



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ  
ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ.  
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ  
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ»**

**ΑΡΙΣΤΕΑ ΖΑΧΑΡΗ  
ΑΜ: 160678**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΛΟΥΠΙΑΣΑΚΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ  
ΙΟΥΝΙΟΣ, 2024**

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2023

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας / δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στο να φέρω σε πέρας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ευχαριστώ πολύ όλους τους Διδάσκοντες Καθηγητές και ιδιαίτερα τον Επιβλέποντα Καθηγητή της εργασίας αυτής, τον κο Κωνσταντίνο Λουπασάκη για την πολύτιμη βοήθειά του και τη διαρκή υποστήριξή του.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

*Στην οικογένειά μου*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση των αρχών σχεδιασμού των στρατιωτικών οχυρωματικών έργων. Η πρόοδος της στρατιωτικής τεχνολογίας και η καταστρεπτική δύναμη των σύγχρονων οπλικών συστημάτων, επιβάλλει την ανάγκη κατασκευής σύγχρονων οχυρωματικών έργων και την ενίσχυση των ήδη υφιστάμενων. Βάσει του υφιστάμενου κανονιστικού πλαισίου, ο σχεδιασμός των οχυρωματικών έργων γίνεται έναντι των όπλων σχεδιασμού, οι δράσεις των οποίων θα πρέπει να αναλαμβάνονται με ασφάλεια από την κατασκευή. Οι δράσεις αυτές είναι η διείσδυση του βλήματος σε κάποιο δομικό στοιχείο, το ωστικό κύμα και η εκτόξευση θραυσμάτων, που δημιουργούνται λόγω πυροδότησης ενός βλήματος στον αέρα και τέλος η εδαφική δόνηση, που προκαλείται από πυροδότηση ενός βλήματος εντός του εδάφους. Βασικός κανόνας του σχεδιασμού είναι η κατάλληλη επιλογή εδάφους, καθώς τα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία είναι αυτά που καθορίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διάδοση του ωστικού κύματος και της εδαφικής δόνησης μετά από έκρηξη. Επιπλέον, η μορφή του δομήματος, εξαρτάται από το επίπεδο ασφαλείας, το όπλο σχεδιασμού, το τοπογραφικό ανάγλυφο, στρατηγικά και οικονομοτεχνικά κριτήρια. Τα τελευταία χρόνια, νέα υλικά και τεχνολογία, όπως σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ), ινοπλισμένα σκυροδέματα ή σκυροδέματα υψηλής και υπερ-υψηλής αντοχής, χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο προσφέροντας αυξημένες αντοχές στις κατασκευές έναντι των δράσεων του όπλου σχεδιασμού. Το μεγαλύτερο οχυρωματικό έργο που έχει κατασκευαστεί ποτέ στη χώρα μας είναι η οχυρωματική Γραμμή Μεταξά κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων. Αποτέλεσε ένα τεράστιο τεχνικό έργο για την εποχή του, το οποίο κατασκευάστηκε σε μόλις τέσσερα χρόνια και με πολύ λίγα χρήματα για εκείνη την εποχή. Αποτελείται από 21 οχυρωματικά συγκροτήματα τα οποία διαθέτουν εκατοντάδες επιφανειακά έργα και χιλιάδες μέτρα υπόγειων στοών και καταφυγίων. Το συνολικό έργο συνδύαζε έργα οδοποιίας, σιράγγων, επιφανειακών έργων, ύδρευσης, αποχέτευσης, εξαερισμού, φωτισμού και τάφρων. Βασικό στοιχείο του σχεδιασμού, αποτέλεσε η πλήρης εκμετάλλευση του ορεινού ανάγλυφου και όλων των φυσικών εμποδίων, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη κάλυψη και προστασία των κατασκευών. Κάποια από αυτά τα οχυρά παραμένουν ακόμα και σήμερα ανέπαφα στο πέρασμα του χρόνου και αποτελούν ατράνταχτη απόδειξη του μεγέθους της κατασκευής του έργου.

Λέξεις κλειδιά: Στρατιωτικά οχυρωματικά έργα, Στρατιωτική γεωλογία, Υπόγεια καταφύγια, Σκυρόδεμα εξαιρετικά υψηλής απόδοσης, Οχυρά Γραμμής Μεταξά

## **ABSTRACT**

The purpose of this postgraduate master's thesis is the investigation of the design principles of military fortification constructions. The progress of military technology and the destructive power of modern weapon systems, imposes the need of strong fortifications. According to existing regulations, the design of fortification constructions is based on the design weapons, whose the actions should be safely undertaken by constructions. The actions that are caused by the design weapon are the projectile penetration into a structural element, the shock wave and the launch of fragments, which are created due to the firing of a projectile in the air and finally the ground vibration, caused by the firing of a projectile inside the ground. A basic design rule is the appropriate selection of the area, as the geological and geotechnical elements are mainly determine the propagation of the shock wave and the ground vibration after an explosion. In addition, the form of the structure depends on the level of security, the design weapon, the topographic relief, strategic and economic-technical criteria. In recent years, new materials and technology, such as composite fiber-reinforced polymers (FRP), fiber-reinforced concrete or high- and ultra-high-strength concrete, are increasingly used, offering increased resistance to constructions against the actions of the design weapon. The largest fortification construction, that has ever been built in our country is "Metaxas Fortification Line", along the Greek-Bulgarian border. It was a huge engineering project for its time, built in just four years and it was very cheap for that time. It consists of 21 fortified complexes which have hundreds of surface constructions and thousands of meters of underground corridors and shelters. The overall project combined road construction, tunneling, surface constructions, water supply, drainage, ventilation and lighting facilities and ditches. A key element of the design was the full exploitation of the mountainous relief and obstacles, in order to achieve the maximum coverage and protection of the constructions. Some of these forts remain even today intact over time and are an unshakeable proof of the magnitude of this fortification's construction.

**Keywords:** Military fortification construction, Military geology, Underground Shelters, Ultra-high-performance concrete, Forts of Metaxa Line

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Υπέργειο οχυρωματικό έργο με χρήση αποθήκης πυρομαχικών .....	21
Εικόνα 2.2 Είσοδος υπόγειου οχυρωματικού έργου (bunker) .....	21
Εικόνα 5.1 Εφαρμογές ενίσχυσης δομικών στοιχείων με ΙΟΠ.....	53
Εικόνα 5.2 Κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωμένου αντιαρματικού .....	56
Εικόνα 5.3 Κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωμένου στρατώνα .....	57
Εικόνα 6.1 Οχυρά Γραμμής Μεταξά .....	60
Εικόνα 6.2 Λιμάνι στις εκβολές του ποταμού Στρυμόνα .....	61
Εικόνα 6.3 Οχύρωση στενωπού Ρούπελ.....	62
Εικόνα 6.4 Οχύρωση οροπεδίου Κάτω Νευροκοπίου .....	63
Εικόνα 6.5 Φάτνωμα πολυβολείου όπου διακρίνεται η ξύλινη και η χαλύβδινη επένδυση....	77
Εικόνα 6.6 Παρατηρητήριο .....	78
Εικόνα 6.7 Αποψη και κάτοψη μονού πολυβολείου .....	79
Εικόνα 6.8 Τομή μονού πολυβολείου.....	80
Εικόνα 6.9 Αποψη και κάτοψη διπλού πολυβολείου .....	80
Εικόνα 6.10 Τομή διπλού πολυβολείου .....	81
Εικόνα 6.11 Αποψη εκτοξευτή χειροβομβίδων.....	81
Εικόνα 6.12 Κάτοψη και τομές εκτοξευτή χειροβομβίδων .....	82
Εικόνα 6.13 Αποψη και κάτοψη διπλού αντιαρματικού πυροβολείου.....	83
Εικόνα 6.14 Τομή διπλού αντιαρματικού πυροβολείου .....	84
Εικόνα 6.15 Αποψη μονού ολμοβολείου .....	84
Εικόνα 6.16 Τομή και κάτοψη μονού ολμοβολείου .....	85
Εικόνα 6.17 Αντιαεροπορικό πυροβολείο .....	86
Εικόνα 6.18 Αποψη και κάτοψη σκέπαστρων προβολέων .....	87
Εικόνα 6.19 Τομή σκέπαστρου προβολέων.....	88
Εικόνα 6.20 Αποψη σύνθετου επιφανειακού έργου .....	88
Εικόνα 6.21 Κάτοψη και τομή σύνθετου επιφανειακού έργου .....	89
Εικόνα 6.22 Αποψη σύνθετου επιφανειακού έργου στο οχυρό Ιστίμπεη.....	89
Εικόνα 6.23 Κάτοψη και τομή σύνθετου επιφανειακού έργου στο οχυρό Ιστίμπεη.....	90
Εικόνα 6.24 Στοά συγκοινωνίας με ευδιάκριτες τις εισόδους των καταφυγίων αριστερά και δεξιά.....	91
Εικόνα 6.25 Ημιτελής στοά στο οχυρό Λίσσε, κατασκευασμένη με τη μέθοδο της εξόρυξης .....	92

<b>Εικόνα 6.26</b> Ημιτελής στοά ανόδου με 220 σκαλοπάτια, στην οποία δεν πρόλαβαν να ολοκληρωθούν οι εργασίες επένδυσης με σκυρόδεμα .....	92
<b>Εικόνα 6.27</b> Αναμονές για τη σύνδεση του δαπέδου με τα τοιχία σε ημιτελές καταφύγιο του οχυρού Ρούπελ .....	93
<b>Εικόνα 6.28</b> Ημιτελής στοά στο οχυρό Ρούπελ .....	94
<b>Εικόνα 6.29</b> Διατομές στοών ανάλογα με το έδαφος .....	95
<b>Εικόνα 6.30</b> Καταφύγιο ανάπαυσης οπλιτών.....	96
<b>Εικόνα 6.31</b> Απότομη σκάλα από οπλισμένο σκυρόδεμα που οδηγεί σε παρατηρητήριο .....	97
<b>Εικόνα 6.32</b> Ελικοειδής μεταλλική σκάλα σε φρεάτιο που οδηγεί σε παρατηρητήριο.....	98
<b>Εικόνα 6.33</b> Σύστημα προσανατολισμού στις υπόγειες στοές.....	98
<b>Εικόνα 6.34</b> Απόληξη εξαερισμού στην επιφάνεια του εδάφους.....	99
<b>Εικόνα 6.35</b> Φίλτρα καθαρισμού του αέρα.....	100
<b>Εικόνα 6.36</b> Αντλιοστάσιο στο οχυρό του Εχίνου .....	101
<b>Εικόνα 6.37</b> Αεροφωτογραφία με την τοποθεσία των 123 επιφανειακών έργων του οχυρού Ρούπελ που ανατινάχθηκαν από τις βουλγαρικές δυνάμεις κατοχής.....	103
<b>Εικόνα 6.38</b> Είσοδος κεντρικής στοάς του οχυρού Ρούπελ.....	105
<b>Εικόνα 6.39</b> Μακέτα του οχυρού Ρούπελ, που βρίσκεται στο Μουσείο του οχυρού .....	107
<b>Εικόνα 6.40</b> Αεροφωτογραφία στην οποία είναι αποτυπωμένη η επισκέψιμη στοά του οχυρού Ρούπελ .....	108
<b>Εικόνα 6.41</b> Θέση οχυρού Λίσσε .....	109
<b>Εικόνα 6.42</b> Καταφύγιο του συγκροτήματος «Χελώνη» που λειτουργεί ως μουσειακός χώρος .....	112



## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

<b>Πίνακας 2.1</b> Τυπικά στοιχεία των όπλων σχεδιασμού για την εκτίμηση απειλής.....	24
<b>Πίνακας 4.1</b> Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών τύπων οχυρωματικών έργων. ...	47
<b>Πίνακας 6.1</b> Πάχη δομικών στοιχείων ανάλογα με το επίπεδο αντίστασης στα όπλα σχεδιασμού.....	68
<b>Πίνακας 6.2</b> Προστατευτικά εδαφικά πάχη υπόγειων οχυρωματικών έργων σύμφωνα με τον τύπο εδάφους και το διαμέτρημα του βλήματος.....	69

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Υπέργειο οχυρωματικό έργο .....	19
Σχήμα 2.2 Υπόγειο οχυρωματικό έργο (bunker).....	20
Σχήμα 2.3 Οχυρωματικό έργο με τεχνική διάνοιξης σηράγγων .....	20
Σχήμα 2.4 Πλάκα προανατίναξης και επίχωση σε πλήρως προστατευμένο έργο .....	23
Σχήμα 2.5. Σχήματα κατασκευών που αυξάνουν την ισχύ του ωστικού κύματος.....	31
Σχήμα 2.6. Σχήματα κατασκευών που μειώνουν την ισχύ του ωστικού κύματος .....	31
Σχήμα 3.1 Πιέσεις ωστικού κύματος, σε διάφορες αποστάσεις από την κατασκευή .....	34
Σχήμα 3.2 Μορφή ωστικού κύματος επιφανειακής έκρηξης κοντά σε κατασκευή.....	35
Σχήμα 3.3 Θέσεις πυροδότησης βλήματος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.....	36
Σχήμα 3.4 Πιθανές πορείες βλήματος μετά την πρόσκρουση .....	38
Σχήμα 3.5 Πλάκα προανατίναξης πάνω σε εδαφική επίχωση .....	43
Σχήμα 3.6 Στρώσεις φυσικού ογκόλιθου πάνω σε εδαφική επίχωση.....	43
Σχήμα 4.1 Οχυρωματικό έργο Τύπου I.....	46
Σχήμα 4.2 Οχυρωματικό έργο Τύπου II .....	46
Σχήμα 4.3 Οχυρωματικό έργο Τύπου III .....	47
Σχήμα 4.4 Κατασκευή πλάκας προανατίναξης με πτερύγια στα άκρα .....	50
Σχήμα 4.5 Κάτοψη οχυρωματικού έργου τύπου III .....	51
Σχήμα 6.1 Σκέπαστρο κάλυψης εργοταξίου .....	66
Σχήμα 6.2 Τυπική διατομή επιφανειακού έργου της Γραμμής Μεταξά.....	72
Σχήμα 6.3 Ενίσχυση θεμελίωσης επιφανειακής κατασκευής .....	75
Σχήμα 6.4 Σχήμα από το αντίστοιχο νομογράφημα μεταβολής των παχών σκυροδέματος της επικάλυψης συναρτήσει του πάχους του υπερκείμενου εδάφους.....	76
Σχήμα 6.5 Χαρτογράφηση οχυρού Ρούπελ.....	104
Σχήμα 6.6 Κάτοψη του Σταθμού Διοικήσεως του οχυρού Ρούπελ.....	105
Σχήμα 6.7 Σχεδιάγραμμα υπόγειων συγκροτημάτων οχυρού Λίσσε .....	110
Σχήμα 6.8 Σχεδιάγραμμα των χώρων της «Χελώνης» του οχυρού Λίσσε με τα αντίστοιχα υπομνήματα.....	111

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	13
1.1 Γενικά.....	13
1.2 Δομή.....	14
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ .....	16
2.1 Βασικές αρχές σχεδιασμού.....	17
2.2 Βασικοί τύποι οχυρωματικών έργων .....	18
2.3 Μορφές βλάβης οχυρωματικών έργων .....	22
2.4 Όπλο σχεδιασμού.....	24
2.5 Καθορισμός απαιτούμενου βαθμού προστασίας.....	26
2.6 Επιλογή τοποθεσίας και χωροθέτηση του έργου.....	27
2.6.1 Γεωλογία περιοχής .....	28
2.7 Διαρρύθμιση εσωτερικών χώρων .....	30
3. ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ .....	33
3.1 Ωστικό κύμα από εκρήξεις στον αέρα .....	33
3.2 Εκρήξεις σε εσωτερικό χώρο .....	35
3.3 Εδαφική δόνηση και κρατήσεις .....	35
3.4 Διείσδυση .....	38
3.4.1 Διείσδυση σε σκυρόδεμα.....	40
3.4.2 Διείσδυση σε έδαφος και βράχο .....	41
3.4.3 Μέτρα προστασίας έναντι διείσδυσης .....	42
3.5 Θραύσματα.....	43
3.6 Επιθυμητά επίπεδα βλάβης και κριτήρια σχεδιασμού.....	44
4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ.....	46
4.1 Κριτήρια επιλογής του κατάλληλου τύπου .....	48
4.2 Οχυρωματικά έργα τύπου Ι .....	49
4.3 Οχυρωματικά έργα τύπου ΙΙ.....	49
4.4 Οχυρωματικά έργα τύπου ΙΙΙ.....	50
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΝΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ .....	52
5.1 Σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ).....	52
5.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	54
5.3 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής .....	54
5.4 Εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης σε στρατιωτικά έργα .....	56
6. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ΟΧΥΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΞΑ (1936-1941).....	58

6.1 Γενικά.....	58
6.2 Τοπογραφία περιοχής.....	62
6.3 Σχεδιασμός .....	65
6.3.1 Όπλο σχεδιασμού και διαστασιολόγηση .....	68
6.3.2 Οπλισμένο Σκυρόδεμα .....	71
6.4 Τρόπος κατασκευής .....	75
6.4.1 Επιφανειακές μόνιμες κατασκευές .....	75
6.4.2 Υπόγειες κατασκευές .....	91
6.5 Οχυρό Ρούπελ.....	103
6.6 Οχυρό Λίσσε .....	110
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	119

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο «Αρχές Σχεδιασμού Οχυρωματικών Έργων. Γεωτεχνικές και Δομοστατικές Παράμετροι Σχεδιασμού» εκπονείται στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Διαχείριση Τεχνικών Έργων» και αποσκοπεί στη διερεύνηση και εμβάθυνση των αρχών σχεδιασμού των στρατιωτικών οχυρωματικών έργων. Το αντικείμενό της δεν είναι εκτενώς διαθέσιμο στην βιβλιογραφία, καθώς η κατασκευή των οχυρωματικών έργων είναι αποκλειστική ευθύνη των ενόπλων δυνάμεων και οι πληροφορίες κατασκευής τους στις περισσότερες περιπτώσεις είναι απόρρητες.

Ωστόσο, αναζητήθηκε και συγκεντρώθηκε, μέσω κυρίως της βιβλιογραφίας του Όπλου Υποστήριξης Μηχανικού του Ελληνικού Στρατού, το υφιστάμενο κανονιστικό πλαίσιο που διέπει το σχεδιασμό και την κατασκευή των οχυρωματικών έργων και αναλύθηκαν τόσο οι γεωτεχνικές όσο και οι δομοστατικές παράμετροι διαστασιολόγησής τους. Ο σχεδιασμός τους γίνεται έναντι των όπλων σχεδιασμού, έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο αστοχίας, αναλόγως της λειτουργικής και επιχειρησιακής σημασίας του κάθε έργου. Το εν λόγω στρατιωτικό κανονιστικό πλαίσιο, έχει εκπονηθεί σε συνεργασία με το ΕΜΠ (Μπουκοβάλας κ.α., 2008), και έχει βασιστεί, σε ένα πολύ μεγάλο τμήμα του, σε αντίστοιχους κανονισμούς των αμερικανικών ενόπλων δυνάμεων.

Εκτός από τη βιβλιογραφία που αναζητήθηκε στο Όπλο Υποστήριξης Μηχανικού, πραγματοποιήθηκε έρευνα τόσο στη διεθνή όσο και στην ελληνική βιβλιογραφία, η οποία σχετίζεται με το σχεδιασμό των οχυρωματικών έργων, καθώς και με την ενίσχυση των υφιστάμενων. Εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν οι παράμετροι σχεδιασμού και οι κατασκευαστικές μέθοδοι των στρατιωτικών έργων. Αναζητήθηκε επίσης και αναλύθηκε η εφαρμογή νέων υλικών και τεχνολογίας στα οχυρωματικά έργα, ενώ πραγματοποιήθηκε και μια σύγκριση των παραμέτρων σχεδιασμού μεταξύ των πολιτικών και των στρατιωτικών έργων.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε συλλογή και επεξεργασία αρχειακού υλικού από την Διεύθυνση Ιστορίας Στρατού (Δ.Ι.Σ.), καθώς και επιτόπια αυτοψία σε επισκέψιμα οχυρωματικά έργα, όπως είναι το οχυρό Ρούπελ στις Σέρρες και το οχυρό Λίσσε στο Κάτω Νευροκόπι, προκειμένου να αποτυπωθούν φωτογραφικά, να συλλεχθούν και να μελετηθούν

κατασκευαστικές πληροφορίες. Η πρόσβαση σε σύγχρονα οχυρωματικά έργα, τα οποία είναι επιχειρησιακά ενεργά και υψηλής αμυντικής σημασίας δεν επετεύχθη, επομένως επιλέχθηκαν ιστορικά έργα οχύρωσης για τα οποία υπήρχε αρκετή βιβλιογραφία στο διαδίκτυο. Ακολούθησε λεπτομερής καταγραφή των παραμέτρων σχεδιασμού τους και των μεθόδων κατασκευής τους, οι οποίες συγκρίθηκαν και παραλληλίστηκαν με τις σύγχρονες.

