέλιο, κοβάλτιο, σίδηρος, άργυρος, βισμούθιο και τέλος το μολυβδαίνιο. Επιπλέον το U σχετίζεται με breccia και ρωγμές. Αξίζει να σημειωθεί πως τέτοιου είδους κοιτάσματα έχουν το ελάττωμα της έντονης αραίωσης (λόγο των γεωλογικών διαστάσεων), που έχει αρνητική επίπτωση σε μια εκμετάλλευση. Κοιτάσματα φλεβών υπάρχουν με πλατιά και στενή μορφή. Στενού τύπου

κοιτασμάτων φλεβών υπάρχουν σε ορισμένα μεταλλεύματα της Αυστραλίας, Καναδά και Γαλλίας. Αντιθέτως πιο πλατιά κοιτάσματα έχουν ανακαλυφθεί σε μεγάλου είδους κοιτάσματα ουρανινίτη, στο Port Radium του Καναδά και στο Jachymov της Τσέχικης Δημοκρατίας.

V. Πέμπτη κατηγορία αποτελούν τα **σύνθετα λατυποπαγή κοιτάσματα**. Σε αυτά τα κοιτάσματα η μεταλλογένεση του ουρανίου πραγματοποιείται σε ακολουθίες βράχων, οι οποίες βρίσκονται πάνω από γρανιτικό υπόβαθρο (granitic basement complex). Ιζηματογενή και ηφαιστειογενή πλούσια σε χαλαζία χαρακτηρίζονται τα πετρώματα “host” των κοιτασμάτων αυτών. Επιπροσθέτως το μέταλλευμα βρίσκεται σε στρώματα (strata bound) αλλά και ασύμφωνα στρώματα (transgressive forms). Στο Roxdy Dows στο δυτικό τμήμα της Αυστραλίας υπάρχει σύνθετο λατυποπαγή κοιτάσμα ουρανίου, όπου το U βρίσκεται μαζί με Cu, Ag, και Au.

VI. Τα **ενδογενή κοιτάσματα** αποτελούν χώρο μεταλλογένεσης U, το οποίο σχετίζεται με ανατεκτικά πετρώματα ή ενδογενή πετρώματα με διαφορετική χημική σύσταση. Τέλος υπάρχουν ενδεικτικά παραδείγματα αυτού του τύπου κοιτάσματος στην Νότια Αφρική (Palabora) και στην Ναμπίντια στο ορυχείο Rössing (**Εικόνα 2.1.1**).

VII. Η έβδομη κατηγορία κοιτασμάτων U αφορά τα **κοιτάσματα φωσφορίτη**. Τα κοιτάσματα φωσφορίτη εμπεριέχουν χαμηλές περιεκτικότητες U, το οποίο βρίσκεται σε λεπτόκοκκο απατίτη ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ ). Όσον αφορά την εκμετάλλευση, τέτοιου είδους κοιτάσματα χαρακτηρίζονται ως ασυνήθης, λόγω του γεγονότος πως η εκμετάλλευση του U σε τέτοιο κοιτάσμα γίνεται μόνο ως ένα παραπροϊόν και βασίζεται απολύτως στην παραγωγή του φωσφορικού οξέος.

VIII. Τα **λατυποπαγή κοιτάσματα που έχουν υποστεί κατάρρευση** αποτελούν την όγδοη κατηγορία κοιτασμάτων U. Πρόκειται για κοιτάσματα που προκύπτουν σε κυκλικούς κάθετους «σωλήνες» οι οποίοι είναι γεμάτοι με αποσπασμένους βράχους. Σε τέτοια κοιτάσματα το U βρίσκεται συνήθως με Ag και Mo (μολυβδαίνιο), τα οποία είναι

συγκεντρωμένα στον γεμάτο «σωλήνα» από λατυποπαγή ιζηματογενή πετρώματα. Επίσης τα παραπάνω στοιχεία συγκεντρώνονται σε τοξοειδές ζώνες θραύσματος, οι οποίες περικλείουν τον «σωλήνα». Εκμετάλλευση U σε τέτοιου είδους κοιτάσματα πραγματοποιείται στην Arizona Strip των Η.Π.Α..

IX. Τα **ηφαιστειακά κοιτάσματα** ουρανίου αφορούν κοιτάσματα τα οποία έχουν οξέα ηφαιστειακά πετρώματα, των οποίων οι συγκεντρώσεις είναι περιορισμένες στην δομή τους. Επιπλέον αφορούν κοιτάσματα τα οποία είναι υπό την μορφή στρωμάτων (strata bound). Σε αυτήν την κατηγορία το U βρίσκεται και σχετίζεται με F και Mo. Υπάρχουν πολυάριθμα ηφαιστειακά κοιτάσματα U στην Κίνα, το Michelin του Καναδά, την πρώην Σοβιετική Ένωση, το Μεξικό και στο Macusani του Περού.

X. Το ουράνιο μπορεί να βρεθεί και σε επιφανειακά κοιτάσματα (surficial deposits), τα οποία κοιτάσματα είναι συνήθως πρόσφατα χρονικά και σε μικρά βάθη. Επίσης υπάρχουν περιπτώσεις τέτοιου είδους επιφανειακών κοιτασμάτων που μπορεί να έχουν ασβεστοποιηθεί. Επιπροσθέτως υπάρχουν τέτοιου είδους κοιτάσματα U και σε περιβάλλοντα που περιέχουν τύρφες, καρστικά σπήλαια, βάλτους και δομικά γεμίσματα (structural fills). Εν τέλη ορίζονται και ως ουρανοφόρα ιζήματα, των οποίων παραδείγματα έχουν ανακαλυφθεί σε ημίξηρα περιβάλλοντα όπως της Αυστραλίας, της Σομαλίας και της Ναμπίντια.

XI. Συγκεντρώσεις U μπορούν να βρεθούν σε μετασωματίτες που συνήθως παρεισδύουν από γρανίτες. Τέτοιου είδους κοιτάσματα U ονομάζονται **μετασωματικά κοιτάσματα**. Στις αρχές της παραγωγής του ουρανίου υπάρχουν παραδείγματα ορυχείων που είχαν μετασωματικά κοιτάσματα, όπως τα κοιτάσματα στο Ross Adams των Η.Π.Α.. Επίσης υπάρχουν ενεργά ορυχεία μετασωματικών κοιτασμάτων U στο Krinoy Rog της Ουκρανίας, όπως επίσης και στο Espinharas της Βραζιλίας.

XII. Το ουράνιο που βρίσκεται σε **μεταμορφικά κοιτάσματα** συνήθως εμφανίζεται χωρίς κάποια ένδειξη που να δείχνει μεταμορφική ορυκτοποίηση, που συναντιόνται συνήθως σε

μεταφαισειακά και μεταιζήματα. Υπάρχει ένα παράδειγμα μεταμορφικού κοιτάσματος U στο Forstau της Αυστραλίας.

XIII. Στα **κοιτάσματα λιγνίτη** το ουράνιο γεννιέται σε άργιλο, ψαμμίτη και ακριβώς δίπλα σε λιγνίτες. Η συγκεκριμένη κατηγορία έχει χαρακτηριστεί ως ασυνήθης, και έχει εμφανιστεί στις Σέρρες της Ελλάδας αλλά και στο κοιτάσμα στο Melonoe του Καζακστάν.

XIV. Μικρές συγκεντρώσεις U όπως και άλλων χημικών στοιχείων απαντούν και σε **κοιτάσματα μαύρου σχιστόλιθου**, παραδείγματα πιθανών κοιτασμάτων που έχουν βρεθεί σε χώρες όπως η Σουηδία, η Γερμανία και η Κίνα. Το U που βρίσκεται σε κοιτάσματα μαύρου σχιστόλιθου θεωρείται ως μία ασυνήθης πηγή για εκμετάλλευση.

XV. Όσον αφορά την κατηγορία **άλλοι τύποι κοιτασμάτων**, πρόκειται για κοιτάσματα που εμπεριέχουν U τα οποία δεν εντάσσονται σε κάποια συγκεκριμένη κατηγορία. Παραδείγματα αυτών υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή New Mexico των Η.Π.Α..



**Εικόνα 2.1.1:** Απεικόνιση ορυχείου Rössing το οποίο φέρει ενδογενή κοιτάσματα U.

## 2. Πόροι του Ουρανίου

Η πόροι του ουρανίου που χρησιμοποιούνται (κυρίως) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παίζουν πρωταρχικό ρόλο στην απόδοση αλλά και στην μελλοντική χρήση των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον πρέπει να σημειωθούν και οι κύριοι παράγοντες που αλληλοεπιδρούν με τους διαθέσιμους πόρους U, όπως η **προβλεπόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας**. Επιπλέον παράγοντες όπως είναι η **οικονομική ανταγωνιστικότητα**, οι **στρατηγικές διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων** καθώς και η **δημόσια αποδοχή** των πολιτών κάθε χώρας για την χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Παίρνοντας υπόψη όλων των παραπάνω, μπορεί να διαλευκανθεί η εικόνα των διαθέσιμων πόρων του ουρανίου στο κοντινό μέλλον, αλλά και μακροπρόθεσμα (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020).

Όσον αφορά για τους πόρους του ουρανίου, η Αυστραλία κατέχει τους περισσότερους πόρους σε κοιτάσματα της όπου ανέρχονται περίπου στους 1.692.700 τόνους (28%), όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 2.1**. Αμέσως επόμενο ανέρχεται το Καζακστάν το οποίο έχει το 15% του παγκόσμιου ποσοστού πόρων U. Επίσης αναφέρεται πως το 2019 το παγκόσμιο σύνολο σε πόρους ουρανίου (το οποίο έχει γνωστοποιηθεί) απαντά στους 6.147.800 τόνους.

**Πίνακας 2.1:** Πόροι του U ανά χώρα σε φθίνουσα σειρά (2019).

Χώρα	Τόνοι U	Παγκόσμιο Ποσοστό
Αυστραλία	1,692,700	28%
Καζακστάν	906,8	15%
Καναδάς	564,9	9%
Ρωσία	486	8%
Ναμίμπια	448,3	7%
Νότια Αφρική	320,9	5%
Βραζιλία	276,8	5%
Νιγηρία	276,4	4%
Κίνα	248,9	4%
Μογγολία	143,5	2%
Ουζμπεκιστάν	132,3	2%
Ουκρανία	108,7	2%
Βοτσβάνα	87,2	1%

Τανζανία	58,2	1%
Ιορδανία	52,5	1%
Η.Π.Α.	47,9	1%
Άλλα	295,8	5%
<b>Παγκόσμιο Σύνολο</b>	<b>6,147,800</b>	

**Πηγή:** (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020)

Για να κατανοηθεί στην συνέχεια η ζήτηση που υπάρχει στην αγορά για ουράνιο, πρέπει να εκτιμηθεί η ανάγκη των πυρηνικών εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής, όπως επίσης και τα ποσά της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται. Στον **Πίνακα 2.3** φαίνονται οι τιμές σε TWh που παράγεται σε σταθμούς ανά χώρα. Αρχικά παρατηρείται ότι η χώρα της Γαλλίας παράγει την περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια με διαφορά από τις υπόλοιπες, ιδιαίτερα στα έτη 2015, 2016 και 2018. Επίσης φαίνεται ραγδαία αύξηση στην παραγωγή από την Κίνα η οποία από το διάστημα 2015-2019 σημείωσε μια αύξηση συνολικά στα 168,9 TWh, ενώ σε ποσοστό είχε **αύξηση 104,77%** από το 2015. Όσον αφορά το **παγκόσμιο σύνολο** παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυτό **σημείωσε αύξηση κατά 8,4%** από το 2015-2019 (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020).

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την σχέση ζήτησης αγοράς είναι οι απαιτήσεις παραγωγής ουρανίου που σχετίζονται με τον αντιδραστήρα. Πρόσφατα συνολικά 20 αντιδραστήρες συνδέθηκαν στο δίκτυο αντιδραστήρων, ενώ 9 αντιδραστήρες έκλεισαν (2017-2018), ενώ το 2019 μετρήθηκαν οι συνολικοί αντιδραστήρες στους 450 (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020). Επίσης 50 αντιδραστήρες κατασκευάζονται και αναμένονται να λειτουργήσουν στο μέλλον. Αυτό σημαίνει πως **11 καινούργιοι αντιδραστήρες πλέον χρειάζονται ουράνιο**. Πιο συγκεκριμένα το 2021 μετρήθηκε πως η **ετήσια ανάγκη** για ουράνιο σε **62.496 tU**. Στον **Πίνακα 2.2** φαίνεται αναλυτικά η ανάγκη για τόνους U σε κάθε χώρα, με την Αμερική να είναι η πρώτη χώρα σε ανάγκη για U και με την Κίνα και την Ρωσία να την ακολουθούν. Αν συγκριθεί η πιο πρόσφατη παγκόσμια ανάγκη για ουράνιο σε σχέση με τους πόρους του ουρανίου που μετρήθηκαν το 2019, παρατηρείται πως οι πόροι που έχουν βρεθεί μέχρι στιγμής αρκούν για περίπου 100 χρόνια ακόμα περίπου, με την προϋπόθεση ότι οι ανάγκες μείνουν σχετικά ίδιες.



**Πίνακας 2.2:** Ανάγκες tU ανά χώρα (2021)

**Πηγή:** (World Nuclear Power Reactors | Uranium Requirements | Future Nuclear Power - World Nuclear Association, n.d.)

<b>Χώρα</b>	<b>Ανάγκη U (tn)</b>
Argentina	167
Armenia	50
Bangladesh	0
Belarus	179
Belgium	790
Brazil	340
Bulgaria	322
Canada	1492
China	9563
Czech Republic	706
Egypt	0
Finland	421
France	8233
Germany	521
Hungary	320
India	977
Iran	153
Japan	1396
Jordan	0
Kazakhstan	0
Korea (South)	4270
Lithuania	0
Mexico	226
Netherlands	69
Pakistan	787

Poland	0
Romania	185
Russia	5925
Saudi Arabia	0
Slovakia	359
Slovenia	127
South Africa	277
Spain	1221
Sweden	914
Switzerland	412
Thailand	0
Turkey	0
Ukraine	1876
UAE	907
United Kingdom	1259
USA	17,587
Uzbekistan	0
<b>Παγκόσμιο Σύνολο</b>	<b>62,496</b>

**Πίνακας 2.3:** Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πυρηνικά εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής (TWh)

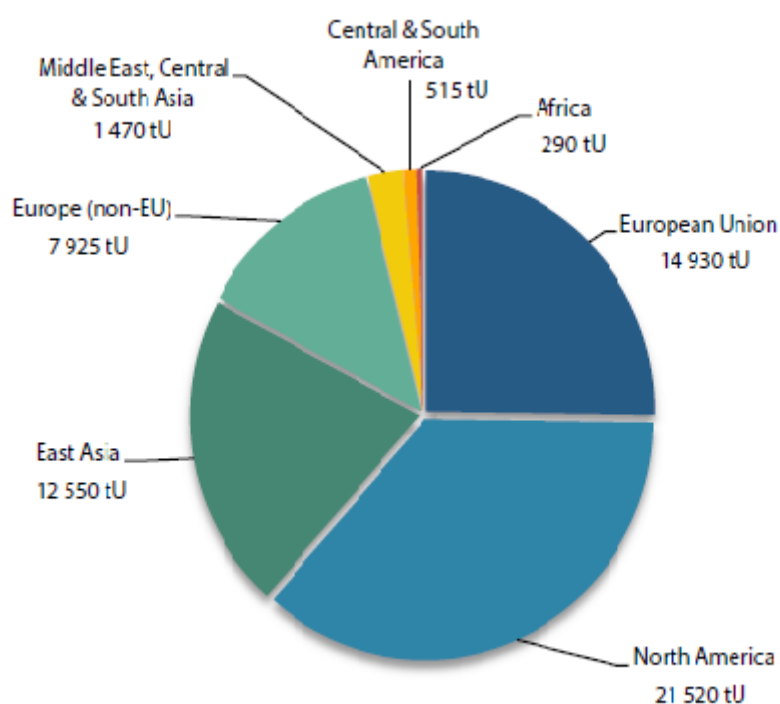
Χώρα	2015	2016	2018	2019
Αργετινή	6,5	7,7	6,5	7,9
Αρμνία	2,6	2,2	1,9	2,0
Βέλγιο	25,0	41,0	27,3	41,4
Βραζιλία	13,9	15,0	14,8	15,2
Βουλγαρία	14,7	15,1	15,4	15,9
Καναδάς	96,0	95,4	94,4	94,9
Κίνα	161,2	197,8	277,1	330,1

Τσεχική Δημοκρατία	25,3	22,7	28,3	28,6
Φιλανδία	22,4	22,3	21,9	22,9
Γαλία	416,8	384,0	359,9	382,4
Γερμανία	86,8	80,1	71,9	71,1
Ουγγαρία	14,9	15,2	14,9	15,4
Ινδία	34,6	35,0	35,4	40,7
Ιράν	3,2	5,9	6,3	5,9
Ιαπωνία	9,4	17,5	49,3	65,7
Κορέα	164,7	154,3	127,1	138,8
Μεξικό	11,6	10,3	13,2	10,9
Ολλανδία	3,9	3,7	3,3	3,7
Πακιστάν	4,3	5,4	9,3	9,1
Ρουμανία	10,7	10,4	10,5	10,4
Ρωσία	182,4	183,3	191,3	195,5
Δημοκρατία της Σλοβακίας	14,1	14,7	13,8	14,3
Σλοβενία	5,6	5,4	5,5	5,5
Νότια Αφρική	11,0	15,2	10,6	13,6
Ισπανία	54,8	56,1	53,4	55,9
Σουηδία	54,3	60,5	65,9	64,4
Ελβετία	22,0	20,0	24,5	25,4
Ουκρανία	82,4	76,1	79,5	78,1
Ενωμένο Βασίλειο	63,9	65,1	59,1	51,0
Η.Π.Α.	797,2	805,7	808,0	809,4

OECD	1888,7	1874,0	1877,7	1901,7
Παγκόσμιο Σύνολο	2451,3	2473,6	2562,7	2657,2

**Πηγή:** (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020.)

Στην **Εικόνα 2.1** απεικονίζονται οι ανάγκες για ουράνιο ανά ομάδες χωρών. Παρατηρείται πως οι δύο μεγαλύτερες ανάγκες προέρχονται από την βόρεια Αμερική και την Ευρωπαϊκή Ένωση, όπου από του 59.200 tU συνολικής παγκόσμιας ανάγκης αποτελούν το **61,6%**. Ενώ το αμέσως μεγαλύτερο κομμάτι των αναγκών το έχει η Ανατολική Ασία.



**Εικόνα 2.1:** Ανάγκες για Ουράνιο ανά ομάδες χωρών.

**Πηγή:** (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020.)

## 2.1 Κατηγορίες Παραγωγής Ουρανίου

Ξεκινώντας πρέπει να οριστούν οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζεται η παραγωγή του ουρανίου. Η παραγωγή του U χωρίζεται σε κύριες πηγές και δευτερεύουσες πηγές. Οι κύριες πηγές U αφορούν συμβατική εκμετάλλευση και παραγωγή, ενώ για τις δευτερεύουσες πηγές

πρόκειται για περισσεύματα κρατικών και εμπορικών αποθεμάτων. Επίσης περιλαμβάνεται η επεξεργασία αναλωμένων καυσίμων, παραγωγή από ουράνιο χαμηλού εμπλουτισμού (που περισσεύει από την παραγωγή υψηλού εμπλουτισμού) και τον επαναεμπλουτισμό απεμπλουτισμένου ουρανίου. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί πως γενικότερα υπάρχουν μη ολοκληρωμένες πληροφορίες όσον αφορά τις δευτερεύουσες πηγές, ενώ έχει διαπιστωθεί πως υπάρχει σημαντικό ποσό ουρανίου το οποίο είχε εξ ορυχθεί και ορισμένο ποσοστό του μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί δίνοντας ένα μερίδιο πίσω στην αγορά, ασχέτως που εκτιμήθηκε γενική μείωση αυτών των πηγών U για το 2020 και έπειτα.

**Πίνακας 2.2.3:** Αλλαγές σε αναγνωρίσιμους και ανακτήσιμους πόρους

<b>Κατηγορία πόρων</b>	<b>2017</b>	<b>2019</b>	<b>Διαφορά (1000 tU)</b>	<b>% διαφορά</b>
<b>Ταυτοποιημένο (σύνολο)</b>				
<\$ 260/kgU	7988,6	8070,4	81,8	1,0
<\$ 130/kgU	6142,2	6148,3	6,1	0,1
<\$ 80kg/U	2079,5	2007,6	-71,9	-3,5
<\$ 40/kgU <sup>(b)</sup>	1057,7	1080,5	22,8	2,2
<b>RAR</b>				
<\$ 260/kgU	4815,0	4723,7	-91,3	-1,9
<\$ 130/kgU	3856,0	3791,7	-73,3	-1,9
<\$ 80kg/U	1279,9	1243,9	-36,0	-2,8
<\$ 40kg/U <sup>(b)</sup>	713,4	744,5	31,1	4,4
<b>Συμπερασματικοί πόροι</b>				
<\$ 260kg/U	3173,0	3346,4	173,4	5,5
<\$ 130/kgU	2277,0	2355,7	78,7	3,5
<\$ 80kg/U	799,9	763,6	-36,3	-4,5

<\$ 40kg/U <sup>(b)</sup>	344,4	335,9	-8,5	-2,5
---------------------------	-------	-------	------	------

Σημείωση: Οι αλλαγές μπορεί να μην είναι ίδιες με τις αλλαγές μεταξύ 2017-2019 λόγω ανεξάρτητης στρογγυλοποίησης. (b) Οι πόροι στην κατηγορία κόστους <\$ 40/kgU και <\$ 80/kgU πρέπει να ληφθούν υπόψη με κάποια προσοχή γιατί μερικές χώρες δεν αναφέρουν εκτιμήσεις χαμηλού κόστους, συνήθως για λόγους εμπιστευτικότητας. Επίσης άλλες χώρες που δεν είχαν πρόσφατα κάποια εκμετάλλευση U, ίσως υποτιμούν το κόστος εξόρυξης.

Συγκεκριμένα την 1η Ιανουαρίου του 2017 εκτιμήθηκε πως οι κύριες πηγές του ουρανίου κάλυψαν το 95% των αναγκών, με το υπόλοιπο 5% να έχει καλυφθεί από δευτερεύουσες πηγές U. Στοιχειώδη διαφορά όμως παρατηρήθηκε την 1 Ιανουαρίου 2019 καθώς τότε διαπιστώθηκε πως η παγκόσμια παραγωγή του ουρανίου κάλυπτε 5% λιγότερο, από το ποσοστό του 2017, δηλαδή κάλυψε το 90%. Σημαντικό ρόλο έπαιξε και στην αξία της παραγωγής του ουρανίου τα χρόνια που ακολούθησαν έπειτα από το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα. Πριν από το ατύχημα επικρατούσε όλο και αυξανόμενη ζήτηση για παραγωγή U, με αποτέλεσμα την συνεχή αύξηση των τιμών, γεγονός που οι παραγωγοί U μπόρεσαν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020).

Μετά το ατύχημα στην Φουκουσίμα ωστόσο, παρατηρήθηκε συνεχή μείωση των τιμών του ουρανίου, το οποίο έχει φέρει ορισμένες αλλαγές στον τομέα της εκμετάλλευσης του ουρανίου. Βάση των παραπάνω παραγόντων η παγκόσμια παραγωγή του ουρανίου υπέστη μια γενικότερη επιβράδυνση, ειδικότερα στην εκμετάλλευση από ορυχεία (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020).