## 1.2 Δομή

Πέραν του παρόντος κεφαλαίου που αποτελεί την εισαγωγή της ΔΕ, στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού των οχυρωματικών έργων. Γίνεται διαχωρισμός των έργων ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και τον επιθυμητό βαθμό ασφαλείας και εξετάζονται οι μορφές καταπόνησης των κατασκευών, από τις οποίες καθορίζεται ο απαιτούμενος βαθμός προστασίας τους. Επίσης, αναλύονται τα όπλα σχεδιασμού, βάσει των οποίων γίνεται η διαστασιολόγησή τους και εξετάζεται κατά πόσο η γεωλογία μιας περιοχής επηρεάζει την επιλογή της τοποθεσίας για κατασκευή ή όχι ενός έργου οχύρωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο εστιάζουμε στους βασικότερους τρόπους προσβολής των οχυρώσεων από τα όπλα σχεδιασμού, οι οποίοι είναι: το ωστικό κύμα από εκρήξεις είτε στον αέρα, είτε σε εσωτερικό χώρο του έργου, η εδαφική δόνηση από έκρηξη στον αέρα ή στο έδαφος και η διείδυση ενός βλήματος ή των θραυσμάτων που αυτό προκαλεί σε δομικό στοιχείο του έργου ή στο έδαφος. Εξετάζεται επίσης, πώς τα υλικά κατασκευής και συνολικά οι κατασκευές επηρεάζονται σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια κατάταξη των οχυρωματικών έργων ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και καθορίζονται τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου τύπου, προκειμένου να προσδιοριστούν όλες οι λεπτομέρειες μόρφωσης των έργων οχύρωσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται καταγραφή των νέων υλικών και μεθόδων, οι οποίες τα τελευταία χρόνια βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή οχυρωματικών έργων, όπως είναι η εφαρμογή σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών σε δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, η χρησιμοποίηση ινοπλισμένων σκυροδεμάτων συμβατικής ή υπερ-υψηλής αντοχής, καθώς και η εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή κυρίως οχυρωματικών έργων εκστρατείας στο πεδίο.

Στο έκτο κεφάλαιο εξετάζεται η περίπτωση των οχυρών της Γραμμής Μεταξά, ενός τιτάνιου για την εποχή του κατασκευαστικό έργο που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για τις

αμυντικές ανάγκες της χώρας έναντι μιας αιφνιδιαστικής επίθεσης των Βουλγάρων. Εξετάζεται η κατασκευή των υπόγειων συγκροτημάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα με τα χιλιάδες μέτρα υπόγειων διαδρόμων συγκοινωνίας και καταφυγίων, καθώς και των εκατοντάδων επιφανειακών έργων και αναλύονται οι αντίστοιχες με τις σημερινές παράμετροι σχεδιασμού και κατασκευής. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται καταγραφή των τελικών συμπερασμάτων.

## 2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Η οχύρωση του εδάφους για στρατιωτικούς σκοπούς είναι μια τεχνική της οποίας ο χαρακτήρας μέσα στο πέρασμα του χρόνου άλλαξε. Η πρόοδος της στρατιωτικής τεχνολογίας συμπαρέσυρε σε αλλαγή και τη φύση των πολεμικών διαδικασιών, με αποτέλεσμα να αναζητούνται συνεχώς νέες πιο εξελιγμένες οχυρωματικές τεχνικές. Η καταστρεπτική δύναμη των σύγχρονων οπλικών συστημάτων με την ταυτόχρονη ανάπτυξη της πυρηνικής ισχύος, ανέδειξε την τρωτότητα των οχυρώσεων και επέβαλε την ανάγκη κατασκευής σύγχρονων οχυρωματικών έργων και την ενίσχυση των ήδη υφιστάμενων.

Το βασικότερο μέλημα των επικεφαλής στρατιωτικών ηγετών κατά τη διάρκεια των στρατιωτικών επιχειρήσεων είναι η επιβίωση του προσωπικού, η οποία εξασφαλίζεται από τα μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται ανάλογα με την μορφή των επιχειρήσεων που καλούνται να διεξάγουν. Ακολουθεί η προστασία του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων. Τα μέτρα ασφαλείας που εγγυώνται την επιβίωση του προσωπικού, αποτελούν την Αμυντική Οργάνωση – Οχύρωση, η οποία περιλαμβάνει το σύνολο των εργασιών οργάνωσης του εδάφους και κατασκευής οχυρωματικών έργων στις αμυντικές τοποθεσίες (Δόγμα Οργάνωσης – Οχύρωσης Σ.Ξ., 2007).

*Οργάνωση εδάφους* είναι η βελτίωση μιας αμυντικής τοποθεσίας με την ενίσχυση της φυσικής ισχύος του εδάφους. Βασικό κανόνα κατά τις αμυντικές επιχειρήσεις, αποτελεί η κατάλληλη εκλογή και χρησιμοποίηση του εδάφους με εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών του. Η οργάνωση αποσκοπεί στην αύξηση της αποτελεσματικότητας των πυρών του αμυνόμενου, καθώς και στη διευκόλυνση των κινήσεών του (Δόγμα Οργάνωσης – Οχύρωσης Σ.Ξ., 2007).

*Οχύρωση* είναι το σύνολο των αμυντικών έργων που κατασκευάζονται σύμφωνα με τις αρχές και τους κανόνες της οχυρωτικής τέχνης, για να αυξήσουν την αμυντική ισχύ μιας τοποθεσίας και να μειώσουν την αποτελεσματικότητα των πυρών του επιτιθέμενου. Η οχύρωση διακρίνεται ανάλογα με το βαθμό οργάνωσης του εδάφους σε μόνιμη, ημιμόνιμη και πρόχειρη. Όσο πιο πολύπλοκα και σύνθετα είναι τα οχυρωματικά έργα και διαθέτουν υψηλή επιβιωσιμότητα προσωπικού, τόσο πιο "ισχυρές τοποθεσίες" θεωρούνται (Γκιρμπάτσης, 2024).

Η αμυντική οχύρωση πρέπει να είναι προσαρμοσμένη όχι μόνο στις ήδη γνωστές δυνατότητες των πιθανών αντιπάλων, αλλά να προβλέπει και την αντιμετώπιση επιπλέον δυνατοτήτων τις οποίες προσφέρει η σύγχρονη τεχνολογία, όπως είναι η χρησιμοποίηση ισχυρών και μεγάλης ακρίβειας οπλικών και πυραυλικών συστημάτων, η χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών



καθώς και η εφαρμογή βιολογικών και χημικών όπλων. Επομένως, τα οχυρωματικά έργα δοκιμάζονται σοβαρά από την καταστρεπτική ισχύ των σύγχρονων όπλων και πυρομαχικών, τα οποία συνεχώς βελτιώνονται. Ωστόσο, η γενικότερη εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών και των μεθόδων κατασκευής δίνει τη δυνατότητα βελτίωσης της αντοχής τόσο των νέων όσο και των υφιστάμενων έργων οχύρωσης.

Αξίζει επίσης να επισημανθεί η αναγκαιότητα για μελέτες τεχνικογεωλογικών συνθηκών στο πεδίο στα πλαίσια σχεδιασμού και εκτέλεσης στρατιωτικών έργων, καθώς και ο βαθμός στον οποίο έχει συμβάλει η τεχνική γεωλογία προς αυτόν τον σκοπό, ιδιαίτερα μετά το τέλος του Α' Παγκοσμίου Πολέμου. Η εφαρμογή της σε στρατιωτικά επιχειρησιακά θέματα συναντάται στην ερμηνεία χαρτών, κυρίως τοπογραφικών και γεωλογικών, δίνοντας πληροφορίες για τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή επιχειρησιακού ενδιαφέροντος, στην ερμηνεία αεροφωτογραφιών με στοιχεία που συμπληρώνουν τις παραπάνω πληροφορίες και στην παροχή τεχνικής υποστήριξης στο πεδίο. Η συμβολή του γεωλόγου στο πεδίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς έτσι επιτυγχάνεται πιο ακριβής εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων και ερμηνεία των γεωλογικών συνθηκών μιας περιοχής στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί ένα στρατιωτικό έργο (Κούκης, 1985).

## **2.1 Βασικές αρχές σχεδιασμού**

Ο σχεδιασμός των νέων οχυρωματικών έργων, καθώς και των έργων ενίσχυσης των υφιστάμενων οχυρώσεων έναντι εχθρικής προσβολής, απαιτεί συνδυασμό πολλών γεωτεχνικών, δομοστατικών και επιχειρησιακών παραμέτρων. Τα δεδομένα που θα πρέπει να εξετάζονται κατά τον σχεδιασμό ενός οχυρωματικού έργου, αποσκοπώντας τόσο στην προστασία του προσωπικού, όσο και του εξοπλισμού, αφορούν στην πλήρη περιγραφή της κατασκευής και του επιχειρησιακού ρόλου της, στην αποτίμηση του κόστους και στη συμπεριφορά που καλείται να αναπτύξει σε ένα ενδεχόμενο πλήγμα. Οι πέντε κύριες αρχές, οι οποίες καθορίζουν τον σχεδιασμό ενός έργου οχύρωσης είναι οι εξής (Μπουκοβάλας κ.α., 2008):

1. Καθορισμός του επιχειρησιακού ρόλου του έργου και του απαιτούμενου βαθμού προστασίας, σε συνάρτηση με τον βαθμό σπουδαιότητάς του.
2. Καθορισμός του όπλου σχεδιασμού και της μορφής του αναμενόμενου πλήγματος, σε συνάρτηση με το βαθμό σπουδαιότητας της κατασκευής.
3. Επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας για την κατασκευή του έργου.

4. Ορθή διαρρύθμιση των εσωτερικών του χώρων.
5. Λήψη κατάλληλων μέτρων για την απόκρυψη της κατασκευής.

## 2.2 Βασικοί τύποι οχυρωματικών έργων

Τα οχυρωματικά έργα περιλαμβάνουν τόσο υπέργειες όσο και υπόγειες κατασκευές, ανάλογα με τον βαθμό προστασίας που πρέπει να επιτευχθεί, ο οποίος εξαρτάται άμεσα από τη σπουδαιότητα της αποστολής του εκάστοτε έργου. Οι υπόγειες κατασκευές συναντώνται πολύ συχνά στα στρατιωτικά έργα, καθώς παρέχουν υψηλό βαθμό προστασίας και είναι δύσκολο να προκληθεί άμεσο πλήγμα από κάποιο όπλο. Επιπλέον, η υπογειοποίηση των κατασκευών προσφέρει υψηλή κάλυψη, έτσι ώστε η κατασκευή να είναι πρακτικά μη ανιχνεύσιμη τόσο από τον αέρα όσο και από το έδαφος, ιδιαίτερα για έργα που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Η κατάταξη των έργων οχύρωσης γίνεται σύμφωνα με την απειλή που δέχονται και είναι απαραίτητη για τον καθορισμό του επιθυμητού επιπέδου ασφαλείας. Τα έργα διακρίνονται σε (Δόγμα Οργάνωσης – Οχύρωσης Σ.Ξ., 2007):

- *Πλήρως προστατευμένα*, είναι τα έργα τα οποία σχεδιάζονται έναντι άμεσου πλήγματος από διατρητικά όπλα.
- *Ημιπροστατευμένα*, είναι τα έργα τα οποία σχεδιάζονται για πυροδότηση ενός όπλου σε καθορισμένη απόσταση από την κατασκευή.
- *Μερικώς προστατευμένα*, είναι τα έργα τα οποία σχεδιάζονται κυρίως για την προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού έναντι έκρηξης, λόγω ωστικού κύματος και θραυσμάτων.

Επιπλέον, ανάλογα με την αξία τους ως κατασκευές, διακρίνονται σε:

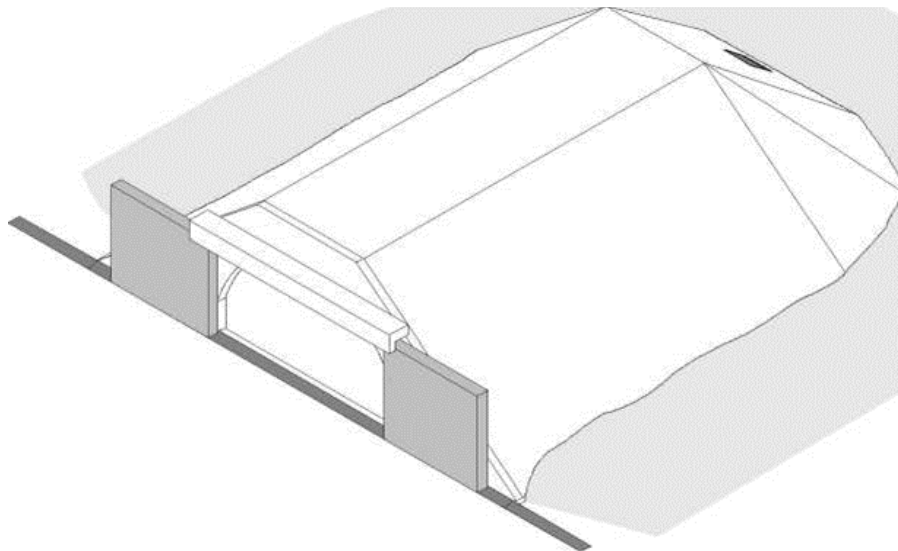
- *Μόνιμα έργα οχύρωσης*, είναι τα έργα που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν για μεγάλη χρονική περίοδο και στα οποία επιδιώκεται μεγαλύτερη προστασία του προσωπικού και των υλικών συγκριτικά με τα ημιμόνιμα έργα.
- *Έργα εκστρατείας*, είναι τα έργα οργάνωσης εδάφους, τα οποία αποτελούν πρόχειρες ή ημιμόνιμες κατασκευές, που κατασκευάζονται στην αρχή των πολεμικών επιχειρήσεων και διακρίνονται σε ημιμόνιμα και πρόχειρα έργα οχύρωσης (εκστρατείας).

Και τέλος, ως προς τον επιδιωκόμενο σκοπό, διακρίνονται σε:

- *Προστατευτικά έργα*, είναι τα έργα του εδάφους, όπως πολυβολεία, πυροβολεία, ορύγματα, σκέπαστρα κλπ., με τα οποία επιδιώκεται η προστασία του προσωπικού και των υλικών από τα εχθρικά πυρά και διακρίνονται επί μέρους σε ενεργητικά και παθητικά. Τα ενεργητικά έχουν επιχειρησιακή δράση και φέρουν ένα ή περισσότερα όπλα, επομένως πρέπει να εξασφαλίζουν εκτός από την επιβιωσιμότητα του προσωπικού και το μέγιστο βεληνεκές του όπλου, ενώ τα παθητικά, εξασφαλίζουν την επιβιωσιμότητα του προσωπικού και των υλικών, χωρίς να έχουν επιχειρησιακή δράση.
- *Κωλύματα*, είναι τα έργα που αποτελούν σύστημα εμποδίων τεχνητών ή φυσικών και σκοπό έχουν να δυσκολέψουν και να παρεμποδίσουν τις κινήσεις του εχθρού.

Ο κύριος του έργου είναι αυτός που αποφασίζει για την κατηγορία κατάταξης του έργου, λαμβάνοντας υπόψη τόσο στρατηγικά όσο και οικονομοτεχνικά κριτήρια. Ο παραπάνω διαχωρισμός καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη μορφή του δομήματος, δηλαδή αν πρόκειται για (TM5-855-1, 1997):

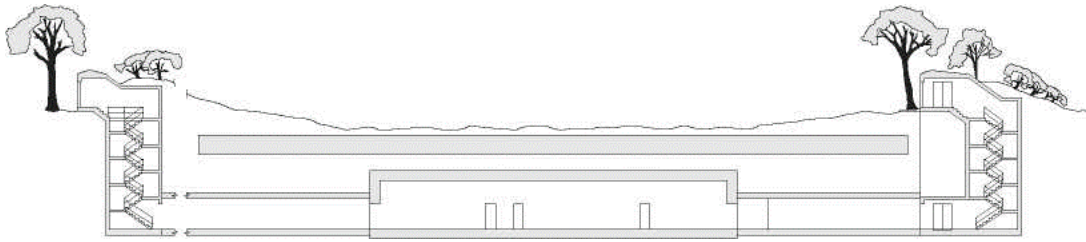
- *Υπέργεια έργα* (Σχήμα 2.1). Αφορά κυρίως ημιπροστατευμένα και μερικώς προστατευμένα έργα.



**Σχήμα 2.1** Υπέργειο οχυρωματικό έργο (Πηγή: TM5-855-1, 1997)

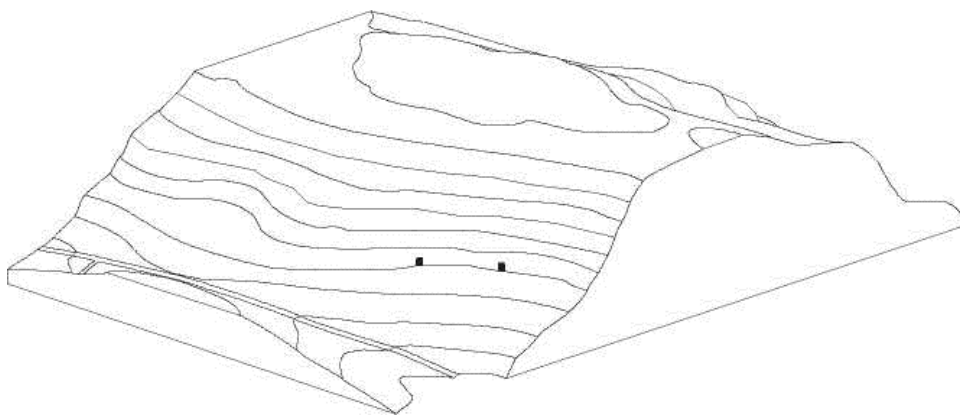
- *Υπόγεια έργα*, που κατασκευάζονται με μέθοδο cut-and-cover (Σχήμα 2.2). Αφορά ημιπροστατευμένα και πλήρως προστατευμένα έργα. Τα υπόγεια οχυρωματικά έργα

περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις με εξαιρετικά κρίσιμες αποστολές, ενώ δεν απειλούνται από κοινώς χρησιμοποιούμενα όπλα.



**Σχήμα 2.2** Υπόγειο οχυρωματικό έργο (bunker) (Πηγή: TM5-855-1, 1997)

- Έργα που κατασκευάζονται με τεχνικές διάνοιξης σηράγγων (Σχήμα 2.3). Αφορά τα πλήρως προστατευμένα έργα. Τα έργα που κατασκευάζονται με αυτές τις τεχνικές απαιτούν κατάλληλο τοπογραφικό ανάγλυφο με τέτοια ποιότητα βράχου, ώστε να μην χρειάζονται απαιτητικές εργασίες υποστήριξης των ανοιγμάτων.



**Σχήμα 2.3** Οχυρωματικό έργο με τεχνική διάνοιξης σηράγγων(Πηγή: TM5-855-1, 1997)

Στην Εικόνα 2.4 απεικονίζεται ένα υπέργειο στρατιωτικό έργο, το οποίο χρησιμοποιείται ως αποθήκη πυρομαχικών. Η κατασκευή επικαλύφθηκε με γαιώδη υλικά με σκοπό να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός απόκρυψης και προστασίας. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται μία από τις εισόδους ενός υπόγειου στρατιωτικού έργου (bunker), το οποίο χρησιμοποιείται ως κέντρο επιχειρήσεων. Αναπτύσσεται σε δύο επίπεδα, από 65 έως 95 μέτρα βάθος και διαθέτει διαδρόμους συνολικού μήκους ενός χιλιομέτρου. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1999 και παραδόθηκε προς χρήση στα μέσα του 2004.