Τελευταία την άνοιξη του 2020 υπήρξε μια μικρή αλλά όχι διαρκή αύξηση στην τιμή του ουρανίου (περίπου 88\$/kgU), λόγω μερικών μειώσεων στην παραγωγή με την άφιξη της πανδημίας COVID-19. Τέλος έως το 2040 έχει εκτιμηθεί πως με τον τρεχούμενο ρυθμό παραγωγής ουρανίου, συμπεριλαμβάνοντας ήδη υφιστάμενες εκμεταλλεύσεις (συμβατικών και δευτερευόντων μεθόδων), **η παραγωγή θα είναι αρκετή έτσι ώστε να καλύψει τις ανάγκες**, χρησιμοποιώντας περίπου το 28% από τους πόρους που μετρήθηκαν το 2019. Εκτιμάται επίσης πως θα χρειαστεί ιδιαίτερη τεχνική ειδικότητα στον τομέα της παραγωγής, έτσι ώστε να καλυφθούν οι προβλεπόμενες ανάγκες είτε παραμείνουν ίδιες είτε αυξηθούν (International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency, 2020).

### 3. Εκμετάλλευση του Ουρανίου

Ο τομέας της εκμετάλλευσης του ουρανίου αποτελείται από διάφορες μεθόδους και κατηγορίες, αναλόγως το είδους κοιτάσματος ουρανίου που επιδιώκεται να εκμεταλλευτεί. Αρχικά από την οπτική γωνία της εκμετάλλευσης, τα κοιτάσματα χωρίζονται αντί σε πολλαπλές κατηγορίες, σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι:

- Κοιτάσματα είδους φλέβας, τα οποία έχουν πάχους από μερικά εκατοστά έως και μερικά δεκάδες μέτρα, που μπορεί να είναι και ανατρεπτικά.
- Κοιτάσματα ιζηματογενή τα οποία εμφανίζονται ως υποοριζόντια στρώματα, και με πάχος από μερικά εκατοστά έως μερικά δεκάδες μέτρα.

Οι επιχειρήσεις εκμετάλλευσης και εξόρυξης ουρανίου έχουν ένα προνόμιο σε σχέση με άλλα μέταλλα/ορυκτά και αυτό είναι το ότι οι διαδικασίες εξόρυξης είναι πιο εύκολες λόγω των μετρήσεων ραδιενέργειας. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως η ορυκτοποίηση στις γεωτρήσεις είναι πιο εύκολα αναγνωρίσιμες. Επιπλέον αυτό επιτρέπει την κατηγοριοποίηση του μεταλλεύματος πιο εύκολα σε κατηγορίες, όπως για παράδειγμα με διαφορετικά μεγέθη κόκκων. Επίσης μπορεί εύκολα το μέταλλευμα να χωριστεί ανάλογα και την συγκέντρωση του σε U, με την χρήση των οργάνων μέτρησης ραδιενέργειας. Εν τέλη η διαδικασία της εκμετάλλευσης του ουρανίου αναλόγως το βάθος και τα περιβαλλοντικά κριτήρια, μπορεί να πραγματοποιηθεί με υπαίθρια αλλά και υπόγεια εκμετάλλευση. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθούν οι διάφορες μέθοδοι για υπαίθρια και υπόγεια εκμετάλλευση καθώς και παράγοντες της ασφάλειας αλλά και της προστασίας του περιβάλλοντος (Hore-Lacy, 2016a).

#### 3.1 Μέθοδος Ανοιχτής Κοπής

Μια μέθοδος της υπαίθριας εκμετάλλευσης του ουρανίου, η οποία συχνά βρίσκει εφαρμογή, είναι αυτή της εξόρυξης ανοιχτής κοπής. Στην μέθοδο αυτή επιχειρείται να εξορυχθεί το μέταλλευμα το οποίο βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, ή κοντά σε αυτό. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου απαιτείται το μέταλλευμα να βρίσκεται σε τέτοιο βάθος και με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η απομάκρυνση των στείων υλικών να είναι εφικτή. Η εξόρυξη του μεταλλεύματος επιτυγχάνεται με την δημιουργία ραμπών, οι οποίες έχουν το κατάλληλο μέγεθος και κλίση για να επιτρέπουν την διέλευση βαρών οχημάτων αλλά και μεταλλευτικού εξοπλισμού.

Στην εφαρμογή της εξόρυξης ανοιχτής κοπής δημιουργούνται ταυτόχρονα τοιχία (pit walls) τα οποία έχουν άμεσο αποτέλεσμα για την ασφάλεια ενός μεταλλείου με υπαίθρια

εκμετάλλευση. Η γεωτεχνική αντοχή του εδάφους, είτε αυτό είναι βραχώδης ή ιζηματογενές, θα είναι ο βασικός παράγοντας στην σχεδίαση των τοιχιών. Επιπλέον είναι γνωστό πως οι πιο απότομοι λάκκοι (steeper pits) είναι οικονομικά πιο συμφέροντες. Αυτό όμως εμπεριέχει σημαντικό ρίσκο καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη γεωτεχνικοί παράγοντες και στόχοι, που χωρίς αυτούς υπάρχει πιθανότητα αστοχίας. Εκτός από το παραπάνω κίνδυνο υπάρχει και αυτός της πλημμύρας. Σε κάθε εξόρυξη ανοικτής κοπής θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή πλημμυρών, όπως για παράδειγμα τον έλεγχο της ροής των υπόγειων υδάτων.



**Εικόνα 3.1.1:** Υπαίθρια εκμετάλλευση Lichtenberg, Γερμανία, 1956-1976, που τώρα μεγάλο τμήμα της έχει συμπληρωθεί με άλλα υλικά.

Επιπροσθέτως η μέθοδος με εξόρυξη ανοικτής κοπής εφαρμόζεται μεγαλύτερο βάθος όσον αφορά τις εκμεταλλεύσεις ουρανίου, όταν η κλίση του κοιτάσματος και το μέγεθος του είναι μεγαλύτερα. Υπάρχουν πολλαπλά παραδείγματα που δείχνουν τέτοια ορυχεία τα οποία φτάνουν εκατοντάδες μέτρα βάθος και πάνω από ένα χιλιόμετρο σε μήκος .

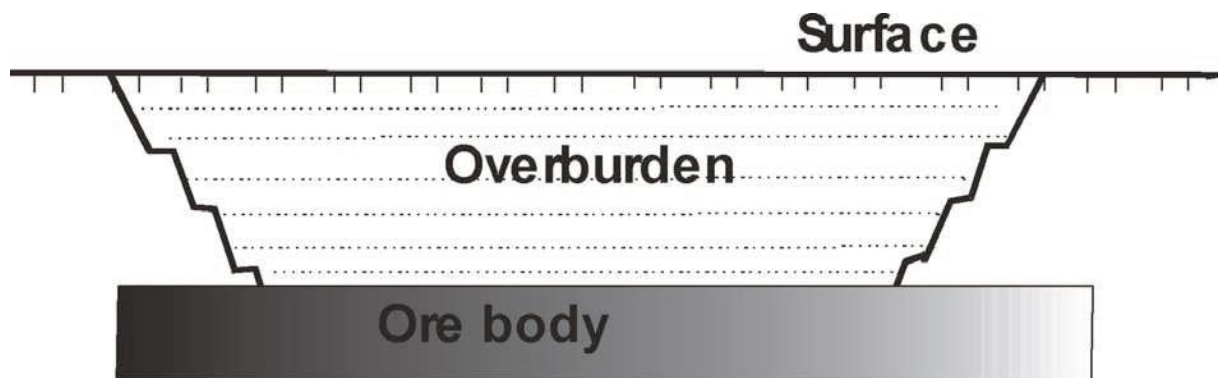


### 3.2 Μέθοδος Ανοικτού Λάκκου

Η εξόρυξη με την μέθοδο ανοικτού λάκκου αφορά την εξόρυξη του μεταλλεύματος με την χρήση ενός οι περισσότερων πάγκων (benches), τα οποία πραγματοποιούνται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Επιπλέον η μέθοδος ανοικτού λάκκου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξόρυξη ορυκτών μεταλλικών αλλά και αμέταλλων. Ταυτόχρονα τα στεία υλικά κατανέμονται σε συγκεκριμένο χώρο διάθεσης ο οποίος βρίσκεται εκτός του λάκκου. Η μέθοδος επίσης μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλου αλλά και μικρού σκέλους κοιτάσματα, ακόμα και σε περιοχές που εξορύσσονται <20.000t, που αν και προ απαιτείται μεγάλη επένδυση κεφαλαίου, η μέθοδος προσφέρει μεγάλη παραγωγικότητα, καλές συνθήκες ασφάλειας και μειωμένο κόστος λειτουργίας.

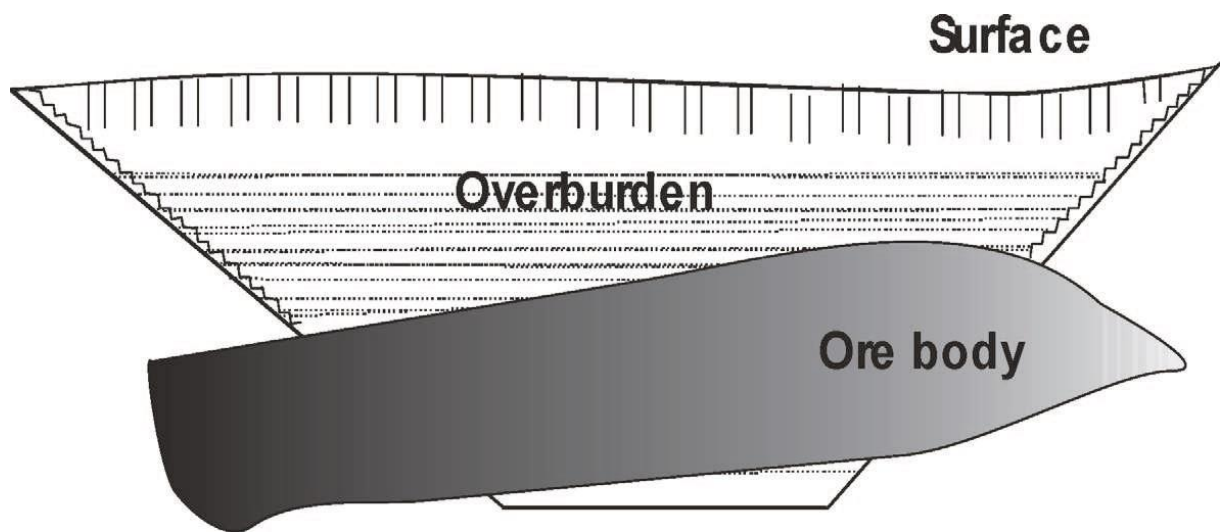
Εφαρμογή βρίσκει η παραπάνω μέθοδος συνήθως σε κοιτάσματα με απότομες φλέβες με μεγάλη κλίση, σε διάσπαρτα σώματα μεταλλεύματος και σε στρώματα μεταλλεύματος στα οποία η εξέλιξη της εξόρυξης οδηγεί σε αυξανόμενα βάθη. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται σε μεταλλικά στρώματα (βωξίτης, αλουμίνιο, ουράνιο, χαλκός) και σχεδόν σε όλα τα μη μεταλλικά στρώματα (φωσφορικά, άνθρακας). Η εξόρυξη μπορεί να πάρει σχεδόν κάθε σχήμα, αλλά η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη μορφή είναι αυτής του κώνου. Η εξόρυξη με σχήμα κώνου χρησιμοποιείται όταν το μέταλλευμα είναι υπό την μορφή: Τύπου φλέβας, σε σχήμα σωλήνα, σε απότομα στρώματα μεγάλης κλίσης και τέλος σε μεταλλεύματα ακανόνιστου σχήματος. Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι κύριες διαφοροποιήσεις σχημάτων μεταλλεύματος, οι οποίες βρίσκονται σε εξορύξεις ανοικτού λάκκου:

- I. Επίπεδο στρώμα μεταλλεύματος σε επίπεδο έδαφος. Απαντούν συνήθως άνθρακας και λευκόχρυσος.

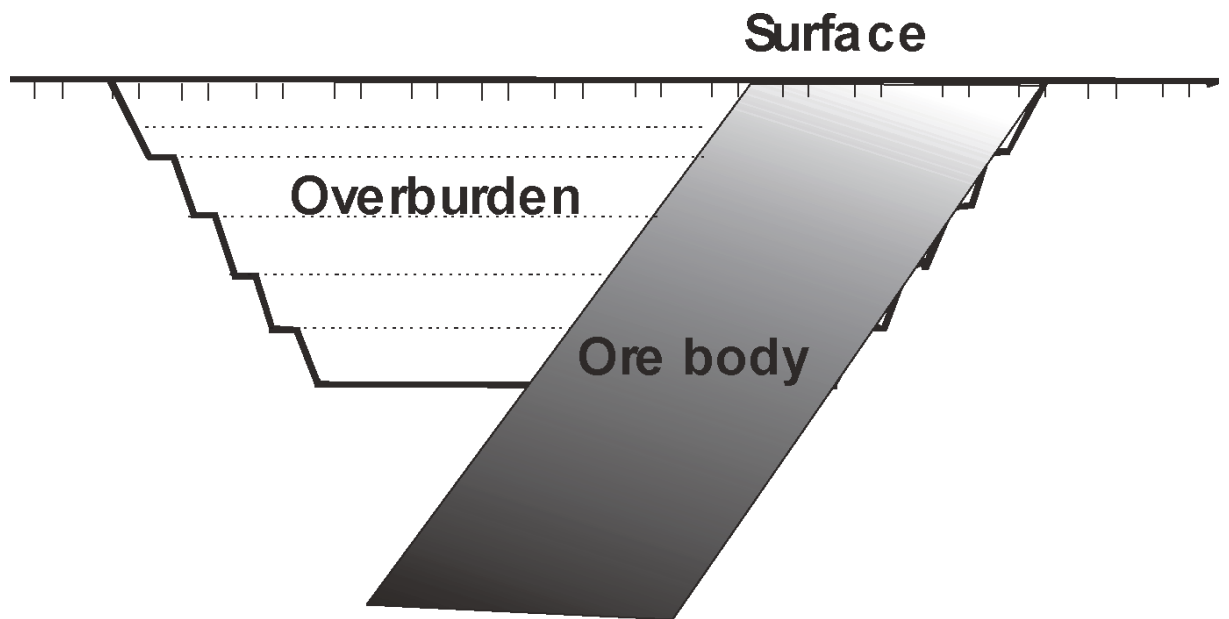


II.

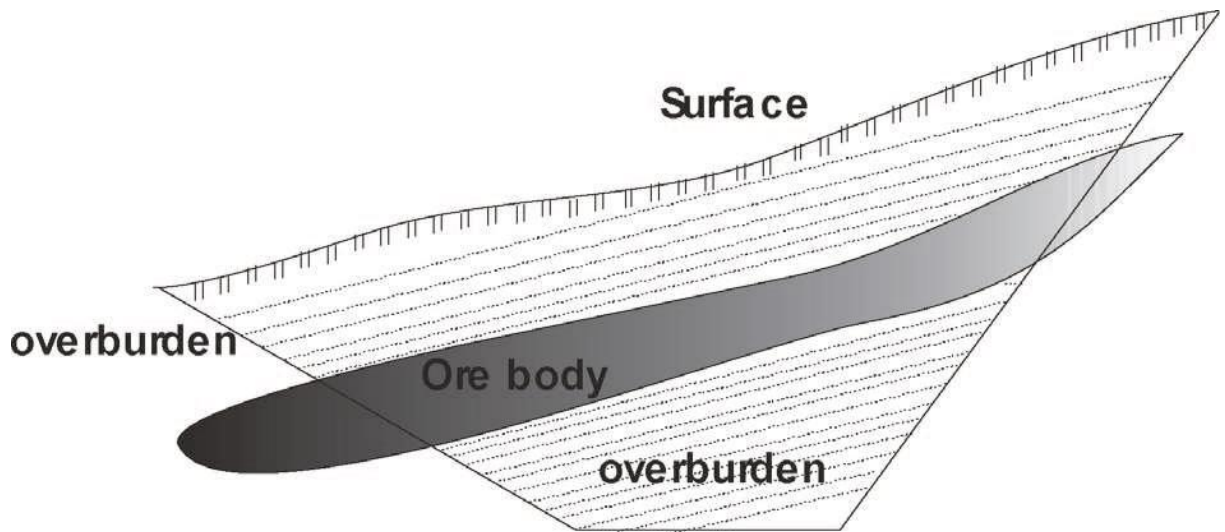
- III. Κοίτασμα μεγάλου μεγέθους σε επίπεδο έδαφος. Απαντούν συνήθως κοιτάσματα σουλφιδίου και μεταλλεύματα χαλκού.



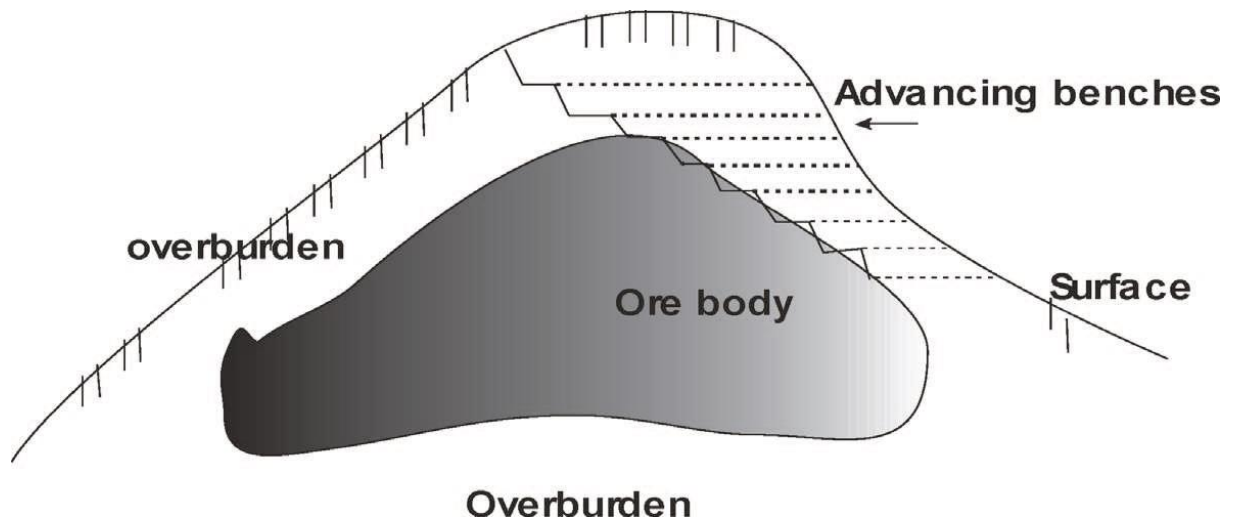
- IV. Dripping seam or bed, επίπεδο έδαφος. Απαντά συνήθως ο ανθρακίτης.



V. Μεγάλου μεγέθους κοίτασμα, επίπεδο έδαφος. Απαντά συνήθως θειούχος χαλκός.



VI. Εναποθέσεις με χοντρά στρώματα. Απαντά συνήθως χαλκός και άνθρακας.



### **Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα**

Η μέθοδος εξόρυξης ανοικτού λάκκου επιφέρει ορισμένα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία έχουν κύριο ρόλο στο στάδιο της απόφασης μεθόδου όταν πρόκειται για την εξόρυξη κάποιου ορυκτού του ουρανού αλλά και σε πολλά άλλα ορυκτά.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Χαμηλό κόστος σε σχέση με την μέθοδο εξόρυξης ανοικτού χυτού (open cast mining).
- Καλή αποληψιμότητα σε συνδυασμό με αυξημένη ασφάλεια λόγω των μειωμένων κινδύνων σε αντίθεση με υπόγειες μεθόδους εκμετάλλευσης.
- Χαμηλή χρήση εκρηκτικών και τρυπανιών.
- Μικρές απαιτήσεις για εξειδικευμένο προσωπικό, συνήθως μόνο για την χρήση εκρηκτικών και γεωτρήσεων.
- Υψηλή παραγωγικότητα όπου εξορύσσονται περίπου 100-400 τόνοι ανά βάρδια εργαζόμενου.

- Η ανάπτυξη του μεταλλείου μπορεί να προγραμματιστεί για πρόωμη εκκίνηση των εργασιών.
- Χαμηλό κόστος της θραύσης του βράχου από γεώτρηση και χρήση εκρηκτικών σε αντίθεση με υπόγειες μεθόδους.
- Απλή πρόσβαση στο κοίτασμα και απλή ανάπτυξη καθώς απαιτούνται ελάχιστα ανοίγματα.
- Αποτελεί ευέλικτη μέθοδο και επιτρέπει την μεταβολή της παραγωγής εάν η ζήτηση το απαιτήσει.
- Ουσιαστικά έχει σχεδόν απεριόριστο ρυθμό παραγωγής.
- Επιτρέπει και την επιφανειακή εξόρυξη.

Τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Ο περιορισμός από την αναλογία αποκάλυψης
- Υψηλά προαπαιτούμενο επενδυτικό κεφάλαιο λόγω της χρήσης μεγάλου και ακριβού μεταλλευτικού εξοπλισμού
- Το κοίτασμα πρέπει να είναι μεγάλων διαστάσεων για να μπορέσει να αποδώσει η μέθοδος και να εκμεταλλευτεί το χαμηλό κόστος της
- Οι καιρικές συνθήκες μπορούν εύκολα να είναι καταστροφικές για την επιχείρηση.
- Απαιτεί μια μεγάλη επιφάνεια για την απόθεση του στείρου υλικού το οποίο θα είναι σε μεγάλες ποσότητες.
- Ενδέχεται η επιφάνεια να υποστεί ζημιές που αυτό θα απαιτήσει επιπλέον δαπάνες για την αποκατάσταση του εδάφους.
- Υπάρχει περιορισμός στο βάθος (έως περίπου 500m) λόγω του ορίου της τεχνολογίας, με αποτέλεσμα εάν ένα τμήμα του κοιτάσματος είναι πιο βαθύ από τα όρια, τότε θα χρειαστούν υπόγειες μέθοδοι.

### **Αναλογία Αποκάλυψης**

Στην μέθοδο εξόρυξης ανοικτού λάκκου η παράμετρος της αναλογίας αποκάλυψης αντιπροσωπεύει την ποσότητα του στείρου υλικού που πρέπει να απομακρυνθεί, έτσι ώστε να επιτευχθεί η αποκάλυψη μιας μονάδας του μεταλλεύματος. Δηλαδή αποτελεί την αναλογία μεταξύ του αριθμού τόνων του στείρου υλικού που απομακρύνθηκαν σε σχέση με τον αριθμό των τόνων του μεταλλεύματος. Επιπλέον υπάρχει και ο όρος της συνολικής αναλογίας αποκάλυψης που είναι ο συνολικός όγκος απορριμμάτων-στείρου υλικού προς τον συνολικό όγκο του μεταλλεύματος. Το επιθυμητό είναι να έχουμε όσον τον δυνατό μικρότερη αναλογία αποκάλυψης, διότι αυτό σημαίνει πρακτικά πως θα πρέπει να αφαιρεθεί μικρότερος αριθμός στείρου υλικού για την αποκάλυψη του μεταλλεύματος. Που αυτό με την σειρά του σημαίνει μικρότερο λειτουργικό κόστος.

Στην περίπτωση ανάπτυξης ενός μεταλλείου είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η μέγιστη αναλογία αποκάλυψης, η οποία συμβάλει για τον καθορισμό των ορίων των λάκκων. Στα

αγγλικά ο όρος αυτός ονομάζεται  $SR_{max}$  και ορίζεται ως ο λόγος αποκάλυψης στο μέταλλευμα στο τελικό όριο του λάκκου όπου το περιθώριο κέρδους είναι μηδέν.

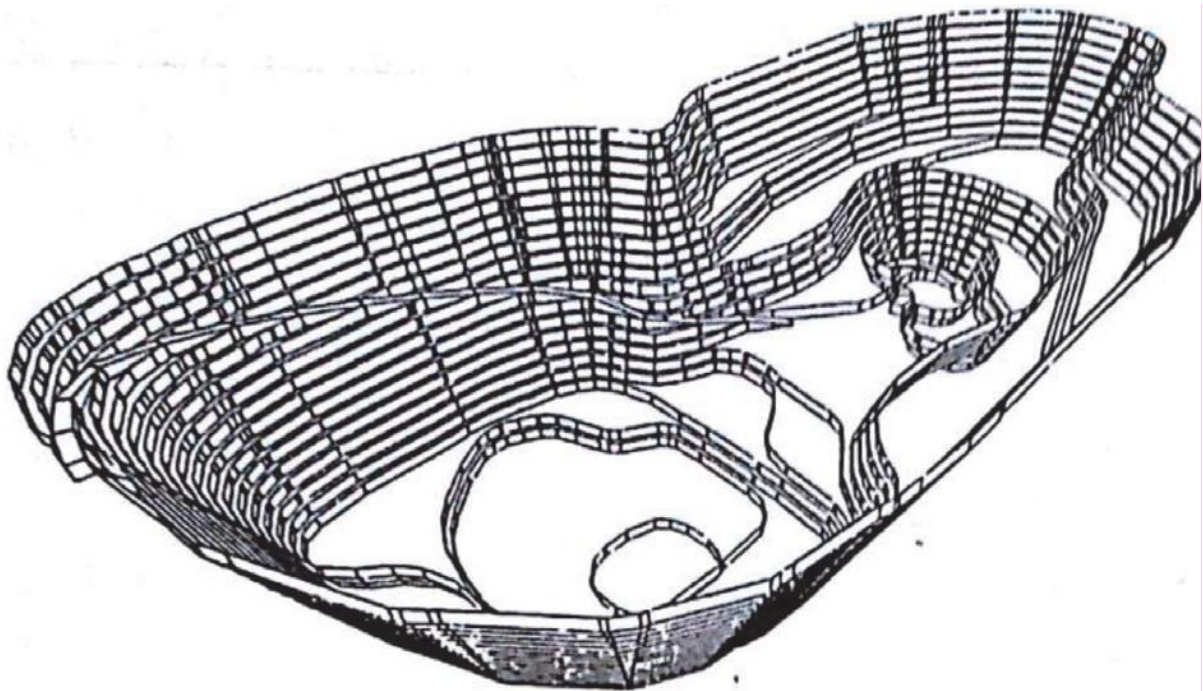
Το παραπάνω υπολογίζεται με τον τύπο:

$$SR_{max} = (\text{Αξία του μεταλλεύματος} - \text{Κόστος παραγωγής}) / \text{κόστος αποκάλυψης}$$

Αλλά και με τον τύπο:

$$SR_{max} = \text{Επιτρεπόμενη αποκάλυψη (\$/tn)} / \text{κόστος αποκάλυψης (m}^3 / \text{tn)}.$$

Εφόσον έχει υπολογιστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη αποκάλυψη ( $SR_{max}$ ) στην συνέχεια μπορούν να βρεθούν τα όρια των λάκκων παίρνοντας υπόψη τις φυσικές, οικονομικές, γεωμετρικές και μηχανικές προϋποθέσεις του κοιτάσματος. Στην εικόνα 6 απεικονίζεται μια εκμετάλλευση με την μέθοδο των ανοικτών λάκκων, οι οποία έχει  $SR_{max} = 2,5m^3/tn$ .



**Εικόνα 3.6:** Απεικόνιση εκμετάλλευσης με την μέθοδο των ανοικτών λάκκων.

### 3.3 Μέθοδοι Απομάκρυνσης και Διαχείρισης του Στείρου Υλικού

Σε κάθε εκμετάλλευση ενός ορυκτού απαιτούνται να πραγματοποιηθούν διάφορες προκαταρκτικές εργασίες έτσι ώστε να ξεκινήσει η πλήρη εκμετάλλευση. Μια από αυτές τις εργασίες είναι και η απομάκρυνση του στείρου υλικού με στόχο την αποκάλυψη του ορυκτού, στην περίπτωση αυτή του ουρανίου. Ο όγκος που θα πρέπει να απομακρυνθεί και να διαπεραστεί διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση και επηρεάζεται από την αναλογία αποκάλυψης (stripping ratio). Εκτός της μεθόδου απομάκρυνσης με βυθοκόρηση, όλες οι

άλλες μέθοδοι λειτουργούν με κυκλική δομή, πιο συγκεκριμένα: Διάτρηση και ανατίναξη, φόρτωμα και μεταφορά. Η αναλογία αποκάλυψης εφόσον έχει βρεθεί είναι αυτή που θα καθορίσει το ποσοστό που πρέπει να αφαιρεθεί, οι πιο συνηθέστερες αναλογίες που χρησιμοποιούνται σε μεγάλου σκέλους εκμεταλλεύσεις, είναι αναλογία 2:1 και αναλογία 4:1. Αναλογίες που βρίσκονται άνω του 6:1 θεωρείται πως δεν συμφέρουν οικονομικά άρα και απορρίπτονται (H. Altit et al., 2021).

Η διαχείριση του στείρου υλικού είναι από τις πιο σημαντικές εργασίες που πραγματοποιούνται σε υπαίθριες εκμεταλλεύσεις και πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά καθώς επηρεάζει και την κύρια εκμετάλλευση αλλά και την περιβαλλοντική αποκατάσταση. Υπάρχουν σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διαχείριση των στείρων υλικών όπως: Γεωτεχνικές και γεωλογικές ιδιότητες του εδάφους, μορφολογία και τοπογραφία. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει αυστηρή διαχείριση για την τήρηση περιβαλλοντικών απαιτήσεων και οικονομικών στόχων έτσι ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Τέτοιοι στόχοι-απαιτήσεις είναι οι αλληλεπιδράσεις που θα υπάρξουν με τα υπόγεια ύδατα, η ευστάθεια της πλαγιάς (slope stability) και ζητήματα μεταφοράς και απομάκρυνσης του στείρου υλικού.

Η παραπάνω διαδικασία χωρίζεται σε δύο φάσεις: Η φάση της αφαίρεσης του υλικού και η φάση της διάθεσης του υλικού. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχουν συγκεκριμένοι στόχοι και ιδιότητες που πρέπει να τηρηθούν. Οι στόχοι αυτοί θα αναφερθούν παρακάτω αναλόγως στις δύο φάσεις της διαχείρισης του υλικού.

**Φάση αφαίρεσης του στείρου υλικού:** Στην φάση αυτή ελέγχονται γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, λογιστικά χαρακτηριστικά και οι περιβαντολλογικές επιπτώσεις.

Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά: Περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του στείρου υλικού όπως κοκκομετρία, μέγεθος κόκκων, εδαφικοί σχηματισμοί, ποσοστό υγρασίας, πλαστικότητα του εδάφους, εδαφική αντοχή, φέρουσα ικανότητα και αν αυτή είναι συμβατή με τις εγκαταστάσεις της εκμετάλλευσης αλλά και με τον εξοπλισμό. Επιπλέον αφορά και την σταθερότητα των φυσικών πλαγιών και αυτών που δημιουργούνται από τις τεχνικές παρεμβάσεις.

Λογιστικά χαρακτηριστικά: Τα λογιστικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν την τοπογραφία και την μορφολογία της περιοχής εκμετάλλευσης, δηλαδή τις αποστάσεις και κλίσεις. Την προσβασιμότητα η οποία αφορά κύριους και δευτερεύον δρόμους, τυχόν ράμπες, σιδηροδρομικοί δρόμοι. Επίσης τα λογιστικά επηρεάζονται και από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά: Σε αυτά εμπεριέχονται περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως αλληλεπιδράσεις στα υπόγεια ύδατα υπό την μορφή χημικών ρύπων που έρχονται σε επαφή με τον νερόν, όπως λάδια, όξινη αποστράγγιση και καύσιμα. Επιπλέον επηρεάζεται και η ατμόσφαιρα με την ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από CO, NO και υδρογονάνθρακες που απελευθερώνονται. Τέλος υπάρχει και σημαντική ρύπανση στο έδαφος με διάφορες μορφές. Μερικές από αυτές είναι δονήσεις λόγω της χρήσης βαρέων οχημάτων και μηχανολογικού εξοπλισμού, επίσης καταστρέφεται σε μεγάλο βαθμό το τοπίο λόγω του κινδύνου πλημμύρας, υπερχειλίσης και γενικότερης διάβρωσης του εδάφους.

**Φάση διάθεσης του στείρου υλικού:** Στην φάση αυτή ελέγχονται ξανά τα τρία προηγούμενα ειδών χαρακτηριστικά με τα επιπλέον γεωτεχνικά χαρακτηριστικά όπως της σταθερότητας του εδάφους λόγω κατολισθήσεων, τα υπόγεια ύδατα με την χρήση σωληνώσεων φιλτραρίσματος, αλλά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά που δημιουργούνται επιπλέον όπως εναέρια σκόνη τύπου πυριτίου και αμιάντου (Suleman & Faseel , 2016).

Στην διαδικασία των δύο φάσεων της διαχείρισης και απομάκρυνσης του στείρου υλικού η γεωτεχνική σκοπιά έχει σημαντικό ρόλο καθώς επηρεάζει πολλαπλά χαρακτηριστικά της διαδικασίας. Υδραυλικές και μηχανικές ιδιότητες του εδάφους αποτελούν βασικούς παράγοντες όπου επηρεάζουν θεμελιώδεις πτυχές όπως η φέρουσα ικανότητα, η αντοχή του εδάφους και η σταθερότητα (Stacey et al., 2003). Η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους σε συνδυασμό με το κολλώδες του εδάφους μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την εκσκαφή δημιουργώντας φραγμό στην λειτουργία τους (Hollmann & Thewes, 2013). Οι εργασίες εκμετάλλευσης δημιουργούν συχνά απορρίμματα τα οποία εμπεριέχουν αργιλικά τμήματα τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την συμπεριφορά ενοποίησης. Άρα λοιπόν η εκτίμηση των ιδιοτήτων της ενοποίησης είναι απαραίτητη για την κατανόηση της συμπεριφοράς των λιμνών υδαρούς (slurry ponds) (Thewes & Hollmann, 2016).

Όσον αφορά την περιβαλλοντική επίπτωση της απομάκρυνσης και διάθεσης του στείρου υλικού, αυτή είναι μέγιστης σημασίας καθώς επηρεάζει πολυάριθμα περιβαλλοντικά συστήματα. Είτε πρόκειται για απόθεση του αποκρυστάλλωμένου υλικού εντός του λάκκου είτε στην περίπτωση που μεταφέρεται αλλού, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της αλληλεπίδρασης του υλικού με το νερό. Η αλληλεπίδραση του υλικού με το νερό μπορεί να φέρει ρύπανση σε επιφανειακά αλλά και υπόγεια ύδατα, λόγω των βαρέων μετάλλων που έρχονται σε επαφή με το νερό. Επιπλέον υπάρχει και ρίσκο για πολυάριθμες διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα (Mossa & James, 2013).

Μόνο όταν έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι παραπάνω παράμετροι προσεκτικά μπορεί να ολοκληρωθεί μια προμελέτη σε ένα μεγάλο μεταλλευτικό έργο. Εφόσον λοιπόν έχουν αξιολογηθεί όλοι οι τεχνικοί, περιβαλλοντικοί και οικονομικοί παράγοντες, επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Εν τέλη μπορεί να προκύψει μια κοινή μεθοδολογία ασχέτως με την κάθε περίπτωση, η οποία έχει και συγκεκριμένα προβλήματα και στόχους. Για να υπάρξει μια ορθολογική προσέγγιση σε αυτές τις απαιτήσεις λοιπόν, θα χρειαστούν να εφαρμοστούν εργαστηριακές δοκιμές στο πεδίο ενδιαφέροντος. Οι δοκιμές αυτές έχουν την ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού με τις απαραίτητες γνώσεις όπως μηχανικοί περιβάλλοντος, μηχανικοί υλικών, μηχανικοί ορυχείων αλλά και γεωφυσικοί. Άρα συνοψίζεται πως χρειάζεται μια ομάδα πολλαπλών πεδίων που εκτός από τις δοκιμές, θα αναλάβει και την αριθμητική ανάλυση (των αποτελεσμάτων), αναδρομική ανάλυση και την διαρκή παρακολούθηση, για όσο διάστημα είναι απαραίτητη (Oggeri et al., 2019).



**Table 1**

Overburden removal and disposal methods related to ground type.

(a) Overburden removal methods related to ground type		Overburden ground type			Groundwater	Topographic context <sup>1</sup>			Equipment for overburden disposal <sup>2</sup>					
Overburden removal/ excavation method in open pits	Continuous cycle	Soil	Hard soil/soft rock	Hard rock	Capability of working under water table	Flat (lowlands)	Low to moderate slope (hills)	Moderate to steep slope (mountains)	Machine itself <sup>1</sup>	Dumper	Belt conveyor	Rail/ rubber-tired wagon	Pipeline (slurry/suspension)	Aerial tramway/cable way
						Surface miner	No	Yes	No	No	No	Yes	Yes	No
	Discontinuous cycle	Bucket wheel excavator			No	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	No	Yes
		Chain bucket excavator			No	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	No	Yes
		Chain bucket dredge			Yes	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No
		Suction/cutter suction dredge			Yes	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No
		Clamshell bucket dredge			Yes	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No
		Dragline				No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	No	No
		Drill and blasting				No	Yes	Yes	Yes	-	Yes	Yes	Yes	No
		Excavator				Yes (on pontoon)	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No
					Hydraulic breaker (hammer)	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No
					Track-type tractor - dozer (+ ripper)	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No
					Wheel dozers	No	Yes	Yes	No	Yes	No	No	No	No
					Wheel or track loaders	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No
					Wheel-tractor scrapers	No	Yes	Yes	No	Yes	No	No	No	No
(b) Overburden disposal methods related to ground type		Overburden ground type												
Overburden disposal method in open pits	Soil				Hard soil/soft rock			Hard rock						
	Efficiency depending on moisture content (stickiness/adhesion)	Loader/shovel (eventually suitable also for dumping within short distance)			On-site crusher to reduce oversize fragments if necessary			On-site crusher to reduce oversize fragments if necessary						
	Efficiency depending on moisture content (stickiness/adhesion)	Loader/shovel+dumper			On-site crusher to reduce oversize fragments if necessary			On-site crusher to reduce oversize fragments if necessary; Wear and abrasivity issues						
	Not suitable for high moisture content	belt conveyor			On-site crusher to modify grain size distribution			On-site crusher to modify grain size distribution						
	Depending on moisture content	Rail/rubber-tired wagons			On-site crusher to reduce oversize fragments if necessary			On-site crusher to reduce oversize fragments if necessary						
	Clog up risk (stickiness/adhesion)	Pipeline (slurry/suspension)			Only for fine-crushed materials			Only for fine-crushed materials						
		Aerial tramway/cable way			Clog up risk (sedimentation)			Clog up risk (sedimentation)						
					On-site crusher to reduce oversize fragment if necessary			On-site crusher to reduce oversize fragment if necessary						

<sup>1</sup> Typical topographic context in which the machine is adopted.

<sup>2</sup> Suitable equipment for input and/or exit overburden disposal associated to excavation method; and 1 is as a function of hauling and dumping distance.

### Πίνακας 3.3.1: Μέθοδοι διαχείρισης στείρου υλικού σε σχέση με το είδος του εδάφους.

Σε ένα μεταλλευτικό έργο για να υπάρχει έλεγχος των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους για την διαχείριση του στείρου υλικού εφαρμόζονται συγκεκριμένες εργαστηριακές δοκιμές είτε αποκλειστικά στο εργαστήριο είτε in-situ, δηλαδή στο πεδίο. Μερικές από τις συνηθισμένες εργαστηριακές δοκιμές που σχετίζονται με την γεωμηχανική πτυχή της γεωτεχνικής μηχανικής και χρησιμοποιούνται στην διαχείριση στείρων υλικών είναι τα εξής (Oggeri et al., 2019):

#### Εργαστηριακές Δοκιμές:

**USCS Soil Classification:** Η δοκιμή αυτή αποτελεί ένα ενοποιημένο σύστημα ταξινόμησης των εδαφών για την χρήση τους στην μηχανική. Στο συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης το έδαφος χωρίζεται σε ομάδες βάση των χαρακτηριστικών πλαστικότητας και το μέγεθος των κόκκων. Η κάθε ομάδα προσδιορίζεται με ένα σύμβολο, τα σύμβολα χωρίζονται σε κύρια και δευτερεύοντα.

Τα κύρια και δευτερεύοντα σύμβολα είναι τα εξής:

**Κύρια:**

G: Gravel (χαλίκι)

S: Sand (άμμος)

M: Silt (λάσπη)

C: Clay (άργιλος)

O: Organic (οργανικό)

Pt: Peat (τύρφη)

**Δευτερεύοντα:**

W: Well Graded (μέγεθος μεγάλου εύρους)

P: Poorly Graded (μέγεθος μικρού εύρους)

M: Non-Plastic Fines

C: Plastic Fines

L: Low Plasticity (μικρή πλαστικότητα)

H: High Plasticity (μεγάλη πλαστικότητα)

**Πίνακας 3.3.2: UCSC Soil Classification**

Major divisions			Group symbol	Group name
Coarse grained soils more than 50% retained on No.200 (0.075 mm) sieve	gravel > 50% of coarse fraction retained on No. 4 (4.75 mm) sieve	clean gravel <5% smaller than #200 Sieve	<b>GW</b>	well-graded gravel, fine to coarse gravel
			<b>GP</b>	poorly graded gravel
		gravel with >12% fines	<b>GM</b>	silty gravel
			<b>GC</b>	clayey gravel
	sand ≥ 50% of coarse fraction passes No.4 sieve	clean sand	<b>SW</b>	well-graded sand, fine to coarse sand
			<b>SP</b>	poorly graded sand
		sand with >12% fines	<b>SM</b>	silty sand
			<b>SC</b>	clayey sand
Fine grained soils more than 50% passes No.200	silt and clay liquid limit < 50	inorganic	<b>ML</b>	silt
			<b>CL</b>	clay

**Plasticity Index:** Η εργαστηριακή δοκιμή του δείκτη πλαστικότητας το οποίο εκφράζει σε τρεις ειδών καταστάσεις ένα δείγμα του εδάφους. Αυτές είναι το στερεό, ημιστερεό, πλαστικό και το υγρό. Η περιεκτικότητα σε νερό στο έδαφος καθορίζει και σε ποια κατάσταση ανήκει το δείγμα. Το δείγμα αφορά μόνο λεπτά σωματίδια <0,425mm και εκφράζεται με το σύμβολο PI (plasticity index). Το PI είναι η διαφορά του LL (όριο

υδαρότητας) μείον το PL (όριο πλαστικότητας). Επομένως ισχύει το εξής:  $PI = LL - PL$  (TECHNICAL GUIDE L-G-003, 2015).

**Πίνακας 3.3.3:** Συγκριτικός πίνακας μεταξύ εδάφους με υψηλή πλαστικότητα και εδάφους με χαμηλή πλαστικότητα.

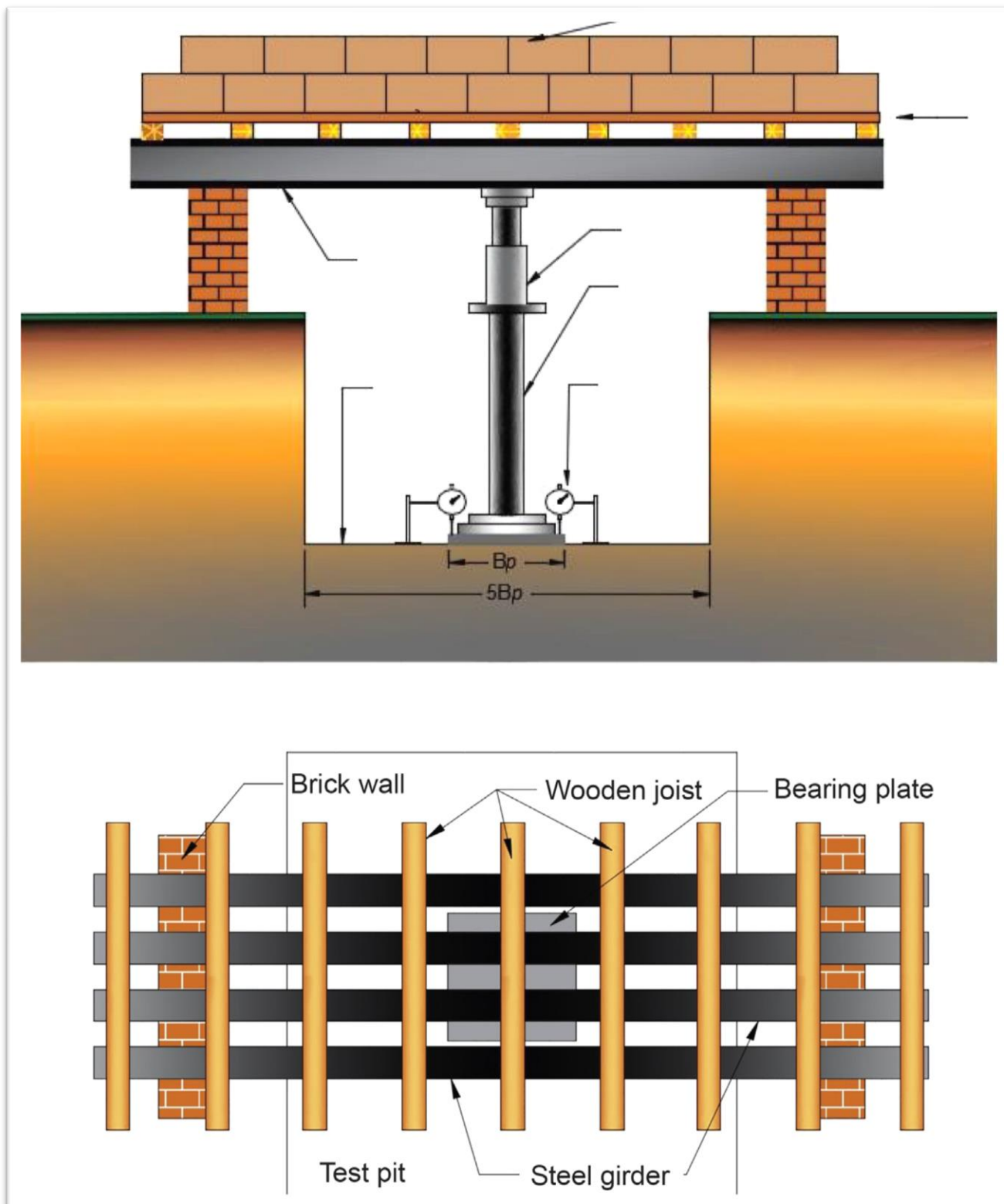
Πηγή: (TECHNICAL GUIDE L-G-003, 2015)