**Εικόνα 2.1** Υπέργειο οχυρωματικό έργο με χρήση αποθήκης πυρομαχικών (Πηγή: <https://www.kandiatechniki.gr>)



**Εικόνα 2.2** Είσοδος υπόγειου οχυρωματικού έργου (bunker) (Πηγή: <https://www.newsnowgr.com/>)

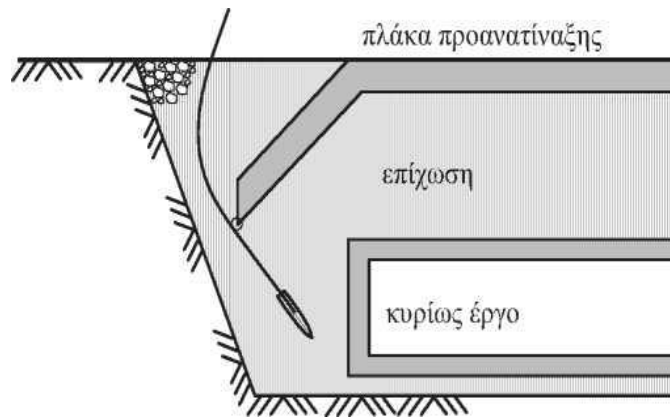
## 2.3 Μορφές βλάβης οχυρωματικών έργων

Η επιβίωση μιας στρατιωτικής κατασκευής εξαρτάται από τις απειλές που μπορεί να δεχτεί κατά τη διάρκεια της ζωής της. Εάν η απειλή αλλάξει ή αναπροσαρμοστεί, τότε η επιβίωση της κατασκευής αλλάζει και επανεξετάζεται ο σχεδιασμός της. Για κάθε απειλή, οι βλάβες που παρατηρούνται στα οχυρωματικά έργα, κατόπιν προσβολής τους από κάποιο συμβατικό όπλο, οφείλονται κυρίως (Twisdale et al, 1994):

- στη διείσδυση ενός βλήματος σε κάποιο δομικό στοιχείο του έργου.
- στο ωστικό κύμα αλλά και στα πιθανά θραύσματα, λόγω πυροδότησης κάποιου βλήματος στον αέρα.
- στην εδαφική δόνηση, λόγω πυροδότησης βλήματος εντός του εδάφους, σε κοντινή απόσταση από την κατασκευή.

Η προσβολή του έργου λόγω διείσδυσης βλημάτων και οι βλάβες που προκαλούνται σε αυτή την περίπτωση, λαμβάνονται υπόψη για τη μελέτη των πλήρως προστατευμένων οχυρωματικών έργων. Η πρόσκρουση ενός βλήματος σε μια κατασκευή μπορεί να έχει διάφορα αποτελέσματα που κυμαίνονται από καταστροφή του βλήματος, με ελάχιστη ζημιά σε κάποιο δομικό στοιχείο της κατασκευής, μέχρι ολοκληρωτική διάτρηση του δομικού στοιχείου. Επιπλέον, λόγω της διείσδυσης, μπορεί να σχηματιστεί κρατήρας στην επιφάνεια της πρόσκρουσης και να προκληθεί αποφλοίωση στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το υλικό κατασκευής είναι το σκυρόδεμα (TM5-855-1, 1997). Αν στο διατρητικό όπλο υπάρχει και εκρηκτικό, τότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το ωστικό κύμα που θα δημιουργηθεί λόγω της έκρηξης.

Επιπλέον προστασία στα πλήρως προστατευμένα έργα, εξασφαλίζει η κατασκευή μιας πλάκας σκυροδέματος σε κοντινή απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία ονομάζεται πλάκα προανατίναξης, καθώς και η τοποθέτηση της κατασκευής σε ικανοποιητικό βάθος και ιδανικά κάτω από επίχωση κατάλληλου πάχους (Σχήμα 2.4). Αυτά τα μέτρα προστασίας, αποσκοπούν στην εκτροπή της πορείας του βλήματος και κατ' επέκταση στην ενεργοποίηση του εκρηκτικού σε κάποια ασφαλή απόσταση από την κατασκευή. Αντίθετα, μέτρα προστασίας που έχουν στόχο την αύξηση του πάχους των δομικών στοιχείων της κατασκευής κρίνονται δυσχερή και αντισυμβατικά (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).



**Σχήμα 2.4** Πλάκα προανατίναξης και επίχωση σε πλήρως προστατευμένο έργο (Πηγή: Μπουκοβάλας κ.α., 2008)

Για τις άλλες δύο κατηγορίες βλαβών, που οφείλονται σε ωστικό κύμα λόγω έκρηξης στον αέρα και εδαφική δόνηση λόγω πυροδότησης βλήματος εντός του εδάφους, θα πρέπει οι κατασκευές να σχεδιάζονται έναντι μεγάλων κραδασμών, καθώς τα φορτία που παράγονται από αυτές τις απειλές είναι πολύ υψηλής έντασης. Σημαντικό ρόλο στο μέγεθος της πίεσης που δέχεται η κατασκευή παίζει το μέσο στο οποίο διαδίδεται το κύμα (αέρας ή έδαφος) πριν φτάσει στον στόχο του. Στα ομοιογενή μέσα, όπως είναι ο αέρας, είναι ευκολότερη η εκτίμηση αυτής της πίεσης. Αντίθετα, στο έδαφος, η δόνηση εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους. Έχει βρεθεί πειραματικά, ότι το πλάτος ενός ωστικού κύματος σε ένα έδαφος κορεσμένο είναι έως και είκοσι φορές μεγαλύτερο, σε σχέση με το πλάτος του κύματος στο ίδιο έδαφος υπό ακόρεστες συνθήκες (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).

Τα πλήγματα από θραύσματα λόγω πυροδότησης όπλου στον αέρα είναι μια κατηγορία βλάβης η οποία θα πρέπει να ελέγχεται κατά τον σχεδιασμό, κυρίως στα μερικώς προστατευμένα έργα, καθώς τα ημιπροστατευμένα και τα πλήρως προστατευμένα έργα θεωρούνται γενικά επαρκή σε βλάβες λόγω θραυσμάτων.

Οι δράσεις που προαναφέρθηκαν, λόγω διεύδυσης, ωστικού κύματος, εδαφικής δόνησης και θραυσμάτων, θα πρέπει να αναλαμβάνονται με ασφάλεια από την κατασκευή. Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα προστασίας της κατασκευής, πέρα από την αύξηση του πάχους των δομικών στοιχείων, προκειμένου να αυξηθεί η επιβιωσιμότητά της σε ένα ενδεχόμενο πλήγμα. Τέτοια μέτρα είναι η επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας και χωροθέτησης του έργου, ο σωστός σχεδιασμός των εσωτερικών του χώρων και η εφαρμογή μέτρων απόκρυψης της κατασκευής (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).

## 2.4 Όπλο σχεδιασμού

Ο όρος «όπλο σχεδιασμού» αντιστοιχεί σε ένα σύστημα εκτοξευτή και βλήματος, με το οποίο εκτιμάται ότι θα πληγεί ένα υπό μελέτη οχυρωματικό έργο. Αξίζει να αναφερθεί ότι από τα χαρακτηριστικά του εκτοξευτή εξαρτάται η ακρίβεια στόχευσης του όπλου, ενώ από τα χαρακτηριστικά του βλήματος οι καταστροφικές του δυνατότητες. Όσο πιο πολύπλοκη είναι η μέθοδος υπολογισμού του πλήγματος από κάποιο όπλο σχεδιασμού, τόσο αυξάνεται και το πλήθος των στοιχείων που πρέπει να είναι γνωστά για κάθε όπλο. Στην πράξη χρησιμοποιούνται λογισμικά με βιβλιοθήκες που περιέχουν χαρακτηριστικούς τύπους βλημάτων, οι οποίοι εφαρμόζονται στους υπολογισμούς. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται κάποια τυπικά στοιχεία του όπλο σχεδιασμού που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της απειλής που θα δεχθεί η κατασκευή (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).

**Πίνακας 2.1** Τυπικά στοιχεία των όπλων σχεδιασμού για την εκτίμηση απειλής

	ωστικό κύμα	διείσδυση	θραύσματα	εδafική δόνηση
αριθμός βλημάτων	✓	✓	✓	✓
μάζα γόμωσης	✓	-	✓	✓
μάζα περιβλήματος	✓	-	✓	-
συνολική μάζα βλήματος	-	✓	-	-
τύπος γόμωσης	✓		✓	✓
διαστάσεις βλήματος	-	✓	✓	-
ταχύτητα πρόσκρουσης	-	✓	-	-
γωνία πρόσπτωσης	-	✓	✓	-
απόσταση πυροδότησης	✓	-	✓	✓
βάθος πυροδότησης	-	-	-	✓

Τα όπλα που χρησιμοποιούνται σήμερα και θεωρούνται απειλή για τα οχυρωματικά έργα, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες (Σ.ΤΕ.Α.ΜΧ, 2008):



➤ Όπλα αέρος-επιφανείας

Πρόκειται για βλήματα τα οποία εκτοξεύονται από αεροσκάφη σε στόχους που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους ή της θάλασσας και περιλαμβάνουν:

- Βόμβες ελευθέρως ρίψεως. Πρόκειται για βόμβες, οι οποίες φέρουν εκρηκτικές κεφαλές, των οποίων η πυροδότηση επιφέρει τα επιθυμητά καταστροφικά αποτελέσματα. Ανάλογα με τη γόμωση της κεφαλής τους, διακρίνονται σε βόμβες με διατρητικές κεφαλές, οι οποίες διεισδύουν σε ενισχυμένους στόχους και πυροδοτούνται στο εσωτερικό τους και σε βόμβες με κεφαλές γενικής χρήσης, οι οποίες μπορούν να διεισδύσουν σε οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Τηλεκατευθυνόμενες βόμβες. Είναι βόμβες που διαθέτουν παρόμοιες ή ίδιες κεφαλές με τις βόμβες ελευθέρως ρίψεως, οι οποίες εκτοξεύονται με μεγαλύτερη ακρίβεια από μεγαλύτερη απόσταση.
- Ρουκέτες. Πρόκειται για βλήματα μικρού βεληνεκούς, τα οποία εκτοξεύονται από αεροσκάφη. Αυτές που προορίζονται να πλήξουν οχυρωματικό έργο συνήθως διαθέτουν κεφαλή με ισχυρό εκρηκτικό.
- Πύραυλοι. Πρόκειται για πυραύλους αέρος-επιφανείας, που χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μεγάλος βαθμός ακρίβειας.
- Αερομεταφερόμενα πυροβόλα όπλα. Περιλαμβάνονται όπλα με διαμετρήματα από 7.62mm έως 105mm.
- Πυρομαχικά διασποράς βομβιδίων. Πρόκειται για μεταλλικά δοχεία, τα οποία φέρουν βομβίδια που διαθέτουν ισχυρό εκρηκτικό και εκτοξεύονται από αεροσκάφη ή από κατευθυνόμενους πυραύλους. Χρησιμοποιούνται εναντίον στόχων στην επιφάνεια του εδάφους που είναι διατεταγμένοι σε σχηματισμούς, καθώς και εναντίον βιομηχανικών ή οικιστικών συγκροτημάτων.