<u>Έδαφος Υψηλής Πλαστικότητας</u>	<u>Έδαφος Χαμηλής Πλαστικότητας</u>
Συνήθως παρουσιάζει μεγάλη αλλαγή στην περιεκτικότητα σε υγρασία	Παρουσιάζει χαμηλή αλλαγή στην περιεκτικότητα σε υγρασία
Έχει πολύ χαμηλή διαπερατότητα	Έχει υψηλή διαπερατότητα
Έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο	Χαμηλή περιεκτικότητα σε άργιλο

In-situ Δοκιμές:

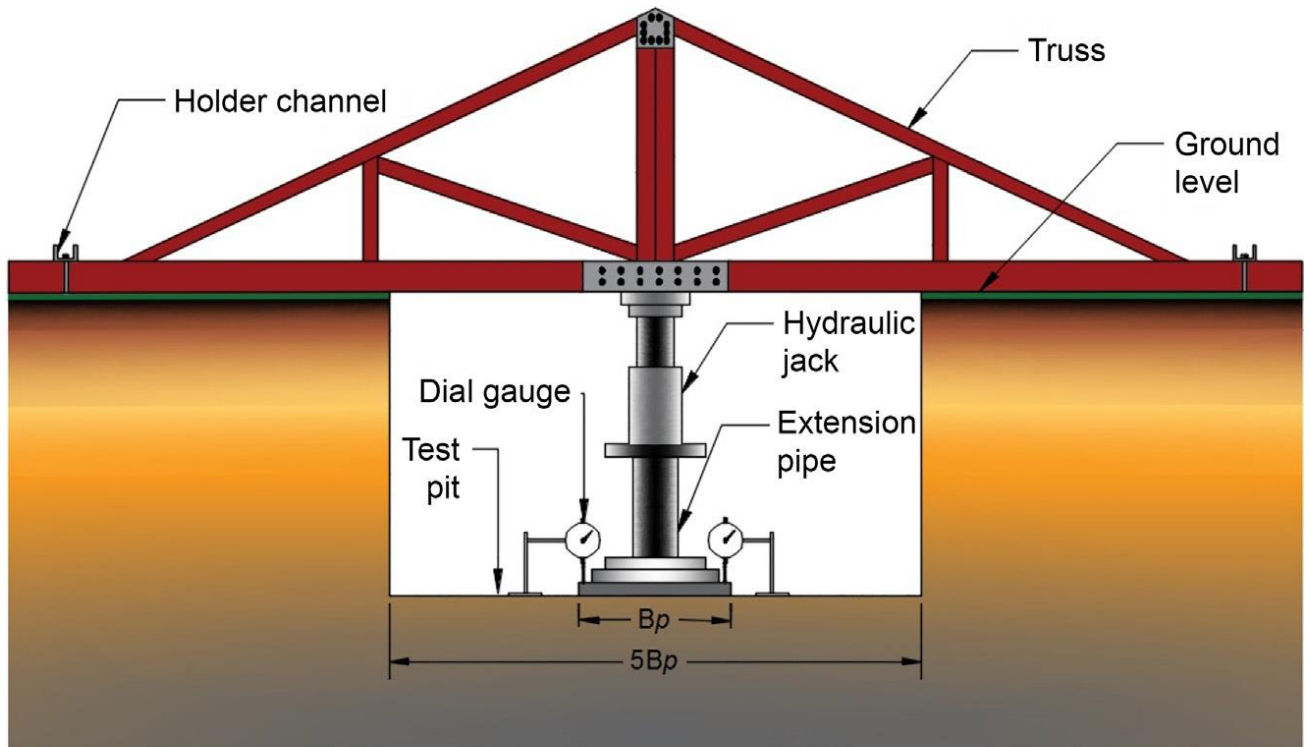
**CPT (Cone Penetration Test):** Η Δοκιμή Διείσδυσης κώνου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του τύπου εδάφους και εφαρμόζεται στο πεδίο. Στην εφαρμογή της ένα κωνικό διαπερατόμετρο εισέρχεται στο έδαφος με συγκεκριμένο ρυθμό και ταυτόχρονα καταγράφονται δεδομένα ανά τακτικά χρονικά διαστήματα.

**Plate Load Test (PLT):** Αποτελεί σημαντική πληροφορία να υπάρχει γνώση της ικανότητας του εδάφους να υποστηρίξει ένα συγκεκριμένο φορτίο πριν ξεκινήσει κάποια εργασία στο μεταλλείο. Με την δοκιμή πεδίου Plate Load Test δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί η απόλυτη φέρουσα ικανότητα και οι αντίστοιχες καθιζήσεις που μπορεί να προκληθούν. Η δοκιμή PLT μπορεί να προσδιορίσει τα παραπάνω με δύο μεθόδους. Αυτές είναι η μέθοδος φόρτωσης με βαρύτητα ή η μέθοδος φόρτωσης ζευκτού (Patel, 2019).

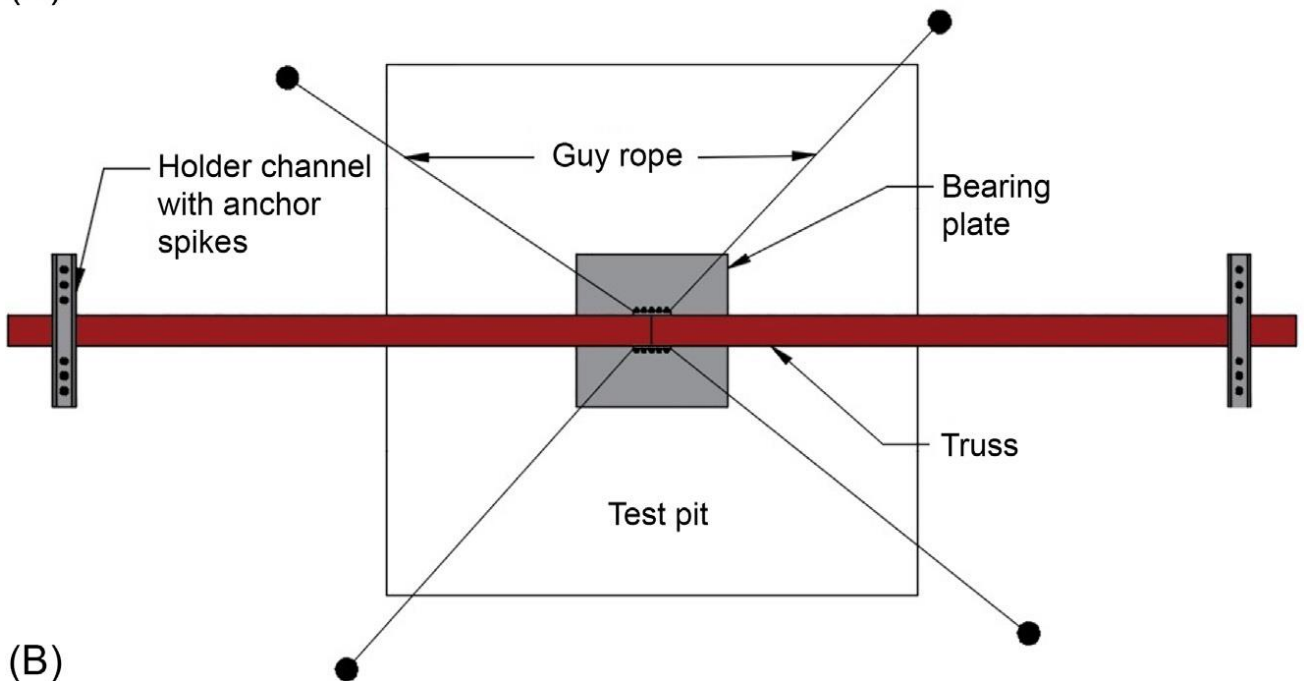


**Εικόνα 3.3.1.:** Απεικόνιση της μεθόδου φόρτωσης με βαρύτητα.

Πηγή: (Patel, 2019)



(A)



(B)

Εικόνα 3.3.2: Απεικόνιση της μεθόδου φόρτωσης ζευκτού.

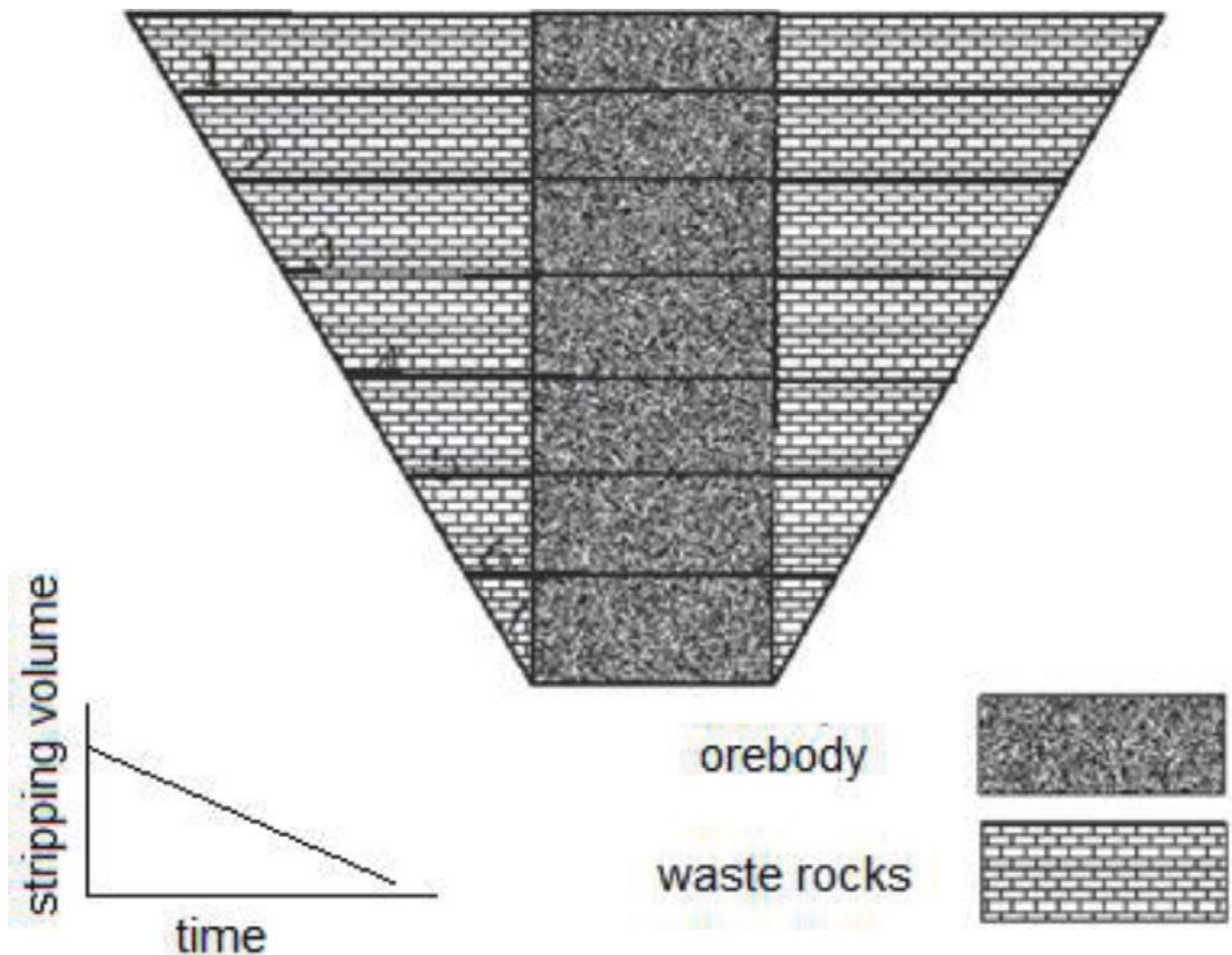
Πηγή: (Patel, 2019)

### 3.4 Κύριες Μέθοδοι Αποκάλυψης του Στείρου Υλικού

Έχοντας εξηγήσει τον σημαντικό ρόλο του στείρου υλικού σε μια εκμετάλλευση αλλά και κάποιες βασικές εργαστηριακές δοκιμές, θα αναφερθούν οι βασικές μέθοδοι απομάκρυνσης σε συνδυασμό με τις τεχνικές εργασίες που ακολουθούν παράλληλα. Σε ένα μεταλλείο ουρανίου (αλλά και σε κάθε υπαίθρια εκμετάλλευση) οι μέθοδοι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: αυξανόμενη, φθίνουσα και σταθερή. Εφόσον εφαρμοστεί μια από αυτές και το υλικό απομακρυνθεί τότε έχει την δυνατότητα να επαναχρησιμοποιηθεί για την κατασκευή δρόμων αλλά και ως υλικό επίχωσης (H. Altiti et al., 2021).

Μέθοδος Φθίνουσας Αποκάλυψης: Στην μέθοδο αυτή πραγματοποιείται εξόρυξη σε κάθε μονάδα όγκου του μεταλλεύματος κάθε φορά με συγκεκριμένη σειρά. Οι πάγκοι βρίσκονται και ο χώρος που πραγματοποιούνται εργασίες βρίσκονται σε ευρέως διαθέσιμο χώρο, προσφέροντας έτσι εύκολη πρόσβαση στο μέταλλευμα. Επίσης δεν υπάρχει επιπλέον ρύπανση στείρου υλικού από χρήση εκρηκτικών υλών και διατρήσεων, καθώς όλες οι ανατινάξεις γίνονται στο ίδιο ύψος και στο ίδιο επίπεδο (H. Altiti et al., 2021).

Η μέθοδος αυτή θεωρείται ότι προσφέρει υψηλή παραγωγικότητα ιδιαιτέρως στην αρχή της ζωής του μεταλλείου, όπου και συνηθίζεται ο εξοπλισμός να είναι ελάχιστος. Η έρευνα έχει και μια αρκετά σοβαρή αρνητική επίπτωση καθώς το κόστος λειτουργίας της στα πρώτα χρόνια της εκμετάλλευσης είναι πολύ υψηλό, δημιουργώντας έτσι σημαντικό πρόβλημα καθώς τότε απαιτείται και η μέγιστη αποπληρωμή του κεφαλαίου. Έτσι απαιτείται οι ταμιακές ροές να υποστηρίξουν εκτός από την διαχείριση των τόκων αλλά και την αποπληρωμή του κεφαλαίου (H. Altiti et al., 2021).



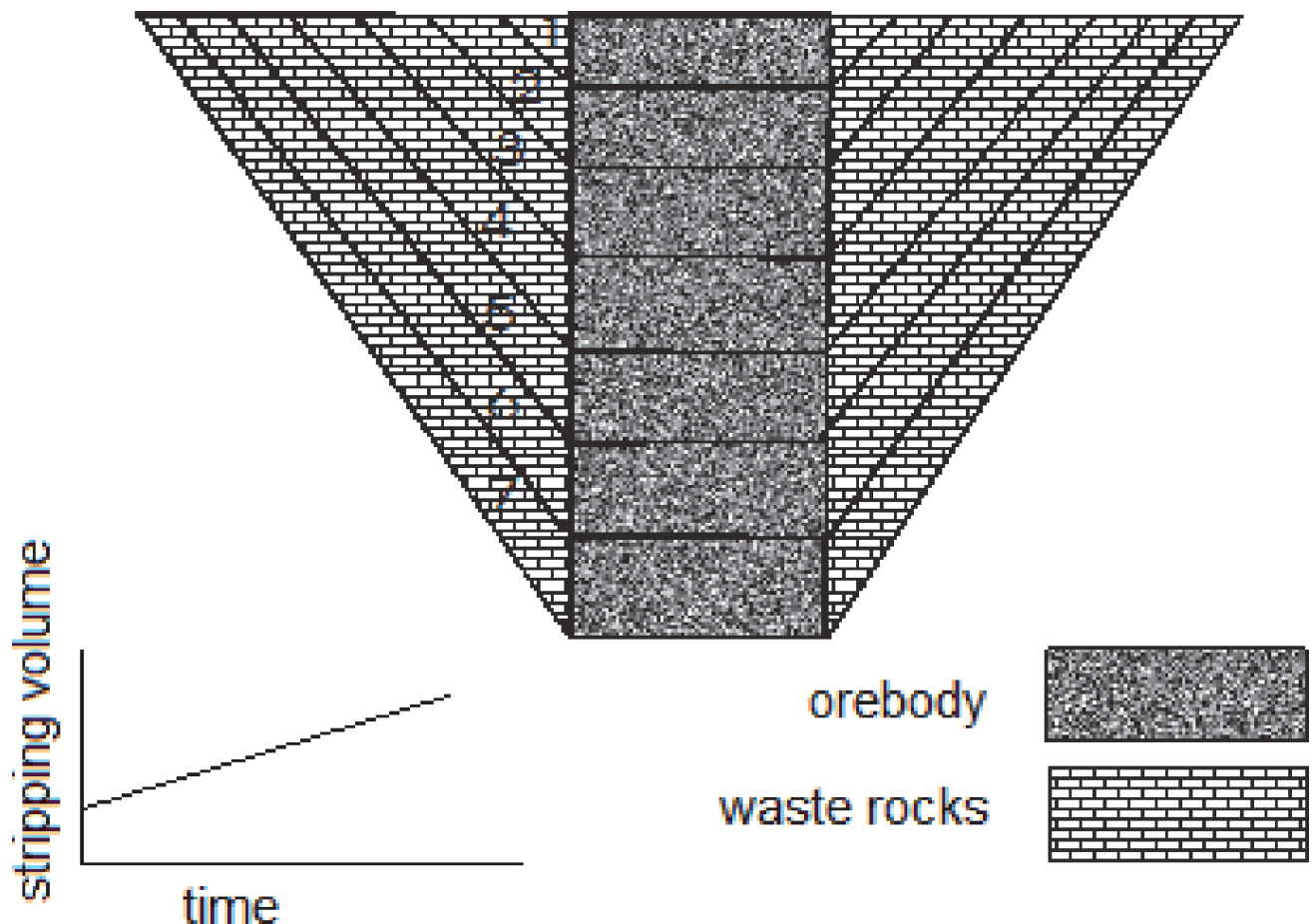
**Εικόνα 3.4.1:** Μέθοδος Φθίνουσας Αποκάλυψης.

**Πηγή:** (H. Altiti et al., 2021).

Μέθοδος Αυξανόμενης Αποκάλυψης: Αυτή η μέθοδος πραγματοποιεί την αποκάλυψη του υπερκείμενου φορτίου (στείρο υλικό) όσο χρειάζεται έτσι ώστε να επιτευχθεί η αποκάλυψη του μεταλλεύματος. Η γωνία κλίσης του λάκκου έρχεται παράλληλα με την περιοχή εργασίας των απορριμμάτων (H. Altiti et al., 2021).

Η αυξανόμενη μέθοδος αποκάλυψης αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους καθώς η μέθοδος αυτή επιτρέπει το μέγιστο κέρδος στα πρώτα χρόνια εκμετάλλευσης, σε αντίθεση με την φθίνουσα μέθοδο. Επιπλέον μειώνει σημαντικά τον επενδυτικό κίνδυνο που υπάρχει όσο πραγματοποιείται η απομάκρυνση του στείρου υλικού, έως την πλήρη εκμετάλλευση (H. Altiti et al., 2021).





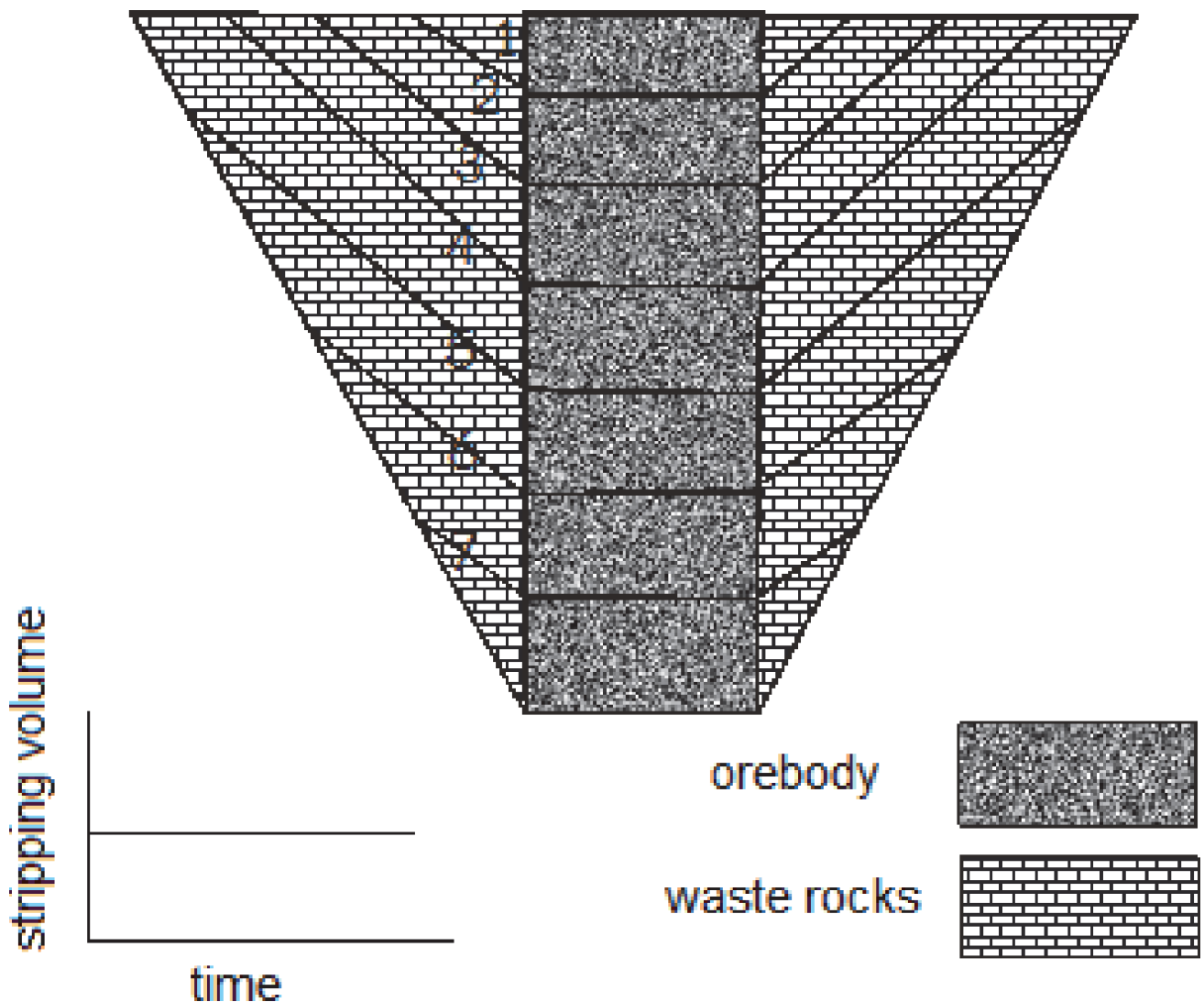
**Εικόνα 3.4.2:** Μέθοδος Αυξανόμενης Αποκάλυψης.

**Πηγή:** (H. Altitì et al., 2021)

Μέθοδος Σταθερής Αποκάλυψης: Η μέθοδος αυτή έχει ως στόχο την απομάκρυνση του στείρου υλικού με ρυθμό που εξαρτάται και υπολογίζεται από την αναλογία Αποκάλυψης. Η εφαρμογή της ξεκινάει από πολύ ρηχό βάθος όπου πραγματοποιούνται οι εργασίες, ενώ στην συνέχεια σταδιακά αυξάνεται η κλίση της εργασίας των όψεων των απορριμμάτων έως ότου να ισούται με την συνολική κλίση του λάκκου (H. Altitì et al., 2021).

Ως κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι η μέθοδος δεν έχει τις ακραίες συνθήκες των άλλων δύο μεθόδων. Επιπλέον οι ανάγκες για προσωπικό και εξοπλισμό είναι διαρκώς σταθερές δίνοντας έτσι καλή παραγωγή κέρδους και στην συνέχεια βελτίωση των ταμειακών ροών. Η χρήση του εξοπλισμού και του προσωπικού μπορεί να αυξηθεί και στο μέγιστο της χωρητικότητας της εκμετάλλευσης, σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, μειώνοντας πάλι την χωρητικότητα καθώς το μεταλλείο πλησιάζει στο τέλος ζωής του. Τέλος η μέθοδος δίνει την δυνατότητα για την διατήρηση περιοχών αποκάλυψης αλλά και περιοχών

εξόρυξης ταυτοχρόνως, δίνοντας έτσι μεγάλη ελαστικότητα στον σχεδιασμό της εκμετάλλευσης (H. Altiti et al., 2021).



Εικόνα 3.4.3: Μέθοδος Σταθερής Αποκάλυψης.

Πηγή: (H. Altiti et al., 2021)

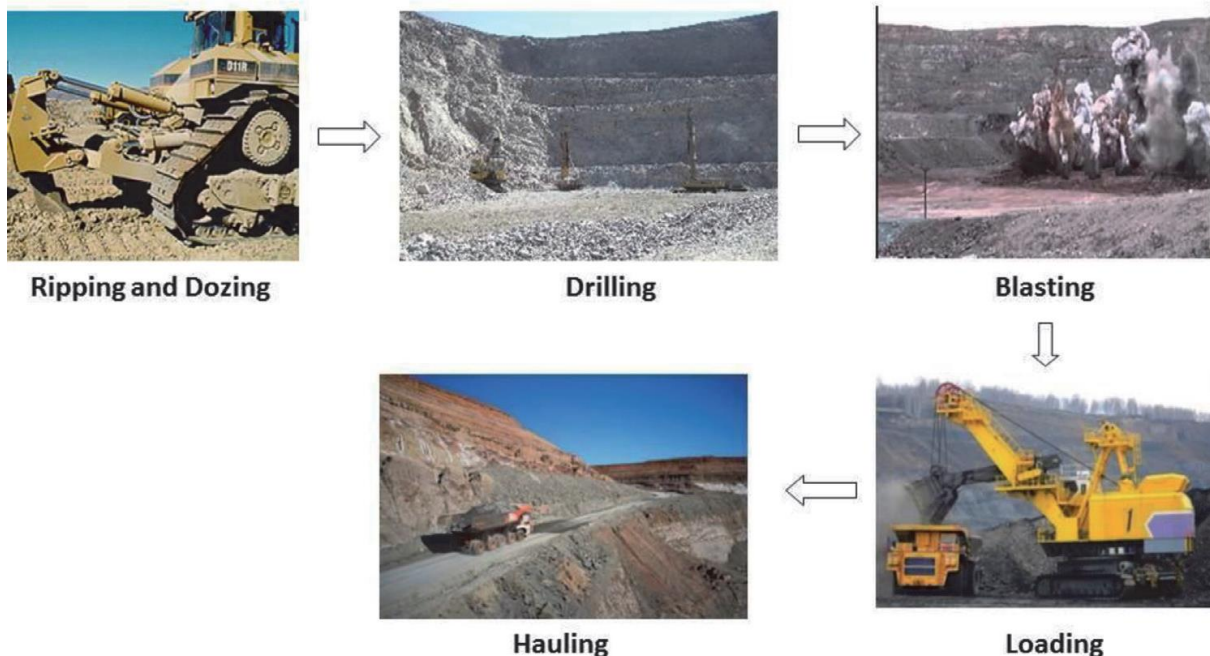
### 3.5 Εργασίες σε Υπαίθριες Εκμεταλλεύσεις

Είναι γνωστό πως μια μεταλλευτική επιχείρηση έχει ως στόχο το κέρδος. Ως κύριος στόχος σε μια υπαίθρια εκμετάλλευση  $U$  αλλά και γενικότερα είναι η απομάκρυνση όσο το δυνατόν λιγότερου υλικού και την μέγιστη επεξεργασία και ποιότητα του μεταλλεύματος έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή επιστροφή σε κέρδος από την επένδυση. Η ποιότητα του μεταλλεύματος με την αξία του μεταλλεύματος είναι αλληλένδετες. Όσο αυξάνεται δηλαδή η ποιότητα τόσο αυξάνεται και η αξία. Εδώ βρίσκει τον σημαντικό του ρόλο ένα πλάνο εργασιών. Το πλάνο των εργασιών του μεταλλείου θα πρέπει όσο τον δυνατό περισσότερο να

μειώσει το αρχικό κόστος της επένδυσης και να δώσει την πιο αποδοτική λύση για την εξόρυξη του μεταλλεύματος. Αυτό επισημαίνεται επίσης και από το γεγονός ότι πολλές υπαίθριες εκμεταλλεύσεις εξορύσσουν πάνω από ένα εκατομμύριο τόνους την μέρα, σε περιοχές που μπορούν να είναι πολλά τετραγωνικά χιλιόμετρα (H. Altiti et al., 2021).

Σε μια υπαίθρια εκμετάλλευση οι εργασίες ακολουθούν την εξής σειρά (**Εικόνα 3.5.1**):

1. Καταστροφή του υλικού.
2. Διάτρηση.
3. Ανατίναξη.
4. Φόρτωμα.
5. Μεταφορά.



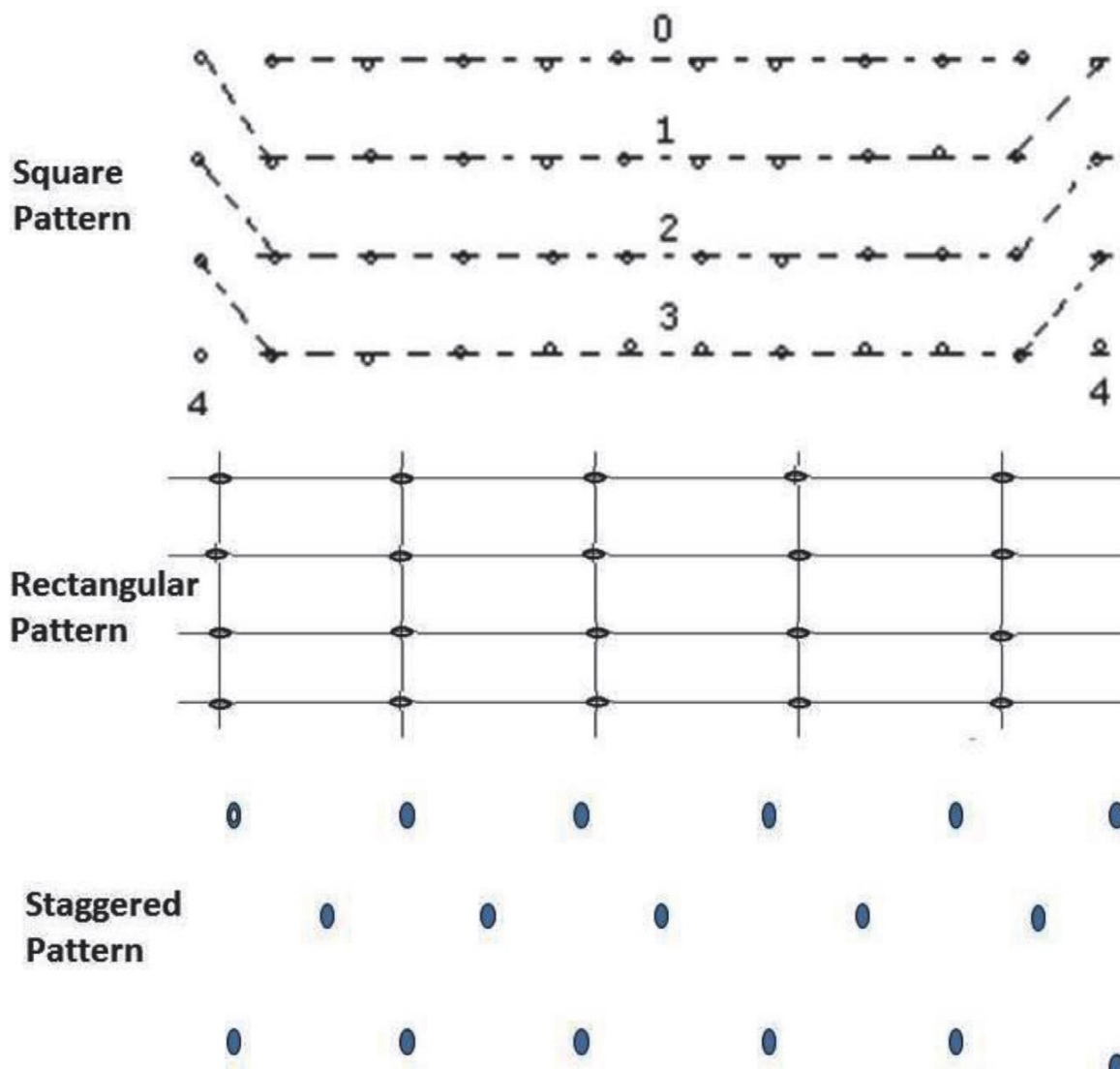
**Εικόνα 3.5.1:** Σειρά των εργασιών σε μια υπαίθρια εκμετάλλευση.

**Πηγή:** (H. Altiti et al., 2021).

Όσον αφορά την καταστροφή του υλικού τα πιο συνηθισμένα μηχανήματα έργου είναι οι μπουλντόζες με ή χωρίς τροχούς και τα grader. Τα grader χρησιμοποιούνται κυρίως για μετατρέψουν μια επιφάνεια σε επίπεδη μέσω της μακριάς λεπίδας τους. Οι μπουλντόζες έχοντας μεγάλη χωρητικότητα λεπίδας πραγματοποιεί εργασίας εκσκαφής του υλικού (H. Altiti et al., 2021).

Στην διάτρηση και στην ανατίναξη στόχος είναι να γίνει η εξόρυξη του υλικού και ταυτόχρονα να μειωθεί ο όγκος του έτσι ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά του και η

επεξεργασία του. Κρίσιμο είναι οι παράμετροι των ανατινάξεων να συμβαδίζουν με τις δυνατότητες των μηχανολογικών μηχανημάτων για την διάτρηση και την τοποθέτηση των εκρηκτικών. Το πιο αποδοτικό μοτίβο για την τοποθέτηση των εκρηκτικών είναι το κλιμακωτό μοτίβο το οποίο διακρίνεται στην **Εικόνα 3.5.2**. Επιπλέον υπάρχει το τετραγωνικό μοτίβο και το ορθογώνιο μοτίβο (H. Altit et al., 2021).



**Εικόνα 3.4.5:** Μοτίβα διατρήσεων για τοποθέτηση εκρηκτικών στην υπαίθρια εκμετάλλευση.

Στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις όσον αφορά το φόρτωμα αυτό πραγματοποιείται με υδραυλικά φτυάρια και μπροστινούς φορτωτές (front end loaders). Αναλόγως την φύση του υλικού που φορτώνεται εξαρτάται και ο τύπος του φτυαριού που θα χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα στην περίπτωση που έχουμε υλικό με περιορισμένο όγκο και που είναι πιο μαλακό, συστήνεται η χρήση ενός φορτωτή με ελαστικά από καουτσούκ. Στην ακριβώς

αντίθετη περίπτωση με σκληρότερο υλικό και πολύ μεγαλύτερο όγκο συστήνεται η χρήση ερπυστριοφόρου φορτωτή. Σε μεταλλεία που η ημερήσια παραγωγή ξεπερνάει τους 200.000tn χρησιμοποιούνται μεγάλα φτυάρια καλωδίων όπως στην **Εικόνα 3.3.3** (H. Altiti et al., 2021)..

Την μεταφορά του υλικού αναλαμβάνουν φορτηγά έλξης τα οποία έχουν την δυνατότητα να φορτώνονται με 3-5 «γύρους» από τα μηχανήματα φόρτωσης (π.χ. υδραυλικό φτυάρι). Τα περισσότερα φορτηγά έχουν χωρητικότητα 56 τόνων ανά την φορά έως 363 τόνοι ανά την φορά (π.χ. Caterpillar 797). Το 2022 η μέση τιμή για την αγορά ενός καινούργιου φορτηγού έλξης έρχεται στα 3.500.000\$ περίπου (H. Altiti et al., 2021).



**Εικόνα 3.4.6:** Φτυάρι καλωδίων που πραγματοποιεί φόρτωση σε φορτηγό έλξης.

**Πηγή:** (H. Altiti et al., 2021).

## 4. Υπόγεια Εκμετάλλευση

Η υπόγεια εκμετάλλευση του ουρανίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, όπου θα αναλυθούν παρακάτω. Σε αντίθεση με την υπαίθρια εκμετάλλευση τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπόγειας εκμετάλλευσης είναι τα εξής (Uranium: How Is It Mined?, n.d.):

### Πλεονεκτήματα:

- Μικρότερος όγκος στείρου υλικού που πρέπει να απομακρυνθεί.
- Μικρότερη περιβαλλοντική επίπτωση στην επιφάνεια.
- Οι τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία όπως καλύτερα συστήματα εξαερισμού, συστήματα παρακολούθησης και η δυνατότητα μη επανδρωμένης εξόρυξης, καθιστούν την υπόγεια εκμετάλλευση πιο ασφαλή από τα παλιότερα έτη.

### Μειονεκτήματα:

- Ενδεχόμενο ρίσκου σοβαρών επιπτώσεων σε τοπικούς υδροφορείς και ακριβή αποκατάσταση σε περίπτωση που είναι αναγκαία.
- Σε ορυχεία που δεν έχουν πλήρως εκσυγχρονιστεί το ραδόνιο, η σκόνη και οι αναθυμιάσεις από την χρήση του ντίτζελ αποτελούν ακόμη και τώρα σοβαρή απειλή για την υγεία του προσωπικού της εξόρυξης.
- Είναι μια ακριβή μέθοδος.

### 4.1 Μέθοδοι Πρόσβασης

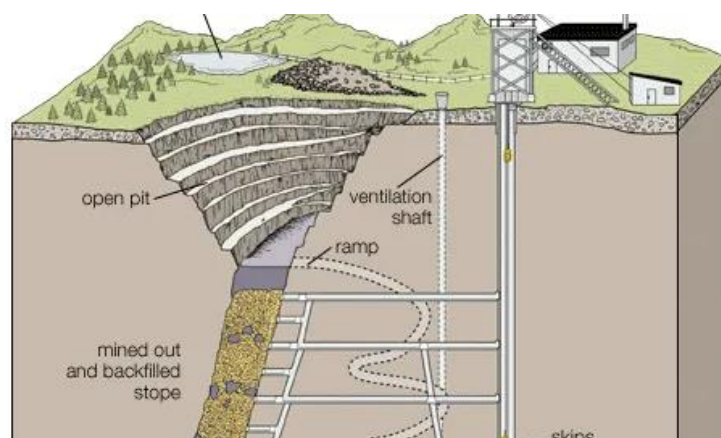
Η πρόσβαση στο ουράνιο στις περιπτώσεις όπου θα σχεδιαστεί μια υπόγεια εκμετάλλευση, πραγματοποιείται με τρεις μεθόδους. Αυτές οι κύριες μέθοδοι είναι η μέθοδος με την χρήση αξόνων, με την χρήση με προσθήκες και με την χρήση κεκλιμένων ραμπών (Hore-Lacy, 2016).

Η μέθοδος με την χρήση αξόνων πρόκειται για κάθετα ανοίγματα με πλάτος μερικών μέτρων, οι οποίοι βρίσκονται σε εκατοντάδες μέτρα βάθους και μερικές φορές ακόμα και σε χιλιάδες μέτρα βάθους (σε ορισμένες περιπτώσεις). Οι άξονες συνήθως ξεκινούν από την επιφάνεια και κατασκευάζονται-ευθυγραμμίζονται με την χρήση σκυροδέματος. Επίσης σε αρκετές περιπτώσεις μπορούν να ξεκινήσουν και από διαφορετικά επίπεδα μεταξύ του ορυχείου. Σε περιπτώσεις που υπάρχει παρουσία σκληρού πετρώματος η επένδυση δεν είναι απαραίτητη. Οι συνθήκες αντοχής ενός βράχου μεταβάλλονται αρκετά από τέτοιους άξονες

με επένδυση σκυροδέματος. Επιπλέον η επένδυση με σκυρόδεμα χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο της εισροής από υπόγεια ύδατα

Στην μέθοδο με προσθήκες (adits) δημιουργούνται σχεδόν οριζόντια ανοίγματα, τα οποία συνήθως γίνονται στο πλάγιο μέρος ενός βουνού, με στόχο την πρόσβαση στο ορυκτό. Το μήκος και το πλάτος των ανοιγμάτων είναι συνήθως μόνο μερικών μέτρων, ενώ παλιότερα συνηθίζονταν περίπου 1,5m-2m. Η μέθοδος αυτή δίνει την δυνατότητα εγκατάστασης ενός σιδηρόδρομου για την μεταφορά (με την χρήση τροχοφόρων οχημάτων) του μεταλλεύματος από το κοίτασμα στην επιφάνεια του εδάφους. Επιπλέον μπορεί να αναπτυχθεί και ένα σύστημα μεταφοράς και για το στείρο υλικό – πετρώματα τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν. Εκτός από τις παραπάνω χρήσι η μέθοδος αυτή βρίσκει μια επιπρόσθετη εφαρμογή, την αποστράγγιση των υπόγειων νερών. Τέλος όπως και σε άλλες μεθόδους η μέθοδος με προσθήκες επιτρέπει την χρήση κορμών (παλιότερα) ή σκυροδέματος για την υποστήριξη της οροφής για την αποφυγή κατολισθήσεων (Hore-Lacy, 2016) .

Στην μέθοδο με κεκλιμένες ράμπες, κατασκευάζονται ράμπες οι οποίες έχουν συνήθως ελικοειδή σχήμα. Η μέθοδος εφαρμόζεται στο πλάγιο μέρος βουνών ή πλαγιών με σκοπό να αποκαλυφθεί το επιθυμητό ορυκτό, διατηρώντας μια μέγιστη κλίση όχι περισσότερο από 15%. Οι περισσότερες ράμπες έχουν αρκετό πλάτος μόνο για την χρήση του πιο μεγάλου οχήματος, άρα πρέπει να δημιουργηθούν πρόσθετα κενά για να μπορεί να πραγματοποιηθεί χρήση και από τις δύο κατευθύνσεις. Οι παραπάνω μέθοδοι σε μια υπόγεια εκμετάλλευση ουρανίου ( και όχι μόνο) χρησιμοποιούνται συνδυαστικά ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε ορυχείου. Δηλαδή μια υπόγεια εκμετάλλευση μπορεί να έχει κατασκευάσει πολλαπλούς άξονες σε με μία ή περισσότερες ράμπες (Hore-Lacy, 2016).



**Εικόνα 4.1.1:** Απεικόνιση ραμπών και κατακόρυφων αξόνων σε υπόγεια εκμετάλλευση.

**Πηγή:** <https://www.britannica.com/technology/shaft-excavation>

## 4.2 Τεχνικές Εξόρυξης

Με την πάροδο του χρόνου οι τεχνικές για την εξόρυξη σε υπόγεια ορυχεία έχουν βελτιωθεί προσφέροντας περισσότερες επιλογές από ποτέ με την δυνατότητα προσαρμογής αναλόγως των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοιτάσματος. Σε αυτήν την υπό-κεφάλαιο θα αναφερθούν μερικές από τις κύριες τεχνικές εξόρυξης που χρησιμοποιούνται σε μεταλλεία ουρανίου δίνοντας και παραδείγματα εφαρμογής διαφόρων μεταλλείων.

Στην περίπτωση που το μέταλλευμα εμφανίζεται σε μορφή στενών φλεβών απαιτούνται συνήθως μεγάλου σκέλους τεχνικές εργασίες. Χρησιμοποιώντας διάτρηση και ανατίναξη επιτυγχάνεται η αναγκαία θραύση του ουρανίου έτσι ώστε να είναι δυνατή η φόρτωση και η απομάκρυνση του. Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής έχει ως αφετηρία την βάση του ουρανίου διαμορφώνοντας ανοίγματα κατακόρυφα (προς τα πάνω) ακολουθώντας την μέγιστη κλίση του ή αντίστροφα ή με συνδυασμό και των δύο. Έπειτα το κενό που δημιουργείται αναλόγως των περιστάσεων είτε γεμίζεται με στείρο υλικό ή αφήνεται να καταρρεύσει. Ένα πρόσφατο παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής αυτής είναι στο Dolní Rozinka της Τσεχίας όπου χρησιμοποιείται η παραπάνω τεχνική περίπου σε 1000m βάθος (Hore-Lacy, 2016).

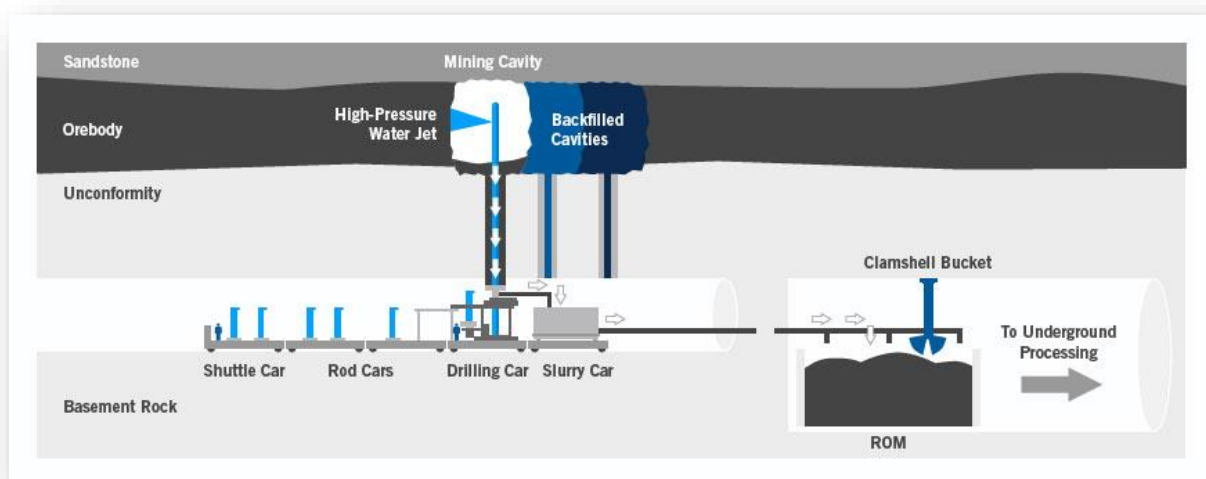
Η επόμενη τεχνική είναι αυτή που ονομάζεται stoping όπου εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η μάζα του μεταλλεύματος είναι μεγαλύτερη, ενώ υπάρχουν πολυάριθμες διαφοροποιήσεις της τεχνικής αυτής αναλόγως των περιστάσεων. Συνήθως όμως χρησιμοποιείται όταν μπορεί να πραγματοποιηθεί εξόρυξη κατακόρυφα σε διαστάσεις των μερικών δεκάδων μέτρων πλάτος και μερικών μέτρων ύψους. Η πρόσβαση στο μέταλλευμα πραγματοποιείται ως εξής: Αρχικά πραγματοποιούνται διατρήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις και έπειτα τοποθετούνται εκρηκτικά στα διατρήματα. Μόλις τελειώσει η διαδικασία των διατρήσεων και των εκρηκτικών το μέταλλευμα απομακρύνεται από το σημείο και έπειτα υπέστη σύνθλιψη και επεξεργασία. Τα κενά που προκύπτουν έπειτα από την απομάκρυνση του υλικού καλύπτονται με την χρήση σκυροδέματος ή με την τοποθέτηση στείρου υλικού. Μόλις εκτιμηθεί πως το κενό έχει στερεωθεί και έχει την απαραίτητη αντοχή, μόνο τότε η εξόρυξη προχωράει και στα διπλανά μέτωπα του μεταλλεύματος. Αναλόγως τις ανάγκες του κάθε μεταλλείου η παραπάνω διαδικασία μπορεί να εφαρμόζεται ταυτοχρόνως σε πολλά επίπεδα του ορυχείου. Το Olympic Dam μεταλλείο U, CU, AU, στην Αυστραλία εφαρμόζει τεχνική stoping (Robertson et al., 2013) (Hore-Lacy, 2016).