➤ Όπλα επιφανείας-επιφανείας

Στα όπλα επιφανείας-επιφανείας ή αλλιώς εδάφους-εδάφους, περιλαμβάνονται όπλα και πυρομαχικά, που ποικίλουν από πιστόλια μέχρι πυραύλους. Τα όπλα εδάφους-εδάφους που αποτελούν απειλή για τα έργα οχύρωσης ταξινομούνται ως εξής:

- Πυροβόλα όπλα εδάφους (όπλα μικρού διαμετρήματος, οβιδοβόλα και όλμοι). Τα πυροβόλα μικρού διαμετρήματος (< 40mm), δεν είναι ικανά να απειλήσουν μια ενισχυμένη κατασκευή. Τα όπλα τα οποία αφορούν στο σχεδιασμό των οχυρωματικών έργων είναι εκείνα με διαμέτρημα μεγαλύτερο των 40mm, τα οποία φέρουν διατρητικά φυσίγγια.

- Όπλα τεθωρακισμένων αρμάτων. Τα βλήματα που εκτοξεύονται από τα σύγχρονα τεθωρακισμένα άρματα ταξινομούνται σε: βλήματα κινητικής ενέργειας, τα οποία θεωρούνται ως τα πιο αποτελεσματικά αντιαρματικά πυρομαχικά και στα βλήματα ισχυρού εκρηκτικού.
- Ρουκέτες/Πυραυλικά συστήματα. Στα εν λόγω οπλικά συστήματα περιλαμβάνονται όπλα και πύραυλοι, που μεταφέρουν κεφαλές με ισχυρό εκρηκτικό τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εναντίον ενισχυμένων κατασκευών.
- Όπλα Ναυτικού. Κατατάσσονται σε βλήματα διάτρησης θώρακα, τα οποία έχουν την ικανότητα να διεισδύουν σε πολύ καλά θωρακισμένες πλάκες, σε κοινά βλήματα και σε βλήματα υψηλής χωρητικότητας.

Ο κύριος του έργου είναι αυτός που καθορίζει ποιο ή ποια όπλα σχεδιασμού θα χρησιμοποιηθούν κατά τον σχεδιασμό ενός οχυρωματικού έργου. Η επιλογή των κατάλληλων όπλων σχεδιασμού, εξαρτάται από τον τύπο του έργου και τον βαθμό ασφαλείας που πρέπει να επιτευχθεί αναλόγως της σπουδαιότητας της κατασκευής και του επιχειρησιακού της ρόλου.

## **2.5 Καθορισμός απαιτούμενου βαθμού προστασίας**

Κρίσιμη παράμετρος του σχεδιασμού ενός οχυρωματικού έργου, είναι η εξασφάλιση της αδιάλειπτης λειτουργίας του, μετά από ένα ενδεχόμενο πλήγμα από κάποιο όπλο σχεδιασμού. Έτσι, στη φάση του σχεδιασμού, θα πρέπει να καθορίζονται πλήρως από τον κύριο του έργου οι κρίσιμες λειτουργίες του έργου και οι προϋποθέσεις που πρέπει να συντρέχουν ώστε αυτές να μην διακοπούν. Επομένως, θα πρέπει να καθορίζονται από τον κύριο του έργου τα εξής (Δόγμα Οργάνωσης – Οχύρωσης Σ.Ξ., 2007):

- Οι κρίσιμες λειτουργίες που συντελούνται εντός του έργου, των οποίων πρέπει να διασφαλιστεί η συνέχεια (π.χ. απρόσκοπτη συνέχιση επικοινωνιών)
- Το πλήθος του προσωπικού, του εξοπλισμού και των υλικών, καθώς και η χωροθέτησή τους εντός του έργου, ώστε να εκπληρώνονται οι κρίσιμες αυτές λειτουργίες.
- Τα ποιοτικά κριτήρια τα οποία θέτει η σωστή λειτουργία του έργου, σχετικά με το έμψυχο αλλά και με το υλικό δυναμικό, πχ το πλήθος του προσωπικού που επιβάλλεται να παραμείνει μάχιμο μετά από ενδεχόμενο πλήγμα.

Τα παραπάνω ποιοτικά κριτήρια θέτουν ορισμένους στόχους, οι οποίοι για να επιτευχθούν θα πρέπει να ποσοτικοποιηθούν κάποια κριτήρια επιβιωσιμότητας, ώστε να μην διακοπεί η

αποστολή της κατασκευής μετά το πλήγμα. Ειδικότερα (Δόγμα Οργάνωσης – Οχύρωσης Σ.Ξ., 2007):

- Προσωπικό. Καθορίζεται ο αριθμός του προσωπικού που χρειάζεται ώστε να μην διακοπεί η λειτουργία του έργου.
- Εξοπλισμός. Ειδικά για τον κρίσιμο εξοπλισμό, πρέπει να καθορίζεται το ανώτατο όριο της δόνησης που μπορεί να ανεχθεί, έτσι ώστε αν απαιτηθεί, να ληφθούν μέτρα αντικραδασμικής μόνωσης.
- Δομική αστοχία. Πρέπει να καθορίζεται, με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, ο ανεκτός βαθμός αστοχίας για τα δομικά στοιχεία του έργου.
- Κάλυψη κατασκευής. Η εφαρμογή μέτρων κάλυψης της κατασκευής στοχεύει στη μείωση της ακρίβειας του πλήγματος και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον αρχικό σχεδιασμό.

## **2.6 Επιλογή τοποθεσίας και χωροθέτηση του έργου**

Η μορφή και η διάταξη ενός οχυρωματικού έργου που πρόκειται να κατασκευαστεί σε μια περιοχή επηρεάζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της περιοχής αυτής. Όσο περισσότεροι περιορισμοί υπάρχουν σε αυτά τα χαρακτηριστικά, τόσο μειώνεται ο αριθμός των υποψήφιων τοποθεσιών κατασκευής του έργου. Όπως και στα συνήθη πολιτικά έργα, έτσι και στα στρατιωτικά οχυρωματικά, τα απαραίτητα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός έργου, αφορούν στην τοπογραφία της περιοχής, στις επικρατούσες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, καθώς και στη μέθοδο κατασκευής του έργου. Επιπλέον, στον σχεδιασμό των οχυρωματικών έργων, προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην ποιότητα των γεωλογικών και γεωτεχνικών στοιχείων, καθώς αυτά τα στοιχεία, αφενός καθορίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διάδοση του ωστικού κύματος και της εδαφικής δόνησης μετά από έκρηξη, αφετέρου συμβάλλουν στην κάλυψη και απόκρυψη της κατασκευής (Κούκης, 1985).

Η χωροθέτηση ενός οχυρωματικού έργου, η οποία θα μεγιστοποιήσει τις πιθανότητες επιβίωσής του, εξαρτάται από τις επιχειρησιακές απαιτήσεις του, το όπλο σχεδιασμού που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και από τα ιδιαίτερα φυσικά χαρακτηριστικά της υποψήφιας τοποθεσίας. Η εκμετάλλευση του τοπικού ανάγλυφου μειώνει σημαντικά την πιθανότητα προσβολής της κατασκευής, ενώ φυσικά εμπόδια όπως ποτάμια, δέντρα, ελώδεις περιοχές κτλ. μπορούν να αποτρέψουν την πρόσβαση στην κατασκευή, αλλά και να δυσκολέψουν τον εντοπισμό της.

Με τη σωστή χωροθέτηση των εγκαταστάσεων, κάθε κατασκευή θεωρείται ξεχωριστός στόχος. Ωστόσο, όταν οι κατασκευές τοποθετούνται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, συνήθως μειώνεται η επιχειρησιακή τους αποτελεσματικότητα. Επίσης, η κατασκευή πολλών οχυρωματικών έργων σε σειρά δεν προτείνεται, διότι έτσι είναι ευκολότερη η στόχευσή τους από τον αέρα. Αντιθέτως, ενδείκνυται η κλιμακωτή χωροθέτησή τους στο πεδίο, ώστε σε μια γραμμή μήκους 500 m να μην υπάρχουν περισσότερες από τρεις κατασκευές (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).

Κάποια από τα κριτήρια που τίθενται από τον κύριο του έργου και καθορίζουν τις μέγιστες αποστάσεις των κατασκευών είναι η πρόσβαση σε κρίσιμους πόρους απαραίτητους για τη συνέχιση της αποστολής της κατασκευής, οι αποστάσεις ασφαλείας από αποθήκες πυρομαχικών και η συνεργασία των μονάδων. Οι μεγάλες εγκαταστάσεις είναι συχνά διαμερισματοποιημένες, έτσι ώστε εάν ένα βλήμα εισχωρήσει στην κατασκευή, να περιοριστούν τα δυσμενή αποτελέσματα που θα προκαλέσει η διάδοση του φωστικού κύματος. Ως επί το πλείστον, τα σύγχρονα οχυρωματικά έργα αποτελούνται από ενισχυμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος με απλές γεωμετρίες (Twisdale et al, 1994).

### **2.6.1 Γεωλογία περιοχής**

Οι Bondesan & Ehlen (2022) ορίζουν ως στρατιωτική γεωεπιστήμη την εφαρμογή της γεωλογίας στις στρατιωτικές επιχειρήσεις. Η ανάγκη εφαρμογής της τεχνικής γεωλογίας στα στρατιωτικά έργα και γενικότερα στην ανάπτυξη των στρατιωτικών επιχειρήσεων, έγινε αντιληπτή μετά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο. Η στρατιωτική γεωλογία άρχισε να διδάσκεται στις στρατιωτικές σχολές, ενώ βρήκε ευρεία εφαρμογή κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο ιδιαίτερα στη Γερμανία. Έκτοτε το ακαδημαϊκό ενδιαφέρον αυξήθηκε σημαντικά με αποτέλεσμα να λάβουν χώρα αρκετά συνέδρια. Το 2013 ιδρύθηκε η Διεθνής Ένωση Στρατιωτικών Γεωεπιστημών, η οποία χορηγεί διεθνή συνέδρια στρατιωτικής γεωεπιστήμης σε ολόκληρο τον κόσμο.