Όταν το μέταλλευμα είναι οριζόντιο και σε μεγάλη περιεκτικότητα τότε εφαρμόζεται η μέθοδος παράλληλων θαλάμων και στύλων (room and pillar). Πραγματοποιείται εξόρυξη



δηλαδή αφήνοντας στύλους για να χρησιμοποιηθούν ως στήριξη. Όταν στο μέτωπο έχει τελειώσει η μέγιστη δυνατή εξόρυξη τότε είτε καταστρέφονται οι στύλοι είτε γεμίζεται η περιοχή με υλικό (Hore-Lacy, 2016).

Μια ιδιαίτερη τεχνική εξόρυξης έχει αναπτυχθεί σε ορυχεία υψηλής ποιότητας στον Καναδά. Τα συγκεκριμένα ορυχεία βρίσκονται σε εξαιρετικά υδραυλικά αγωγίμο περιβάλλον κάνοντας έτσι την εξόρυξη του ουρανίου δύσκολη, καθώς με την χρήση συμβατικών μεθόδων θα υπήρχε το ρίσκο μεγάλου όγκου εισροές νερού, που με την θέση του θα έθετε σε κίνδυνο το ίδιο το μεταλλείο. Η συγκεκριμένη τεχνική που ονομάζεται “jet boring” παγώνει το έδαφος έτσι ώστε να είναι δυνατή η απόσπαση του μεταλλεύματος χωρίς εισροές νερού. Αρχικά κατασκευάζονται τούνελ ακριβώς από κάτω και από πάνω από το μέταλλευμα. Έπειτα με την χρήση ενός δίσκου κοπής δημιουργείται ένα άνοιγμα ανάμεσα των δύο επιπέδων τούνελ, περίπου στα 3m. Το μέταλλευμα απομακρύνεται από το κάτω μέρος των τούνελ, ενώ ταυτόχρονα ψύχεται από μεγάλης πίεσης τζετ νερού (παγωμένου) (**Εικόνα 4.2.1**). Τα τζετ νερού επιτυγχάνουν την τεχνική ψύξη ενώ ταυτοχρόνως διασπών το μέταλλευμα για την πιο εύκολη αποκοπή και μεταφορά του. Στο τέλος το μέταλλευμα είτε μεταφέρεται με τηλεχειριστικό «κουβά» για τον έλεγχο ποιότητας, είτε στον θραυστήρα για περαιτέρω διάσπαση του μεταλλεύματος. (Newman et al., 2011) (Hore-Lacy, 2016).



**Εικόνα 4.2.1:** Η μέθοδος με τζετ νερού

**Πηγή:** (Mining Methods - Businesses - Cameco, n.d.)

Στο υπόγειο ορυχείο στην λίμνη Cigar του Καναδά εφαρμόζεται η μέθοδος που απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.2.1**. Η άλμη, παγωμένη στους -40 C, διοχετεύεται υπόγεια στο

κοίτασμα. Η άλμη κυκλοφορεί μέσω μεγάλων σωλήνων, παγώνοντας τον περιβάλλοντα βράχο σε περίπου ένα χρόνο. Όταν είναι έτοιμο, μια μηχανή εξόρυξης διατρέχει τον παγωμένο βράχο για να δημιουργήσει τη σήραγγα παραγωγής. Το σύστημα γεώτρησης εκτόξευσης εισέρχεται σε αυτή τη σήραγγα και ανοίγει μια πιλοτική τρύπα μέσα από το σώμα του μεταλλεύματος. Στη συνέχεια, το ακροφύσιο γεώτρησης πίδακα εισάγεται στην πιλοτική οπή και το σύστημα αρχίζει να τρυπάει μέσα από το βράχο χρησιμοποιώντας πίδακα νερού υψηλής πίεσης. Το χαλαρό μετάλλευμα ξεπλένεται στην πιλοτική οπή. Μετά από μια σειρά διεργασιών, το μετάλλευμα αντλείται στην επιφάνεια σε μορφή πολτού (Mining Methods - Businesses - Cameco, n.d.).

## 5. Το Ραδόνιο

Οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις ανέκαθεν, όσον αφορά την ασφάλεια, χρειάζονται σωστά συστήματα εξαερισμού. Για τα ορυχεία ουρανίου όμως αυτό είναι ένα πολυσύνθετο θέμα που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς υφίστανται αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια και σχετίζονται και με την ποιότητα εξαερισμού (Hore-Lacy, 2016).

Το ουράνιο από μόνο του είναι ραδιενεργό. Όμως η πλειοψηφία της ραδιενέργειας η οποία εμφανίζεται σε υπόγεια ορυχεία ουρανίου απαντά σε προϊόντα ραδιενεργής αποσύνθεσης. Πιο συγκεκριμένα από το ραδόνιο, το οποίο είναι αέριο. Το ραδόνιο και τα υποπροϊόντα αποσύνθεσης του αλλά και τα ραδιονουκλεΐδια έχουν μέγιστης σημασίας, καθώς έχουν την ιδιότητα να μένουν στον αέρα για αρκετό χρονικό διάστημα. Για τις μοντέρνες ανάγκες εξαερισμού σε ορυχεία ουρανίου, έχει βρεθεί ανάλογο υλικό το οποίο θα αναλυθεί σε παρακάτω κεφάλαιο (Hore-Lacy, 2016).

Σε γενικές γραμμές ο εξαερισμός λειτουργεί μέσω ανεμιστήρων, από του οποίους ο απαραίτητος αέρας ελέγχεται με ένα σύστημα ειδικών αξόνων εξαερισμού. Επιπλέον η διανομή γίνεται μέσω φρεάτων και σηράγγων γενικής πρόσβασης. Εκτός από τα παραπάνω εγκαθίστανται και ειδικές πόρτες οι οποίες ανοίγουν και κλείνουν έτσι ώστε να υπάρξει σωστή κατανομή του αέρα όπου χρειάζεται. Όσον αφορά το ίδιο το εργατικό προσωπικό, υπάρχουν ειδικά Μ.Α.Π. (Μέσα Ατομικής Προστασίας), όπως για παράδειγμα οι μάσκες αναπνοής όπου σε συγκεκριμένες εργασίες απαιτούν την χρήση τους (π.χ. διάτρηση λόγω της σκόνης). Τέλος για περεταίρω παρακολούθηση πραγματοποιούνται μετρήσεις πεδίου (δηλαδή στο ορυχείο), σε συνδυασμό με υπολογιστική μοντελοποίηση ((eg, Bracke et al., 2006) (Hore-Lacy, 2016) (El-Fawal, 2011).

### 5.1 Το Ραδόνιο και η Παρουσία του στην Ατμόσφαιρα Υπόγειων Ορυχείων

Το ραδόνιο (Rn) είναι ευγενές αέριο και έχει ατομικό βάρος 222. Επίσης εκτός από ραδιενεργό είναι και από τα βαρύτερα αέρια που υπάρχουν. Το χρώμα του είναι άχρωμο εκτός από την περίπτωση που ψυχρανθεί κάτω από την θερμοκρασία της πήξης του, όπου έχει ένα υποκίτρινο χρώμα. Επιπλέον έχει κρυσταλλική δομή τύπου FCC.

Η παρουσία του ραδονίου στην ατμόσφαιρα προκαλείται από την αποσύνθεση του Ραδίου (Ra) στο μέταλλευμα του ουρανίου. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα να εκπέμπεται ακτινοβολία άλφα. Επιπλέον το ατομικό βάρος του Ra από 226 μειώνεται σε 222 και ο

ατομικός του αριθμός από 88 μειώνεται σε 86. Άρα και το Ra μετατρέπεται σε Rn (D. B. Apel & J. K. Szymanski, 2012).

Το  $^{226}\text{Ra}$  είναι ένα προϊόν αποσύνθεσης του  $^{238}\text{U}$  το οποίο βρίσκεται στο μέταλλευμα του ουρανίου. Στα ορυχεία ουρανίου αποτελεί μια πηγή μεγάλου επιπέδου ραδιενέργειας, άρα και κινδύνου για την υγεία των εργαζόμενων. Τα  $^{226}\text{Ra}$  έχει μια μακροχρόνια ζωή 1.600 χρόνων. Επιπλέον είναι και μια κύρια πηγή για την εκπομπή αερίου Rn που αν και έχει μικρότερη ζωή από το  $^{226}\text{Ra}$ , **το Rn έχει παρουσία στην ατμόσφαιρα του ορυχείου για 3,82 μέρες** ή για 91,7 ώρες περίπου. Το ραδόνιο δημιουργεί με την σειρά του μια σειρά από υποπροϊόντα όπως  $^{224}\text{Pb}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ , και  $^{214}\text{Po}$  τα οποία εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Άρα λοιπόν καθώς ένας εργάτης εισπνέει και εκπνέει τον αέρα που εμπεριέχει το αέριο που είναι ραδόνιο, τα υπο-προϊόντα του παραμένουν στο αναπνευστικό του σύστημα. Τα υποπροϊόντα του Rn πρόκειται για βαρεία μέταλλα τα οποία συνεχίζουν να επηρεάζουν το αναπνευστικό του εργάτη ακόμα και όταν έχει φύγει από το ορυχείο (Sahu et al., 2014).

Το ραδόνιο έχει βαρύτερες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου όπως έχει διαπιστωθεί, καθιστώντας το επικίνδυνο δίνοντας περισσότερη έμφαση στα μέτρα ασφαλείας που πρέπει να ληφθούν.

Η κύρια αιτία για τον καρκίνο του πνεύμονα απαντά στο ραδόνιο. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται πως **το ραδόνιο ευθύνεται για το 3% έως το 14% όλων των καρκίνων του πνεύμονα** ανά χώρα, αναλόγως τον επιπολασμό του καπνίσματος και το μέσο εθνικό επίπεδο ραδονίου. Σε περιπτώσεις αύξησης μακροχρόνιας μέσης συγκέντρωσης ο κίνδυνος για την ανάπτυξη του καρκίνου του πνεύμονα αυξάνεται περίπου κατά 16% ανά  $100 \text{ Bq/m}^3$ . Ο κίνδυνος του καρκίνου του πνεύμονα αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της έκθεσης σε ραδόνιο καθώς η σχέση δόσης-απόκρισης είναι γραμμική. Τα άτομα που καπνίζουν κινδυνεύουν 25 φορές περισσότερο από μη καπνιστές στην εμφάνιση καρκίνου του πνεύμονα. Μέχρι σήμερα κανένας άλλος κίνδυνος καρκίνου δεν έχει συσχετισθεί με την έκθεση σε ραδόνιο. Βέβαια το ραδόνιο μπορεί να μεταφέρει ακτινοβολία και σε άλλα όργανα του ανθρώπου αλλά σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο από την ακτινοβολία που δέχονται οι πνεύμονες (Radon and Health, 2021).

Ιδιαίτερα αυξημένο ποσοστό καρκίνου του πνεύμονα έχει διαπιστωθεί πως προκύπτει σε εργαζόμενους ορυχείων ουρανίου, οι οποίοι εκτέθηκαν σε υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Εκτός από αυτήν την περίπτωση έχει βρεθεί πως ακόμα και σε σπίτια σε μικρές

συγκεντρώσεις, το ραδόνιο συμβάλει στην εμφάνιση καρκίνου στο πνεύμονα (Radon and Health, 2021).

## 5.2 Πηγές Εκπομπής Ραδονίου

Η εκπομπή του ραδονίου στην ατμόσφαιρα ενός ορυχείου U οφείλεται σε συγκεκριμένες πηγές. Αυτές είναι το ίδιο το μετάλλευμα (τοιχώματα), μέταλλευμα το οποίο δέχεται θραύση και τα υπόγεια ύδατα ενός ορυχείου (Sahu et. al., 2014).

### 5.2.1 Τοιχώματα του Ορυχείου

Τα τοιχώματα του ορυχείου είναι από τις κύριες πηγές εκπομπής του ραδονίου. Η εκπομπή από τα τοιχία του μεταλλεύματος πραγματοποιείται με την διάχυση μέσω του μητρικού πετρώματος και της εκπνοής που πραγματοποιείται μέσα από τα τοιχώματα του ορυχείου. Στον **Πίνακα 5.2.1.1** αναφέρονται το μέσο ποσοστό εκπομπής

Τα άτομα του ραδονίου τα οποία προέκυψαν από το  $^{226}\text{Ra}$  αφορούν

Το ραδόνιο εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από το ίδιο το μέταλλευμα αλλά και από το νερό που βρίσκεται στο ορυχείο και τους τοίχους των βράχων. Στην υπόγεια εκμετάλλευση όσον αφορά την προστασία από το ραδόνιο ο ρυθμός εκπομπής Rn αποτελεί σημαντική πληροφορία. Ο ρυθμός εκπομπής Rn εκφράζεται ως: Ο αριθμός των ατόμων Rn που εκπέμπονται από μια μονάδα εμβαδού ενός βράχου, σε μια χρονική στιγμή. Η μονάδα μέτρησης που ορίζεται είναι το pCi/cm<sup>2</sup>/sec (D. B. Apel & J. K. Szymanski, 2012). Επιπλέον η εκπομπή ραδονίου από βραχώδη προέλευση σε υπόγεια ορυχεία μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$J = C_{\infty} \sqrt{\lambda D \phi}$$

Σε pCi/cm<sup>2</sup>/sec.

Όπου:

- $C_{\infty}$ : Η συγκέντρωση Rn σε άπειρη απόσταση στον βράχο (pCi/m<sup>3</sup>)
- $I$ : Σταθερά διάσπασης Rn ( $2,1 * 10^{-6}$  Bq)
- $F$ : Πορώδες βράχου (0,50 = 50% πορώδες)
- $D$ : Συντελεστής διάχυσης (m<sup>2</sup>/sec)

Σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις του ουρανίου παίρνει μέρος ένα φαινόμενο που ονομάζεται μοριακή ή ατομική διάχυση. Στην ουσία αφορά την τάση που έχουν τα τυχαία άτομα του ραδονίου, που αναμιγνύονται με τον αέρα, να κινούνται προς την κατεύθυνση της φθίνουσας

συγκέντρωσης στον αέρα. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί πως η παραπάνω εξίσωση προϋποθέτει ότι δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ της πλευράς του μεταλλεύματος και του τμήματος του ορυχείου που έρχεται σε επαφή (D. B. Apel & J. K. Szymanski, 2012). Από τον **Πίνακα 5.2.1.1** παρατηρείται πως ο ρυθμός εκπομπής ραδονίου σε πορώδη βράχους επηρεάζεται λιγότερο από την ποιότητα του μεταλλεύματος για τους βράχους με το περισσότερο πορώδες. Άρα εν τέλει προκύπτει το συμπέρασμα πως το πορώδες και η θραύση είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό εκπομπής ραδονίου, εκτός από τις περιπτώσεις όπου η ποιότητα του μεταλλεύματος είναι εξαιρετικά υψηλή (Sahu et al., 2014).

**Πίνακας 5.2.1.1:** Ρυθμός εκπομπής ραδονίου ανά τύπο βράχου.

Ποιότητα μεταλλεύματος (% U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	Τύπος βράχου	Ρυθμός εκπομπής Rn (Bq*m <sup>-2</sup> *s <sup>-1</sup> )
0,051	Προκάμβρια μετα-ιζηματογενή πετρώματα	0,22-51,84*10 <sup>-3</sup>
-	πυριγενές πέτρωμα με πολύ χαμηλό πορώδες	0,2-2*10 <sup>-3</sup>
0,20	Μεσαίου κόκκου έως χονδρόκοκκος	5,25
0,20	Ψαμμίτης	5,29
0,05	50% Ψαμμίτης, 50% αργυρόλιθος, αρκετά θριμματισμένος	9,73
0,30	Γνευσίτης, με μερική θραύση	19,87
0,25	Ψαμμίτης, με 20% πορώδες	18,5
0,10	Αναμίξεις, 0,10% πορώδες	0,259
-	Σχιστόλιθος, ενδιάμεσο πορώδες	5

Πηγές: (Sahu et al., 2014)

### 5.2.2 Απορρίμματα Επίχωσης

Στα υπόγεια ορυχεία ουράνιο το μέταλλευμα του ουρανίου συνθλίβεται και ένα μέρος από τα υπολείμματα εφόσον χωριστούν σε δύο κατηγορίες χρησιμοποιούνται ως υλικό επίχωσης. Στην συνηθισμένη μορφή εκμετάλλευσης του ουρανίου χρησιμοποιείται  $H_2SO_4$  (θειικό οξύ) (μέθοδος in-situ leaching) έτσι ώστε να απομακρυνθεί το ουράνιο από το μέταλλευμα. Στην διαδικασία αυτή καθώς το μέταλλευμα γενικά έχει μικρή περιεκτικότητα σε ουράνιο, τα πολτοποιημένα απορρίμματα χωρίζονται σε χονδρότερα και λεπτότερα κλάσματα. Τα χονδρότερα κλάσματα χρησιμοποιούνται για την επίχωσης. Η χρήση της μεθόδου αυτής έχει συνήθως ποσοστό αποτελεσματικότητας 65%-95%. Η διαλυτοποίηση του Ra μετά την έκλυση με θειικό οξύ είναι χαμηλή, όμως στα απορρίμματα έχει βρεθεί πως υπάρχει αρκετή ποσότητα Ra. Έχει ανακαλυφθεί πως τα απορρίμματα και μόνο έπειτα την έκλυση εμπεριέχουν το 99% από το Ra το οποίο υπήρχε στο μέταλλευμα (IAEA, 1992b).

Τα απορρίμματα επίχωσης έχουν σχετικά μικρό μέγεθος σωματιδίων και άρα και μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια. Επίσης το ράδιο στα απορρίμματα επίχωσης τείνει να βρίσκεται με μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο κοντά στην επιφάνεια των κόκκων, έχοντας το αποτέλεσμα έτσι να υπάρχει υψηλότερη εκπομπή ραδονίου στην ατμόσφαιρα του ορυχείου. Τα απορρίμματα τα οποία δεν χωρίζονται σε κλάσματα βρέθηκε πως έχουν 19,19% από το ράδιο που υπήρχε στο μέταλλευμα. Τα υπολείμματα τα οποία χωρίστηκαν βρέθηκε πως έχουν μικρότερο ποσοστό, περίπου 14,38%. Επιπλέον ο Διεθνής Οργανισμός Ατομική Ενέργειας έχει βρει πως υπολείμματα τα οποία έχουν μέγεθος μικρότερο από 40μm απελευθερώνουν έως και 10-15 φορές περισσότερο ραδόνιο στην ατμόσφαιρα (Sahu et al., 2014) (IAEA, 1976).

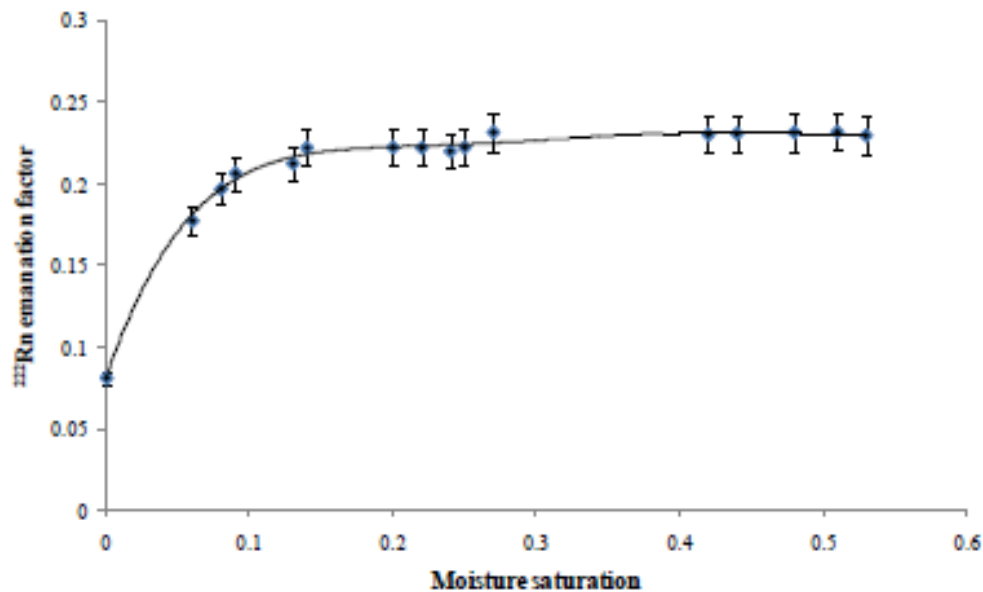
Ένας παράγοντας που βρέθηκε να επηρεάζει το ποσοστό ραδονίου σε απορρίμματα επίχωσης είναι αυτός του περιεκτικότητας της υγρασίας (η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να περιέχεται σε ένα βράχο όταν όλοι οι χώροι πόρων είναι γεμάτοι με νερό). Στον **Πίνακα 5.2.2.1** μπορεί να παρατηρηθεί ο τρόπος που η περιεκτικότητα της υγρασίας επηρεάζει την εκπομπή του ραδονίου στην ατμόσφαιρα.

Αρχικά στον άξονα X αναπαρίσταται το Moisture Saturation είναι ο κορεσμός υγρασίας και στον άξονα Y είναι ο συντελεστής εκπομπής του ραδονίου. Αυτό που παρατηρείται ουσιαστικά είναι πως με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία, η περιεκτικότητα σε νερό των πόρων των απορριμμάτων αυξάνεται με αποτέλεσμα ο τερματισμός της ανάκρουσης των ατόμων ραδονίου στους πόρους. Σε υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία

(πάνω από 5% κατ' όγκο), λίγα από αυτά τα άτομα διεισδύουν στα παρακείμενα σωματίδια κόκκων και ο συντελεστής εκπομπής του ραδονίου παραμένει σχεδόν σταθερός με την αύξηση περιεκτικότητα σε υγρασία μέχρι τον πλήρη κορεσμό.

**Πίνακας 5.2.2.1:** Εκπομπή του ραδονίου σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα σε υγρασία.

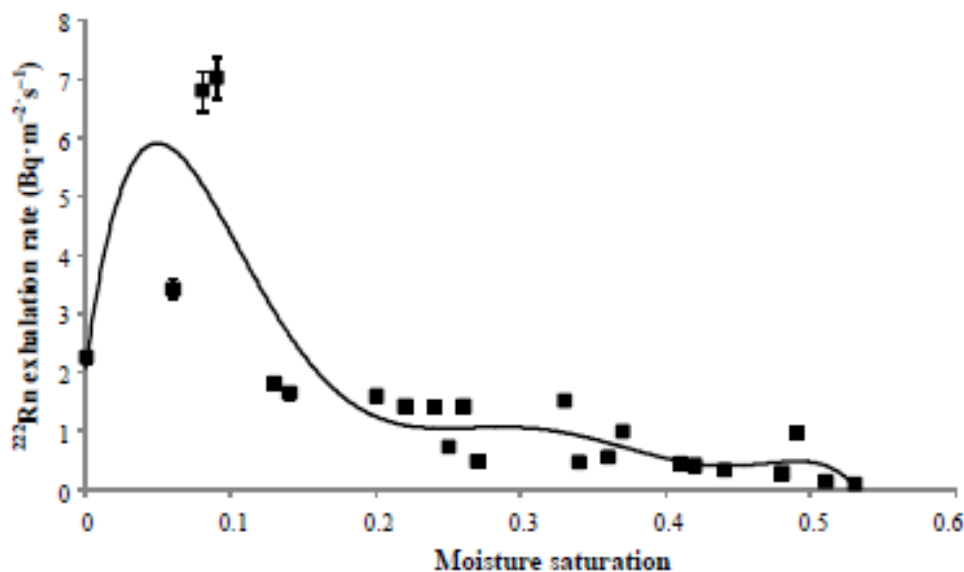
**Πηγή:** (Sahu et.al., 2014)



Έχει διαπιστωθεί λοιπόν ότι ο ρυθμός εκπομπής του ραδονίου στην ατμόσφαιρα από τα απορρίμματα επίχωσης αυξάνεται όσο υπάρχει παρουσία της υγρασίας και έπειτα σταθεροποιείται. Η σταθεροποίηση αυτή των τιμών Rn ξεκινά να μειώνεται έπειτα από ένα σημείο κορεσμού της υγρασίας έως ώστε μηδενίζει τελείως. Αυτό φαίνεται καθαρά στον **Πίνακα 5.2.2.2** όπου μετά την τιμή 0,05 της υγρασίας οι τιμές της εκπομπής του Rn έχουν μια απότομη πτωτική τάση. Βάση έρευνας του Παγκόσμιου Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της επαναπροσρόφησης των ατόμων ραδονίου, τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια των πόρων των βράχων με χαμηλό συντελεστή διάχυσης σε συνδυασμό με την ξηρότητα που επικρατεί, τα οποία έρχονται σε επαφή με το νερό προκαλώντας έτσι όλο και μικρότερο ρυθμό εκπομπής ραδονίου (IAEA, 1992a) (Sahu et. Al., 2014).



**Πίνακας 5.2.2.2:** Ο ρυθμός εκπονοής του ραδονίου σε σχέση με την υγρασία.



**Πηγή:** (Sahu et al., 2014)

### 5.2.3 Υπόγεια Ύδατα

Υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας η διαλυτότητα που έχει το ραδόνιο στο νερό είναι χαμηλή. Σε ιδιαίτερες συνθήκες όμως αυξημένης πίεσης από την υπερφόρτωση (overburden) η διαλυτότητα του ραδονίου μεγαλώνει σημαντικά. Όταν υπάρχουν αρκετές ωπές και σχισμές το νερό βρίσκει τρόπο να εισέρχεται και έτσι το ραδόνιο που διαλύεται απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα ενός ορυχείου λόγω της απότομης μείωσης της πίεσης που δέχεται. Αυτή η διάλυση του ραδονίου στο νερό σε μία υπόγεια εκμετάλλευση μπορεί να δημιουργηθεί από διάφορες πηγές νερού. Αυτές φαίνονται ανά κατηγορία στον **Πίνακα 5.2.3.1** σε μια έρευνα περίπτωσης όπου πραγματοποιήθηκε σε δύο υπόγεια ορυχεία στην Ινδία.

**Πίνακας 5.2.3.1:** Συγκεντρώσεις Rn (που έχει διαλυθεί σε υπόγειο νερό) που μετρήθηκαν σε δύο διαφορετικά ορυχεία στην Ινδία.

Πηγή νερού	Συγκεντρώσεις Rn ( $10^3\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ )	Συγκεντρώσεις Rn ( $10^3\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ )
-	Υπόγειο ορυχείο 1	Υπόγειο ορυχείο 2
Γεωτρήσεις και διατρήσεις	2,27	4,12
Ρωγμές στους τοίχους	0,79	9,0
Διαρροή στους τοίχους	0,47	5,66
Ανοιχτές αποχετεύσεις	0,45	0,5

**Πηγή:** (Raghavayya, 1976) (Sahu et. al., 2014)

Έχει βρεθεί πως η συγκέντρωση του ραδονίου που διαλύεται στον νερό φτάνει ένα επίπεδο πολύ πιο υψηλό από την συγκέντρωση που υπάρχει σε κενά που έχουν απλώς αέρα. Αυτό συμβαίνει λόγω το ότι η ροή του νερού που προκαλεί μεγαλύτερη διάλυση στους πόρους του υλικού σε αντίθεση με την διαδικασία διάχυσης που συμβαίνει σε ξηρό υλικό. Άρα εν τέλει η μεταφορά του ραδονίου σε ένα ορυχείο όπου δεν υπάρχει παρουσία υπόγειων υδάτων είναι πολύ μικρότερη, από αυτή που συμβαίνει σε ένα ορυχείο με υπόγεια ύδατα (Sahu et. al., 2014). Σε έρευνα βρέθηκε πως γενικότερα το 75% του ραδονίου που διαλύεται στον νερό απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα (Khan, 1979).

Επίσης έπειτα από μελέτες έχει βρεθεί πως απελευθερώνεται ραδόνιο στην ατμόσφαιρα όταν το νερό απλώς διαπερνάει το μέταλλευμα από  $3,7 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  έως  $3,7 \cdot 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ . Ενώ όταν πραγματοποιείται διάλυση του ραδονίου απελευθερώνεται από  $19,13 \cdot 10^3 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  έως  $3 \cdot 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (Sahu et. al., 2014). Συνοψίζοντας λοιπόν προκύπτει το συμπέρασμα πως σε ένα υπόγειο ορυχείο ουρανίου θα πρέπει να καταβάλλεται κάθε ενέργεια για τον περιορισμό των υπόγειων υδάτων λόγω της ικανότητας τους να αυξάνουν τα επίπεδα ραδονίου στην ατμόσφαιρα (Khan, 1979).

### 5.3 Μέθοδοι Μέτρησης του Ραδονίου

Για την μέγιστη δυνατή ασφάλεια σε ένα υπόγειο ορυχείο ουρανίου είναι απαραίτητα να λαμβάνονται μετρήσεις για εκπομπές του ραδονίου έτσι ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή εικόνα για την ασφάλεια των εργαζόμενων.

#### 5.3.1 Μέθοδος με Κάνιστρο Κάρβουνου

Στην μέθοδο αυτοί χρησιμοποιούνται κάνιστρα κάρβουνου για την μέτρηση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Το κάθε κάνιστρο εμπεριέχει 25g από ενεργοποιημένο κάρβουνο εφόσον έχουν θερμανθεί επί 24 ώρες, για να απορροφήσουν κάθε προηγούμενο απορροφημένο ραδόνιο. Μόλις περάσουν οι ώρες στον φούρνο τα κάνιστρα απομακρύνονται και σφραγίζονται μέχρι την μεταφορά τους στο σημείο μέτρησης. Εκεί τοποθετούνται περίπου 1cm βαθιά στο έδαφος. Έπειτα τα κάνιστρα σφραγίζονται ξανά και μεταφέρονται στο εργαστήριο εφόσον περάσουν πέντε ημέρες.

Στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας ένα φασματόμετρο γάμμα με κρύσταλλο NaI(Tl) υπολογίζεται η ρυθμός εκπομπής του ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Το τελικό στάδιο

πραγματοποιείται με την χρήση του παρακάτω τύπου (Bollhofer, Storm, Martin & Tims, 2006) (Sahu et. al., 2014):

$$J = \frac{Rt_c \lambda^2 \exp(\lambda t_d)}{\varepsilon a [1 - \exp(-\lambda t_e)] [1 - \exp(-\lambda t_c)]}$$

Όπου:

- J είναι ο ρυθμός εκπομπής του ραδονίου σε Bq\*m<sup>-2</sup>\*s<sup>-1</sup>
- R είναι ο ρυθμός μέτρησης μετά την αφαίρεση του υποβάθρου κατά την διάρκεια μέτρησης t<sub>c</sub>
- t<sub>c</sub> η χρονική περίοδος της μέτρησης
- λ είναι η συνεχής αποσύνθεση του ραδονίου
- t<sub>d</sub> η περίοδος καθυστέρησης από την τέλος της έκθεσης στην αρχή του διαστήματος μέτρησης
- ε είναι η απόδοση μέτρησης του συστήματος
- a η επιφάνεια του κάμιστρου
- t<sub>e</sub> η χρονική περίοδος έκθεσης του κάμιστρου στον άνθρακα

### 5.3.2 Μέτρηση του Ραδονίου στο Νερό

Η περιεκτικότητα του ραδονίου που έχει διαλυθεί στο νερό υπολογίζεται με την μέθοδο της τεχνικής εμανομετρίας. Χρησιμοποιώντας αεροστεγή πλαστικά μπουκάλια συλλέγεται νερό. Έπειτα πραγματοποιείται μέτρηση του ραδονίου με συμβατικές τεχνικές.

Η συγκέντρωση ραδονίου στο νερό ενός ορυχείου μπορεί να βρεθεί όταν συγκριθεί το νερό σε τρεχούμενη ροή κατάντη και ανάντη με τον εξής τύπο:

$$E=q(C_{up} - C_{down})$$

Όπου:

- E είναι το ραδόνιο που απελευθερώνεται από το νερό σε Bq\*min<sup>-1</sup>
- q είναι η ροή του νερού σε l\*min<sup>-1</sup>
- C<sub>up</sub> η συγκέντρωση του νερού σε ραδόνιο ανάντη (upstream) σε Bq\*l<sup>-1</sup>
- C<sub>down</sub> η συγκέντρωση του ραδονίου στο νερό κατάντη σε Bq\*l<sup>-1</sup>

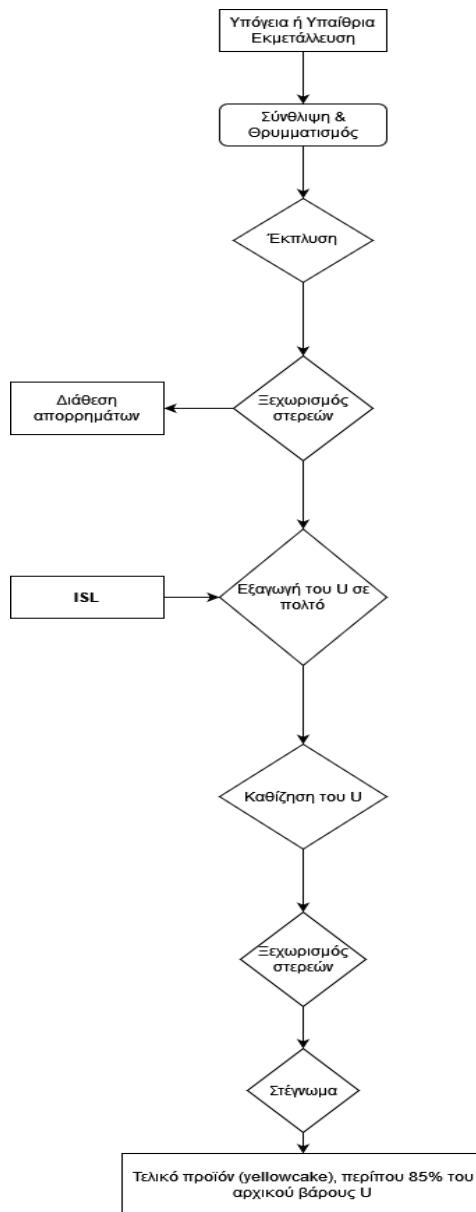
### 5.3.3 Μέσα Ατομικής Προστασίας

Ορισμένα μέσα ατομικής προστασίας έχουν συστηθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα έχει συστηθεί η χρήση της αναπνευστικής προστασίας για την μείωση στην έκθεση των ραδιενεργών σωματιδίων. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί πως τα ΜΑΠ (Μέσα Ατομικής Προστασίας) ενδέχεται να προκαλέσουν δυσφορία στον εργαζόμενο αλλά και προβλήματα στον συνδυασμό με την χρήση και του υπόλοιπου μεταλλευτικού εξοπλισμού (International Atomic Energy Agency, 2020).

Παρόλο όμως τα μερικά αρνητικά που έχουν τα ΜΑΠ που συστήνει ο Π.Ο.Α.Ε., τα ΜΑΠ μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικά στην ελαχιστοποίηση της έκθεσης όπου η εφαρμογή ελέγχων υψηλότερου επιπέδου δεν μπορεί να επιτευχθεί σε λογικά χρονικά πλαίσια. Αυτό όμως έχοντας υπόψη, από την σκοπιά της διαχείρισης, πως τα ΜΑΠ είναι το χαμηλότερο στοιχείο ελέγχου στην ιεραρχία ελέγχου και δεν αποτελούν οριστική λύση πρόληψης (International Atomic Energy Agency, 2020).

## 6. Επεξεργασία του Ουρανίου

Εφόσον εφαρμόζεται μια μέθοδος εκμετάλλευσης του ουρανίου έπειτα το επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία του. Ο στόχος της επεξεργασίας είναι να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος έτσι ώστε να απομονωθεί το ουράνιο από το ορυκτό του. Αυτό μπορεί να γίνει με μεθόδους όπως in-situ leaching (ISL), με χρήση μύλου (milling) και συνδυαστικά αυτό μαζί με άλλες υπό μεθόδους. Ουσιαστικά η επεξεργασία του ουρανίου είναι μια φυσική και χημική διαδικασία. Σε γενικές γραμμές η σειρά των διαφόρων εργασιών επεξεργασίας είναι η παρακάτω:



**Εικόνα 6.1:** Η γενική μορφή της σειράς των εργασιών για την επεξεργασία του ουρανίου.

**Πηγή:** (Hore-Lacy, 2016)

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι διαδικασίες της κάθε μεθόδου και θα δοθούν παραδείγματα εφαρμογής αναλόγως των περιπτώσεων και των συνθηκών.

### 6.1 Σύνθλιψη και Θρυμματισμός

Σε σχεδόν όλα τα μεταλλεία ουρανίου το μέταλλευμα καθώς εξορύσσεται από το έδαφος χρειάζεται ιδιαίτερη επεξεργασία, καθώς ο κύριος στόχος είναι η απομόνωση του ουρανίου από τα υπόλοιπα στοιχεία. Η σύνθλιψη εφαρμόζεται πριν από τον θρυμματισμό στο μέταλλευμα, καθώς στην μορφή που βρίσκεται έχει αρκετό υλικό το οποίο είναι πολύ χονδρό για να θρυμματιστεί (Hore-Lacy, 2016).

Η σύνθλιψη και ο θρυμματισμός αποτελούν και οι δύο μηχανικές διαδικασίες. Στο κομμάτι της σύνθλιψης του μεταλλεύματος δημιουργούνται θραύσματα τα οποία είναι περίπου μερικά εκατοστά σε μέγεθος. Η σύνθλιψη είναι μια ξηρή διαδικασία συνήθως. Έπειτα η σύνθλιψη που ακολουθεί μετατρέπει τα προηγούμενα θραύσματα σε μέγεθος τύπου άμμου ή ακόμα πιο μικρό. Και στις δύο διαδικασίες έχει κριθεί απαραίτητη η ρίψη νερού για τον έλεγχο της σκόνης και για την καλύτερη προστασία των εργαζομένων σε συνδυασμό για την καλή διατήρηση της ορατότητας (Hore-Lacy, 2016) .

Το εργοστάσιο σύνθλιψης αλλά και το εργοστάσιο θρυμματισμού πρέπει να είναι κατάλληλου τύπου και να είναι συμβατά αναλόγως το είδος του μεταλλεύματος του ουρανίου. Μερικοί παράγοντες όπως: η περιεκτικότητα σε λάσπη, σκληρότητα και το μέγεθος των θραυσμάτων, καθορίζουν την επιλογή του εργοστασίου που θα χρησιμοποιηθεί. Άλλοι ορυκτολογικοί, μεταλλουργικοί και εμπορικοί παράγοντες καθορίζουν τον αριθμό των μύλων που θα χρησιμοποιηθούν. Όσον αφορά την λείανση που πραγματοποιείται αυτή γίνεται με την χρήση περιστρεφόμενων τυμπάνων και είτε γίνεται με την προσθήκη χαλύβδινων ράβδων, σφαιρών ή βότσαλων βράχων, είτε γίνεται με την ανατροπή των ίδιων κομματιών του βράχου και ονομάζεται αυτογενής λείανση. (Hore-Lacy, 2016). Σε μερικές σπάνιες περιπτώσεις όπου το ορυκτό που εμπεριέχει ουράνιο είναι αργλικό, το στάδιο της σύνθλιψης παραλείπεται και προχωράει η διαδικασία κατευθείαν στο στάδιο του θρυμματισμού (Edwards, 2012).



**Εικόνα 6.1.1:** Ραβδόμυλος με χαλύβδινες ράβδους λείανσης οι οποίες είναι έτοιμες για να φορτωθούν.

**Πηγή:** Ορυχείο ουρανίου στο Rossing (Hore-Lacy, 2016).

Η σύνθλιψη και ο θρυμματισμός θεωρούνται επιτυχής όταν εξέχει έστω και λίγο ουράνιο το οποίο έχει απελευθερωθεί, δίνοντας έτσι συνέχεια στο επόμενο βήμα της επεξεργασίας το οποίο είναι ο εμπλουτισμός του μεταλλεύματος.

Τα θετικά που έχει αυτή η μορφή επεξεργασίας του μεταλλεύματος είναι (Uranium: How Is It Mined?, n.d.):

- Πρόκειται για την μόνη μέθοδο επεξεργασίας του ουρανίου για συμβατικά ορυχεία.

- Τα μοντέρνα εργοστάσια σύνθλιψης και θρυμματισμού έχουν πιο αυστηρούς νόμους σχετικά με την λειτουργία τους από παλαιότερα.

Τα αρνητικά:

- Πολύ ακριβά στην αποκατάσταση.
- Τα απορρίμματα εκτίθενται στο περιβάλλον και υπάρχει ρίσκο το ουράνιο ή τυχόν βαριά μέταλλα να μπορούν να απελευθερωθούν.
- Υπάρχει προστιθέμενο ρίσκο για την ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

## 6.2 Εμπλουτισμός του Μεταλλεύματος

Με τον όρο εμπλουτισμό του μεταλλεύματος εννοείται η επιλογή και ο διαχωρισμός των υψηλής ποιότητας θραυσμάτων του μεταλλεύματος από αυτών με κατώτερη ποιότητα. Σε ένα ορυχείο ουρανίου (και όχι μόνο) ο στόχος στον εμπλουτισμό είναι το αναβαθμισμένο προϊόν να έχει υψηλότερο επίπεδο ποιότητας. Ως υψηλότερη ποιότητα πρακτικά σημαίνει πως το προϊόν να χρειάζεται όσον το δυνατό μικρότερο εργοστάσιο για την περαιτέρω επεξεργασία του. Ως κανόνας για τον σωστό εμπλουτισμό του μεταλλεύματος είναι να σωθεί όσον το δυνατόν περισσότερο ουράνιο ενώ να απορριφθεί όσον το δυνατό περισσότερο υλικό το οποίο δεν θα χρησιμοποιηθεί (Hore-Lacy, 2016).

Στο παρελθόν ο εμπλουτισμός γινόταν με πιο αργές μεθόδους, βάση της εξωτερικής εμφάνισης δηλαδή αλλά και με απλό σκανάρισμα ακτίνων γ. Τις τελευταίες δεκαετίες οι μέθοδοι εμπλουτισμού έχουν εξελιχθεί και πλέον πραγματοποιούνται βάση φυσικών, ραδιομετρικών χαρακτηριστικών και ορυκτολογικών παραγόντων (Hore-Lacy, 2016). Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν οι τρόποι του εμπλουτισμού που εφαρμόζονται στα μεταλλεύματα με ουράνιο με την αναφορά παραδειγμάτων.

Ένας τρόπος εμπλουτισμού σε ορυκτά του ουρανίου είναι με την χρήση της βαρύτητας. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μια διαδικασία όπου τα σωματίδια τα οποία είναι πολύτιμα ξεχωρίζονται λόγω της διαφοράς των όγκων τους με αυτά που είναι ανεπιθύμητα. Ξεχωρίζονται δηλαδή από τους ρυθμούς καθίζησης τους σε μέσα όπως το νερό ή στον αέρα (INSPIRE Registry, n.d.). Η επίπλευση διαχωρίζει τους κόκκους ορυκτών που ανταποκρίνονται διαφορετικά όταν οι φυσαλίδες αέρα ωθούνται μέσω ενός εναιωρήματος σε νερό με χημικά πρόσθετα, προκαλώντας την αύξηση ορισμένων ορυκτών με τον αφρό, από τα οποία μπορούν να συλλέγονται σε συμπυκνωμένη μορφή. Η μέθοδος με την επίπλευση έχει χρησιμοποιηθεί σε ορυχεία όπως το Olympic Dam (Αυστραλία) και σε ορυχεία της



Ινδίας και του Καναδά (Muthuswami et al., 1983) (Singh et al., 2010) (Alexander and Wigley 2010) (Hore-Lacy, 2016).

Υπάρχει μια μέθοδος εμπλουτισμού που χρησιμοποιείται στα ορυκτά του ουρανίου η οποία ονομάζεται ραδιομετρική διαλογή. Η ραδιομετρική διαλογή των μεταλλευμάτων βασίζεται στο επίπεδο της φυσικής ακτινοβολίας  $\gamma$  που εκπέμπεται από τα διάφορα ορυκτά συστατικά των μεταλλευμάτων του ουρανίου (Kidd, n.d.). Η ραδιομετρική χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια στην Ουκρανία αλλά και στο ορυχείο Ranger στην Αυστραλία (OECD-NEA/IAEA, 2014) (Shatalov et al., 2001) (Hore-Lacy, 2016).