Οι στρατιωτικοί γεωεπιστήμονες, κυρίως μηχανικοί ανάλογων ειδικοτήτων και γεωλόγοι, εφαρμόζουν την επιστήμη τους για να υποστηρίξουν στρατιωτικές δραστηριότητες και εν καιρώ ειρήνης. Παρέχουν ακριβή εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων, προκειμένου να γίνουν κατανοητοί οι περιορισμοί ενός επιχειρησιακού περιβάλλοντος, να προσδιορίσουν τις δυνατότητές του για επιθετικές ή αμυντικές ενέργειες και να εκμεταλλευτούν τους φυσικούς πόρους του. Η χωροθέτηση και η κατασκευή ενός οχυρωματικού έργου, η εξεύρεση ασφαλών

αποθεμάτων νερού, η εκσκαφή σιηράγγων και άλλων υπόγειων εγκαταστάσεων, η χωροθέτηση και κατασκευή δρόμων, γεφυρών και προσωρινών αεροδρομίων είναι μερικές από τις εργασίες που καθοδηγούνται από γεωλόγους, έχοντας παράλληλα στα χέρια τους σημαντικά εργαλεία όπως είναι οι τοπογραφικοί χάρτες, οι αεροφωτογραφίες, οι πληροφορίες για το κλίμα, τη βλάστηση και γενικότερα για το ανάγλυφο της επιφάνειας του εδάφους (Galgano & Rose, 2021).

Για τη θεμελίωση κάθε τεχνικού έργου είναι απαραίτητη η ανάλυση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του έργου, προκειμένου να εκτιμηθούν οι εδαφικές παράμετροι που επηρεάζουν την κατασκευή. Σήμερα, λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας των οπλικών συστημάτων, γίνεται επιτακτική η ανάγκη κατασκευής υπόγειων αμυντικών κατασκευών για μεγαλύτερη προστασία του προσωπικού και των εγκαταστάσεων. Για την κατασκευή αυτών των υπόγειων κατασκευών, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ορισμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υπερκείμενων σχηματισμών και του εδάφους θεμελίωσης, όπως για παράδειγμα αν πρόκειται για βραχώδες έδαφος τέτοια χαρακτηριστικά είναι ο τύπος και η δομή του βράχου που εκσκάπτεται, το πάχος της ζώνης αποσάθρωσής του, η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη και εφελκυσμό, η ελαστικότητα, η ευστάθεια οροφής και τοιχωμάτων, οι εδαφολογικές συνθήκες και το όριο φόρτισης. Αυτές οι παράμετροι της βραχώδους μάζας πρέπει να καθοριστούν σε τρεις διαστάσεις, προκειμένου να επιτρέπουν αποτελεσματική εκσκαφή, υποστύλωση, ενδεχόμενες τσιμεντενέσεις, κατάλληλο αερισμού και αποφυγή υγρασίας (Κούκης & Κυνηγαλάκη, 1983).

Η κατασκευή ενός οχυρωματικού έργου σε καλής ποιότητας βραχώδες υπόβαθρο, μειώνει κατά πολύ την πιθανότητα προσβολής του από τα πλάγια και από κάτω, με την προϋπόθεση ότι τα βλήματα και οι βόμβες που θα το πλήξουν μπορούν να διαγράφουν τέτοιες τροχιές. Επιπλέον, τα οχυρωματικά έργα που κατασκευάζονται με τη μορφή σήραγγας σε περιοχή καλής ποιότητας βραχώμαζας, προστατεύονται σε μεγάλο βαθμό από άμεσο πλήγμα.

Οι έρευνες υπεδάφους περιλαμβάνουν, επίσης, την αξιολόγηση των υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών για την τοποθέτηση υδρογεωτρήσεων και την κατασκευή γεφυρών, σιηράγγων και κτιρίων. Επισημαίνεται ότι ο ρυθμός απομείωσης της εδαφικής δόνησης σε εδάφη στιφρά, όπως σχιστόλιθος, ασβεστολιθικά ή πυριγενή πετρώματα, είναι πολύ χαμηλότερος συγκριτικά με ένα μαλακό έδαφος. Το πλάτος της εδαφικής δόνησης αυξάνεται σημαντικά στην περίπτωση κατασκευής ενός οχυρωματικού έργου σε κορεσμένο έδαφος κάτω

από τον υδροφόρο ορίζοντα. Γενικά, σε υψηλούς υδροφόρους ορίζοντες η ρευστοποίηση ενδεχομένως να είναι ένας σημαντικός παράγοντας αστοχίας (Κούκης & Κυνηγαλάκη, 1983).

Επομένως, στα πλαίσια αξιολόγησης μιας περιοχής, προκειμένου να εκτιμηθούν οι γεωλογικές συνθήκες για στρατιωτικούς σκοπούς, η βασική έρευνα θα πρέπει να περιλαμβάνει τα εξής (Κούκης, 1985):

- Το έδαφος, αναφορικά με τη σύστασή του και την κοκκομετρική του διαβάθμιση, την περατότητά του, τις μηχανικές του ιδιότητες, τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, τον βαθμό φυτοκάλυψης κ.λπ.
- Το κλίμα και η βλάστηση της περιοχής και γενικότερα η κατάσταση του εδάφους σε κάθε εποχή του έτους.
- Το οδικό δίκτυο και οι σιδηροδρομικές γραμμές (διαστάσεις, κλίσεις, κατάσταση στην οποία βρίσκονται κ.α.).
- Οι ποταμοί, οι χείμαρροι και οι κοιλάδες, η σύσταση του πυθμένα, τα πρανή, οι όχθες, το μήκος τους, η παροχή νερού κ.α.
- Το νερό που υπάρχει σε πηγές και λίμνες, η ποιότητά του, η δυνατότητα κατασκευής γεωτρήσεων και πιθανοί τρόποι εξεύρεσης και συγκέντρωσής του.

## **2.7 Διαρρύθμιση εσωτερικών χώρων**

Σημαντικό ρόλο στην ελαχιστοποίηση των απωλειών, τόσο σε προσωπικό όσο και σε υλικά και εγκαταστάσεις, από ενδεχόμενο πλήγμα, παίζει η σωστή επιλογή της διαρρύθμισης των εσωτερικών χώρων ενός οχυρωματικού έργου, η οποία βασίζεται στις εξής τρεις αρχές (Μπουκοβάλας κ.α., 2008):

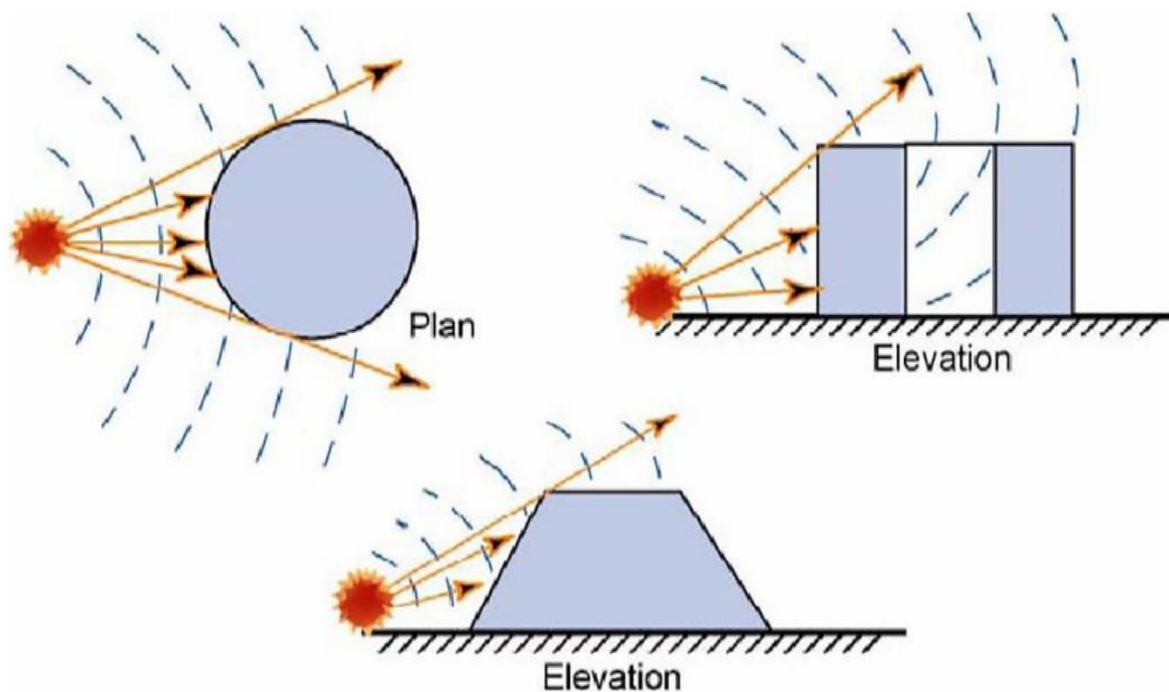
- Τις απαιτήσεις για την επιχειρησιακή αποστολή του οχυρωματικού έργου.
- Την προστασία των κρίσιμων λειτουργιών του έργου, προκειμένου να επιτευχθεί η αποστολή του.
- Την ελαχιστοποίηση των μη εκμεταλλεύσιμων χώρων, όπως είναι οι τουαλέτες, οι σκάλες κτλ., με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού χώρου.

Το σχήμα του κτιρίου είναι ικανό να συμβάλλει στη συνολική απόκριση της κατασκευής. Οι γωνίες και οι εσοχές είναι πιθανό να "παγιδεύσουν" το ωστικό κύμα μιας έκρηξης με δυσάρεστες συνέπειες για την κατασκευή. Για τον λόγο αυτό το σχήμα του περιγράμματος της κάτοψης θα πρέπει να είναι τετράγωνο ή παραλληλόγραμμο, προκειμένου να αποδυναμώνεται

η ισχύς του ωστικού κύματος. Εσοχές, όπως αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5, αυξάνουν την ισχύ του ωστικού κύματος λόγω ανακλάσεων. Αξίζει να αναφερθεί, ότι ήπιες κλίσεις δομικών στοιχείων και αμβλείες γωνίες στις ακμές μιας κατασκευής αμβλύνουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό την πίεση που ασκεί το ωστικό κύμα στην κατασκευή (Σχήμα 2.6) (Anas et al, 2022).