### 6.3 Μέθοδος In Situ Leaching

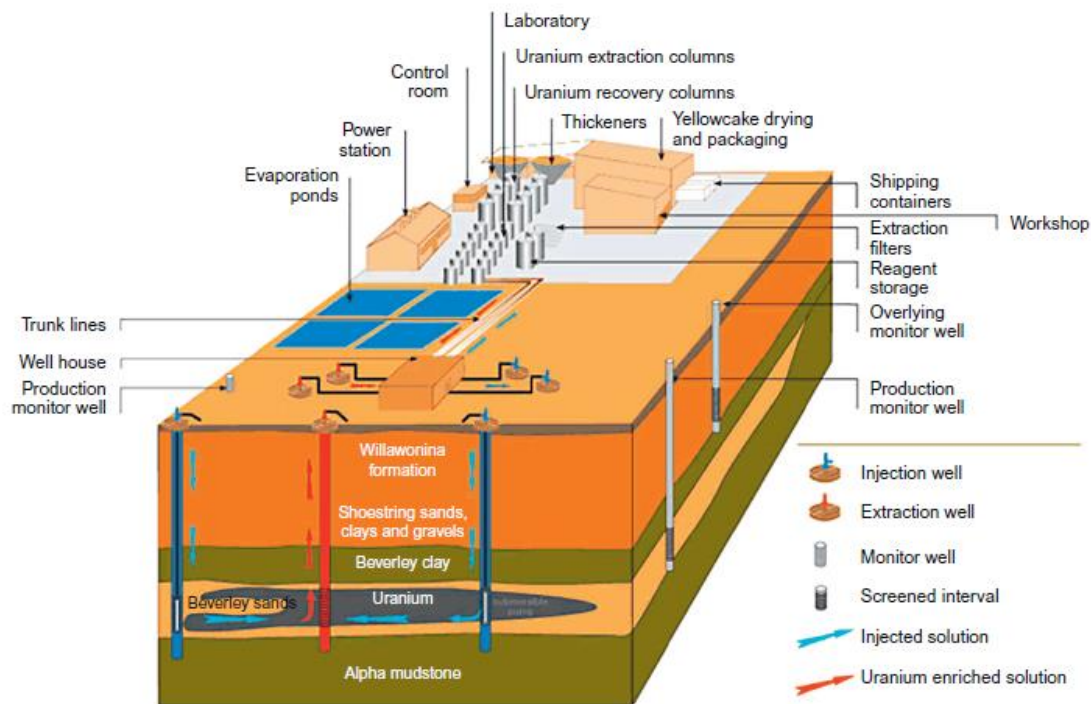
Η μέθοδος ISL (in situ leaching, γνωστή και ως in situ recovery) πρόκειται για μια μέθοδο επεξεργασίας και εκμετάλλευσης του ουρανίου που είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη για πολλούς λόγους. Στην μέθοδο με επί τόπου έκπλυση το μέταλλευμα αφήνεται στο υπέδαφος όπου από εκεί το ουράνιο απομονώνεται από το μέταλλευμα από την διάλυση που προκαλείται μέσω των χημικών που χρησιμοποιούνται (In Situ Leach Mining (ISL) of Uranium - World Nuclear Association, n.d.).

Στην μέθοδο ISL το lixiviant πρέπει να έρθει σε επαφή με το ορυκτό του ουρανίου που βρίσκεται στο πέτρωμα του. Το ορυκτό θα πρέπει να είναι ένα συγκεκριμένο είδος το οποίο θα διαλύεται με την συγκεκριμένη χημική λύση. Επιπλέον θα πρέπει να υπάρχουν αρκετά επαρκή υπόγεια ύδατα έτσι ώστε να ο υδροδυναμικός έλεγχος (Hore-Lacy, 2016).

Αναλόγως των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και των απαιτήσεων κανονισμών σε μια τοποθεσία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλκαλικό ή όξινο (lixiviant) διάλυμα. Τα τυπικά όξινα διαλύματα αποτελούνται από υπόγεια ύδατα τα οποία εμπεριέχουν θειικό οξύ και μερικές φορές προστίθεται ένα οξειδωτικό όταν χρειάζεται. Ένα τυπικό αλκαλικό διάλυμα αποτελείται από υπόγεια ύδατα στο οποίο αέριο διοξειδίου του άνθρακα (ή κάποια μορφή διτανθρακικού νατρίου) και οξυγόνο (ή άλλης μορφής οξειδωτικού) προστίθενται.

Το ISL χρησιμοποιεί πηγάδια για την έγχυση τροποποιημένων υπόγειων υδάτων στη ζώνη μεταλλεύματος. Αυτή η χημική λύση υπόγειων υδάτων αναφέρεται συνήθως ως lixiviant. Το lixiviant διαλύει το ουράνιο καθώς ξεχωρίζεται μέσω του πετρώματος που φέρει ουράνιο από μια αντλία σε ένα κοντινό πηγάδι παραγωγής, το οποίο στη συνέχεια στέλνει το πλούσιο σε ουράνιο νερό στο εργοστάσιο επεξεργασίας όπου το ουράνιο ανακτάται. Αυτή η διαδικασία

επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειαστεί μέχρι να ολοκληρωθεί η επεξεργασία (Hore-Lacy, 2016)



**Εικόνα 6.3.1:** Η μέθοδος In-situ Leaching.

**Πηγή:** (Hore-Lacy, 2016)

Η μέθοδος ISL έχει αποδειχθεί πως φέρει τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την επεξεργασία του ουρανίου. Επιπλέον η μέθοδος παρέχει την καλύτερη προστασία του περιβάλλοντος από άλλες μεθόδους επεξεργασίας. Μερικά πλεονεκτήματα του ISL είναι (Hore-Lacy, 2016):

1. Σε σύγκριση με τη συμβατική επεξεργασία του ουρανίου, το ISR μειώνει τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη έκθεση του γενικού πληθυσμού στα χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας επειδή σχεδόν όλες οι πηγές (κυρίως τα προϊόντα ραδιενεργού διάσπασης των  $^{238}\text{U}$ ) παραμένουν στην ήδη υπόγεια φυσική τους θέση. Επίσης παράγονται πολύ λίγα ραδιενεργά απόβλητα και δεν υπάρχουν απορρίμματα (στείρο υλικό που πρέπει να απομακρυνθεί). Η τοποθεσία της επεξεργασίας επιστρέφεται εύκολα στην αρχική κατάσταση πριν από την ISL.
2. Το ISL έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά λιγότερη επιφανειακή διαταραχή.
3. Δεν υπάρχει καμία υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα στις εγκαταστάσεις ISR, λόγω της ελάχιστης χρήσης βαριού εξοπλισμού, σε συνδυασμό με την έλλειψη δρόμων μεταφοράς, χωματερών, κ.λπ.

4. Το ISR απαιτεί πολύ λιγότερο νερό από ό,τι οι συμβατικές μέθοδοι εκμετάλλευσης και επεξεργασίας.
5. Οι υδροφόροι ορίζοντες δεν ανασκάπτονται, αλλά παραμένουν άθικτοι κατά τη διάρκεια και μετά την εφαρμογή της μεθόδου, έτσι και μετά από την αποκατάσταση παραμένουν διαθέσιμοι για μελλοντικές χρήσεις. Αποφυγή δημιουργίας μεγάλων ανασκαφών διατηρεί τη γύρω γη κατάλληλη για μελλοντική χρήση.
6. Μετά τις αρχικές κατασκευαστικές εργασίες, μειώνεται ο αριθμός των απαραίτητων εργαζόμενων στις εγκαταστάσεις ISL, μειώνοντας έτσι τις μεταφορές και τις κοινωνικοοικονομικές ανησυχίες.

#### 6.4 Κάθαρση του Ουρανίου Μέσω Οξειδωτικών και Αλκαλικών

Ως στοιχείο το ουράνιο εμφανίζεται σε τέσσερις καταστάσεις οξειδωσης. Από όλες τις καταστάσεις οξειδωσης του ορυκτολογικά (και γεωχημικά) σημαντικό είναι τα  $U^{4+}$  και  $U^{6+}$  (αλλιώς ως τετρασθενές και εξασθενές ουράνιο). Η πιο συχνή μορφή του που βρίσκεται στην φύση είναι το τετρασθενές ουράνιο και σε μερικές περιπτώσεις υπό οξειδωτικές συνθήκες το εξασθενές ουράνιο (Dahlkamp, 1993).

Όπου βρίσκεται ουράνιο σε εξασθενή μορφή υπάρχει και πιο εύκολη διαδικασία επεξεργασίας, καθώς το ουράνιο σε εξασθενή μορφή διαλύεται πιο εύκολα από την μορφή του τετρασθενές ουρανίου. Οι επιλογές για την διάλυση του ουρανίου είναι τα όξινα διαλύματα και τα ανθρακικά (αλκαλικά) διαλύματα. Ένας κύριος σκοπός της εξόρυξης ουρανίου είναι να μετατρέψει το ουράνιο από αδιάλυτες τετρασθενείς σε διαλυτές εξασθενείς μορφές μέσω μιας διαδικασίας της οξειδωσης. Ορυκτά όπως ο ουρανινίτης και ο κοφινίτης (coffinite) διαλύονται εύκολα σε όξινα ή ανθρακικά διαλύματα (Hore-Lacy, 2016).

Σε σχέση με τα όξινα διαλύματα η διάλυση σε ανθρακικά διαλύματα αποτελεί πιο αργή διαδικασία. Αυτό γίνεται καθώς απαιτεί λεπτότερο θρυμματισμό του μεταλλεύματος και μπορεί να είναι λιγότερο πλήρης. Η επιλογή της όξινης επεξεργασίας χρησιμοποιείται συχνότερα, εκτός εάν η περιεκτικότητα σε ανθρακικά άλατα είναι μεγαλύτερη από 1-3% όπου και καθιστούν την κατανάλωση οξέος αντιοικονομική, άρα χρησιμοποιείται η αλκαλική διάλυση (Hore-Lacy, 2016).

## 7. Συμπεράσματα

Το Ουράνιο όπως αναφέρθηκε στις παραπάνω ενότητες αποτελεί ίσως από τα πιο σημαντικά χημικά στοιχεία στον μοντέρνο κόσμο. Έχει την μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση και όταν εκμεταλλεύεται σωστά μπορεί να προσφέρει καθαρή ενέργεια, χωρίς εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα. Βάση των στατιστικών στοιχείων παραγωγής και ζήτησης που μελετήθηκαν, αλλά και η αναφορά στις μεθόδους, τεχνικές της εκμετάλλευσης αλλά και της επεξεργασίας του, προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα.

Όπως είναι γνωστό, η κύρια χρήση του ουρανίου είναι στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των πυρηνικών αντιδραστήρων. Στο παρελθόν έχουν γίνει ατυχήματα με μεγάλες συνέπειες στο περιβάλλον αλλά και με αποτέλεσμα να χαθούν και ανθρώπινες ζωές. Όσον αφορά του κινδύνους λοιπόν το ουράνιο και όλη η διαδικασία της εξόρυξης και της επεξεργασίας του αποτελούν μερικές από τις πιο επικίνδυνες.

Αρχικά εφόσον μελετήθηκαν πρόσφατες τιμές παραγωγής αλλά και ζήτησης υπήρξε κατάληξη σε ορισμένα συμπεράσματα για την σχέση του ουρανίου με την παγκόσμια ζήτηση. Η πυρηνική ενέργεια έχοντας παρουσιάσει στο παρελθόν δύο μεγάλα ατυχήματα, με το πιο πρόσφατο αυτό στην Φουκοσίμα της Ιαπωνίας, εξακολουθεί να είναι μια ενεργειακή λύση για μια όλο και αυξανόμενη λίστα από χώρες που την χρησιμοποιούν.

Ουσιαστικά παρόλο την σταδιακή μείωση των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη και ανεξαρτήτως του ατυχήματος στην Φουκοσίμα, η ανάγκη για ουράνιο έχουν αυξηθεί. Βρέθηκε πως τα τελευταία έτη κιόλας χώρες όπως η Κίνα εξακολουθούν να αυξάνουν τους ενεργούς πυρηνικούς σταθμούς και έτσι να αναιρείται και η όποια προσπάθεια για μείωση της παγκόσμιας πυρηνικής ενέργειας που καταβάλουν χώρες όπως η Γερμανία.

Έπειτα στον τομέα της εξόρυξης παρατηρείται πως άργησαν αρκετά χρόνια να εφευρεθούν τρόποι διαχείρισης των κινδύνων, πιο συγκεκριμένα της επικινδυνότητας του ραδονίου. Το ίδιο το ραδόνιο όταν αυτό εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, από διάφορες πηγές, αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία όσον αφορά την μέτρηση του. Ενώ έχουν βρεθεί διάφορες τεχνικές μετρήσεις προκύπτει το συμπέρασμα πως οι τρόποι που κινδυνεύουν να εκτεθούν οι εργαζόμενοι ενός ορυχείου σε αυτό είναι πολλοί.

Άρα εν τέλει οι υπάρχουσες και οι μελλοντικές μεταλλευτικές επιχειρήσεις θα πρέπει να τηρούν τα κάτωθι:

- Ανάπτυξη σωστού σχεδιασμού για την εξαερισμό στα υπόγεια ορυχεία ουρανίου. Μέτρο το οποίο είναι ίσως και το πιο σημαντικό για την πρόληψη από το ραδόνιο. Ενώ μετά από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα έχει διαπιστωθεί πως αρκετά ορυχεία δεν έχουν τον απαραίτητο εξαερισμό.
- Η διαρκής μέτρηση του ραδονίου αξιοποιώντας και εξελίσσοντας τις μεθόδους μέτρησης για τις διάφορες πιθανές πηγές εκπομπής του ραδονίου (τοιχώματα του ορυχείου, υπόγεια ύδατα κλπ.).
- Χρήση των κατάλληλων ΜΑΠ όσο το δυνατόν περισσότερο όπως συστήνεται και από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας παρόλο των μερικών αρνητικών που παρουσιάζουν στην χρήση τους.

Τέλος μελετήθηκαν και οι μέθοδοι της επεξεργασίας του ουρανίου όπου προέκυψε το συμπέρασμα πως η μέθοδος **In Situ Leaching** είναι η πιο συνήθης μέθοδος επεξεργασίας. Εκτός από την πιο φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο, η ISL επιλέγεται περισσότερο από κάθε άλλη μέθοδο καθώς είναι και πιο οικονομική κυρίως λόγο το ότι δεν απαιτεί την ιδιαίτερη απομάκρυνση και διαχείριση του στείρου υλικού όπως οι άλλες μέθοδοι εκμετάλλευσης και επεξεργασίας. Όλα τα παραπάνω την καθιστούν ως η πιο αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο, εφόσον υπάρχουν οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή της.

## Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση:

A. (Eds.), Uranium in the Environment, Conference Proceedings 4th International

Alexander, D.J., Wigley, P. 2003. *Flotation circuit analysis at WMC Ltd Olympic Dam operation*. In: 8th Mill Operators' Conference, Townsville, Queensland, Australia, 21\_23 July 2003. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, Australia, pp. 41\_51. and future. CIM J. 3 (2), 69\_94.

Berlin and Heidelberg, pp. 593\_599.

BHP. (2018). *BHP Annual Report 2018*. <https://www.bhp.com/-/media/documents/investors/annual-reports/2018/bhpannualreport2018.pdf>

Bollhofer, A., Storm, J., Martin, P., & Tims, S. (2006). *Geographic variability in radon exhalation at a rehabilitated uranium mine in the Northern Territory, Australia*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 114, 313–330

Bracke, G., Alkan, H., Müller, W. 2006. *Modelling underground ventilation networks and Challenges*, Aachen, Germany, pp. 113\_117.

*cleaning system requirements in underground mines*. J. Am. Sci. 7 (2), 389\_402.

CO, pp. 457\_465.

*Cone Penetration Testing (CPT)*. (n.d.). Geoengineer. Retrieved September 8, 2022, from <https://www.geoengineer.org/education/site-characterization-in-situ-testing-general/cone-penetration-testing-cpt>

Conference on Uranium Mining and Hydrogeology 2005, Freiberg, Germany. Springer,

D. B. Apel & J. K. Szymanski. (2012, January). Ventilation Systems at High Grade Uranium Deposits. In *School of Mining and Petroleum Engineering, University of Alberta*. University of Alberta.

Dahlkamp, F.J., 1993. Uranium Ore Deposits. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg. Dhawan, N., Safarzadeh, M.S., Miller, J.D., Moats, M.S., Rajamani, R.K., 2013. *Crushed ore agglomeration and its control for heap leach operations*. Miner. Eng. 41, 53\_70.

Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook, 2nd Edition* (2nd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Dunne, R.C., Uhrig, J.L. (Eds.), *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*: 100

Edwards, C., 2012. Uranium milling in northern Saskatchewan's Athabasca Basin: past, present

El-Fawal, M.M., 2011. *Mathematical modelling for radon prediction and ventilation air*

Energy Agency/International Atomic Energy Agency), 2014. *Uranium 2014: Resources, environmental best practice at Cameco's Uranium mining operations in Northern*

H. Altit, A., O. Alrawashdeh, R., & M. Alnawafleh, H. (2021). Open Pit Mining. *Mining Techniques - Past, Present and Future*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92208>

Hollmann, F., & Thewes, M. (2013, August). Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.010>

Hore-Lacy, I. (2016). *Uranium for Nuclear Power: Resources, Mining and Transformation to Fuel*. Woodhead Publishing.

IAEA. (1976). *Uranium ore processing. Proceeding Advisory Group Meeting*. Washington, D.C., International Atomic Energy Agency (IAEA).

IAEA. (1992a). *Measurement and calculation of radon releases from uranium mill tailings*. International Atomic Energy Agency, Technical Report Series No. 333, Vienna.

IAEA. (1992b). *Current practices for the management and confinement of uranium mill tailings*. International Atomic Energy Agency, Technical Report Series No. 335, Vienna.

*In Situ Leach Mining (ISL) of Uranium - World Nuclear Association*. (n.d.). Retrieved October 17, 2022, from <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/in-situ-leach-mining-of-uranium.aspx>

*INSPIRE registry*. (n.d.). Retrieved October 17, 2022, from <https://inspire.ec.europa.eu/codelist/ProcessingActivityTypeValue/gravimetricSorting>

International Atomic Agency. (1993). *Uranium Extraction Technology*. IAEA.

International Atomic Energy Agency & Nuclear Energy Agency. (2020). *Uranium 2020 Resources, Production and Demand*. [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true)

International Atomic Energy Agency. (2020). Safety Reports Series No. 100. In *IAEA Publications*. IAEA. Retrieved October 18, 2022, from <https://www.iaea.org/publications/13401/occupational-radiation-protection-in-the-uranium-mining-and-processing-industry>

International Mine Water Association Congress—Mine Water—Managing the

Khan, A.H. (1979). *A study on the factors affecting the build-up of radon-222 and its progeny in uranium mines*. M.Sc. Thesis. University of Bombay, Mumbai, India.

Khan, A.H. (1979). *A study on the factors affecting the build-up of radon-222 and its progeny in uranium mines*. M.Sc. Thesis. University of Bombay, Mumbai, India.

Kidd, D. G. (n.d.). *Radiometric sorting of ore/INIS*. Retrieved October 17, 2022, from [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:14807276](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:14807276)

Merritt, R. C. (1971). *Extractive metallurgy of uranium*. Metallurgy, Melbourne, Australia 1, pp. 793\_799.

*Mining Methods - Businesses - Cameco*. (n.d.). Retrieved October 7, 2022, from <https://www.cameco.com/businesses/mining-methods>

Mossa, J., & James, A. (2013, March). Impacts of Mining on Geomorphic Systems. *Research Gate*.

Muthuswami, S.V., Vijayan, S., Woods, D.R., Banerjee, S., 1983. *Flotation of uranium from*

Newman, G., Newman, L., Chapman, D., Harbicht, T. 2011. *Artificial ground freezing: an*

*Nuclear Fuel Facts: Uranium*. (n.d.). Energy.Gov. Ανακτήθηκε 9 Μαρτίου, 2022 από <https://www.energy.gov/ne/nuclear-fuel-facts-uranium#:~:text=Uranium%20is%20a%20silvery%2Dwhite,of%20all%20naturally%20occurring%20elements.>

OECD-NEA/IAEA (Organisation for Economic Cooperation and Development \_ Nuclear



Oggeri, C., Fenoglio, T. M., Godio, A., & Vinai, R. (2019b, March). Overburden management in open pits: options and limits in large limestone quarries. *Science Direct*, 29(2), 1–3. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268618303719>

*Olympic Dam Mine, BHP Billiton, Australasian Mining and Metallurgical Operating*

Patel, A. (2019). Geotechnical investigation. *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions*, 87–155. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817048-9.00009-3>

Poudel, E. M. K. (2022, June 23). *Unified Soil Classification System (USCS) : With 3 Major Divisions » Explaiiation with Charts*. Dream Civil. Retrieved September 8, 2022, from <https://dreamcivil.com/unified-soil-classification-system/>

*Practices, third ed. AusIMM Monograph 28*. The Australasian Institute of Mining and

*Production and Demand*. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.

*Radon and health*. (2021, February 2). Retrieved October 10, 2022, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

*radon flow for radiological protection using VUMA*. In: Merkel, B.J., Hasche-Berger,

Raghavayya, M. (1976). *A study of the distribution of radioactivity in uranium mines*. M.Sc. Thesis. University of Bombay, Mum-bai, India.

Robertson, A., Grant, D., Liebezeit, V., Ehrig, K., Badenhorst, C., Durandt, G. 2013.

Sahu, P., Panigrahi, D. C., & Mishra, D. P. (2014). *Sources of Radon and its Measurement Techniques in Underground Uranium Mines – An Overview*. *Journal of Sustainable Mining*, 13(3), 11–18. <https://doi.org/10.7424/jsm140303>

*Saskatchewan, Canada*. In: Ru'de, T.R., Freund, A., Wolkersdorfer, C. (Eds.), 11th

Schnell, H., 2014. Uranium processing practices, innovations, and trends. In: Anderson, C.G.,

*Singh, R., Sengupta, P. L., Pathak, P. N., Chattopadhyay, A., Maulik, S. C. 2001. Floatation*

Stacey, T. R., Xianbin, Y., Armstrong, R., & Keyter, G. J. (2003, July). New slope stability considerations for deep open pit mines. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*.

Studies on processing of a low grade uranium ore. In: International Conference on Challenges in Coal and Mineral Beneficiation, Jamshedpur, India.

Suleman Khan, Faseel & Azam, Shahid. (2016). Determination of consolidation behaviour of clay slurries. *International Journal of Mining Science and Technology*. 26. 10.1016/j.ijmst.2015.12.014.

*TECHNICAL GUIDE L-G-003: Plasticity testing*. (2015a, February). NSW Government. <https://roads-waterways.transport.nsw.gov.au/business-industry/partners-suppliers/documents/test-methods/plasticity-testing.pdf>

*The mineralogy of Uranium*. (n.d.). Mindat.Org. Ανακτήθηκε 9 Μαρτίου, 2022, από <https://www.mindat.org/element/Uranium>

Thewes, M., & Hollmann, F. (2016, August). Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.010>

*Uraninite: Mineral information, data and localities*. (n.d.). Mindat.Org. Ανακτήθηκε 9 Μαρτίου, 2022, από <https://www.mindat.org/min-4102.html>

*uranium ores in Canada: Part I-flotation results with Elliot Lake uranium ores using chelating agents as collectors*. *Can. J. Chem. Eng.* 61 (5), 728\_744.

*World Nuclear Power Reactors | Uranium Requirements | Future Nuclear Power - World Nuclear Association*. (n.d.). Retrieved October 18, 2022, from <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>

Years of Innovation. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), Englewood,

#### **Ελληνική:**

Σαββίδης, Σ. Γ. (2007). *Environmental Engineering Geology*. S.G.S.

Σαββίδης, Σ. Γ. (2019). *Ατλας Πετρωμάτων και Ορυκτών*. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ι.Κ.Ε.