**Σχήμα 2.5.** Σχήματα κατασκευών που αυξάνουν την ισχύ του ωστικού κύματος (Πηγή: Anas et al, 2022)



**Σχήμα 2.6.** Σχήματα κατασκευών που μειώνουν την ισχύ του ωστικού κύματος (Πηγή: Anas et al, 2022)

Οι κρίσιμες λειτουργίες του έργου για την επίτευξη της αποστολής του, καλό θα ήταν να στεγάζονται στο χαμηλότερο επίπεδο, κοντά στο κέντρο της κάτοψης, διότι σε αυτήν περιοχή επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή προστασία. Λειτουργίες, οι οποίες είναι λιγότερο σημαντικές από τις κρίσιμες, μπορούν να στεγαστούν περιμετρικά από τις κρίσιμες. Ο ακριβός εξοπλισμός, εάν υπάρχει, θα πρέπει να τοποθετείται προς το εσωτερικό της κατασκευής και όχι κοντά στα εξωτερικά τοιχώματά της. Οι διάδρομοι, οι οποίοι αποτελούν μη εκμεταλλεύσιμο χώρο, πρέπει να διαθέτουν την ελάχιστη δυνατή επιφάνεια και να τοποθετούνται αν είναι δυνατόν στην περίμετρο της κάτοψης, παρέχοντας έτσι μια επιπλέον ζώνη προστασίας.

Επιπλέον, επιβάλλεται ο καταμερισμός των ενιαίων χώρων σε μικρότερα ανεξάρτητα διαμερίσματα, για λόγους πυροπροστασίας, αλλά και μείωσης της διάδοσης ωστικού κύματος από τον έναν χώρο στον άλλον, με την κατασκευή κατάλληλων τοιχωμάτων και χρησιμοποίηση αντiekρητικών θυρών στις εισόδους/εξόδους κάθε διαμερίσματος.

Στα εξωτερικά ανοίγματα της κατασκευής καταλήγουν και οι απολήξεις του εξαερισμού, του κλιματισμού, οι καμινάδες κτλ. Αυτές οι απολήξεις θεωρούνται ασθενείς ζώνες, διότι αποτελούν πιθανή δίοδο του ωστικού κύματος ή των θραυσμάτων μιας έκρηξης στο εσωτερικό της κατασκευής. Επομένως, θα πρέπει να κατασκευάζονται με τις ελάχιστες διαστάσεις τους, οι οποίες ικανοποιούν τις λειτουργικές απαιτήσεις του έργου (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).



### 3. ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

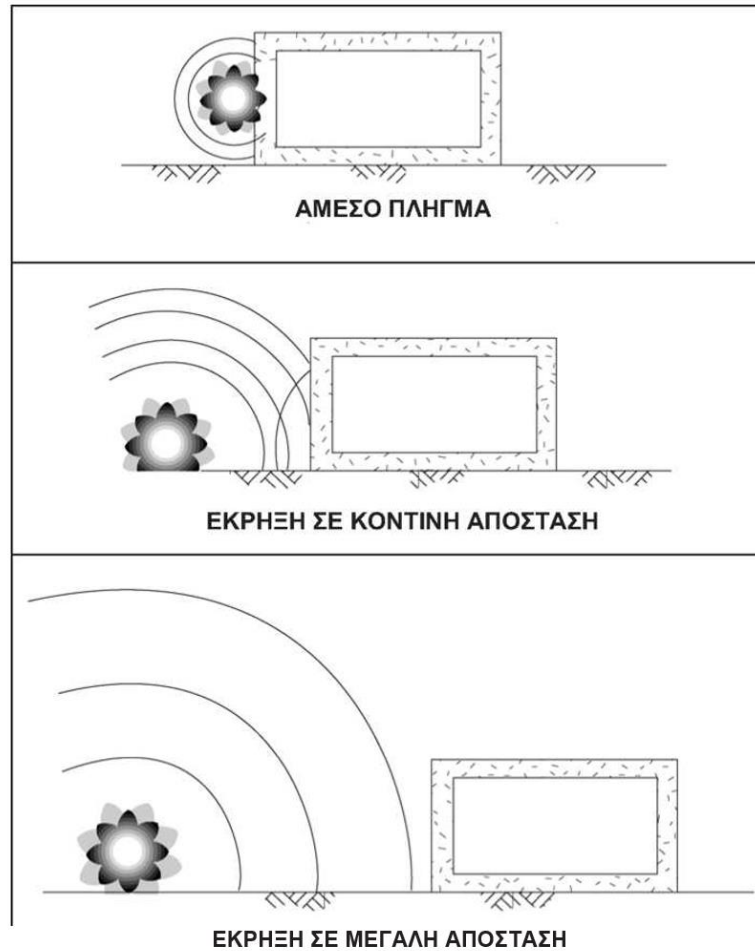
Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.3, οι βλάβες που αναμένεται να προκαλέσει ένα όπλο σχεδιασμού σε ένα οχυρωματικό έργο, οφείλονται κυρίως στη διείσδυση του βλήματος σε κάποιο δομικό στοιχείο της κατασκευής, στο ωστικό κύμα που δημιουργείται από μια έκρηξη στον αέρα, στην εδαφική δόνηση και στα θραύσματα λόγω πυροδότησης βλήματος στον αέρα ή στο έδαφος.

#### 3.1 Ωστικό κύμα από εκρήξεις στον αέρα

Το ωστικό κύμα λόγω πυροδότησης ενός βλήματος στον αέρα, σε κοντινή απόσταση από ένα οχυρωματικό έργο, αποτελεί μια πολύ σοβαρή απειλή, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό της κατασκευής. Ο βαθμός βλάβης σε μια κατασκευή από μια έκρηξη, έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να κυμανθεί από επισκευάσιμες ζημιές έως ολική κατάρρευση που μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ανθρώπινων ζωών (Anas et al., 2020). Οι στρατιωτικές κατασκευές σχεδιάζονται ώστε να είναι ανθεκτικές στις εκρήξεις και τα κύρια δομικά τους στοιχεία να επαρκούν σε τέτοια ακραία φορτία, με στόχο να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού που επιχειρεί στο έργο.

Για τον καθορισμό της απόκρισης μιας κατασκευής σε έκρηξη λαμβάνουν χώρα αρκετές δοκιμές πεδίου και αριθμητικές προσομοιώσεις για μια πιο αξιόπιστη ποσοτικοποίηση της απόκρισης των δομικών στοιχείων του έργου. Η δοκιμή έκρηξης είναι μια άμεση μέθοδος για τη μελέτη της συμπεριφοράς της κατασκευής, ωστόσο οι επιτόπιες δοκιμές είναι συχνά δύσκολο να πραγματοποιηθούν, όχι μόνο επειδή απαιτούν υψηλά κριτήρια ασφαλείας, αλλά και επειδή απαιτούν ακριβό και εξαιρετικά εξειδικευμένο εξοπλισμό. Με την πρόοδο της τεχνολογίας των υπολογιστών, έχουν αναπτυχθεί αρκετά εμπορικά πακέτα λογισμικού υψηλής πιστότητας που χρησιμοποιούνται ευρέως για την προσομοίωση της απόκρισης μιας κατασκευής σε έκρηξη (Anas et al, 2021).

Οι πιέσεις που δέχεται μια κατασκευή από μια έκρηξη εξαρτώνται από την απόσταση πυροδότησης σε σχέση με την κατασκευή. Για κοντινές στην κατασκευή εκρήξεις, το φορτίο του ωστικού κύματος είναι πιο ισχυρό, με δυσμενείς συνέπειες για τα δομικά στοιχεία της κατασκευής, ενώ εξασθενεί όσο αυξάνεται η απόσταση του σημείου πυροδότησης από το έργο (Σχήμα 3.1). Στην περίπτωση κοντινών εκρήξεων προκαλείται επιπλέον εδαφική δόνηση και πρόσκρουση θραυσμάτων στην κατασκευή, ενώ σε πιο μακρινές πυροδοτήσεις, η κατασκευή επηρεάζεται κυρίως από το ωστικό κύμα.



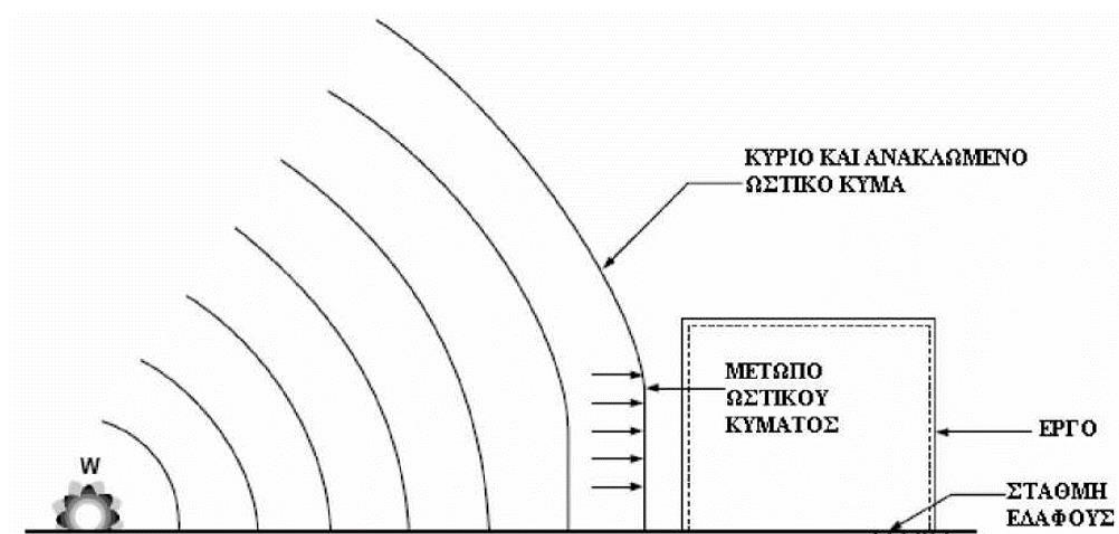
**Σχήμα 3.1** Πιέσεις ωστικού κύματος, σε διάφορες αποστάσεις από την κατασκευή (Πηγή: Μπουκοβάλας κ.α., 2008).

Η εκτίμηση των παραμέτρων, που πρέπει να ληφθούν υπόψη έναντι του ωστικού κύματος που προκαλεί μια έκρηξη, προϋποθέτουν τη γνώση των εξής στοιχείων (Μπουκοβάλας κ.α., 2008):

- Των διαστάσεων των δομικών στοιχείων της κατασκευής και γενικότερα της γεωμετρίας της.
- Της απόστασης του όπλου από την κατασκευή τη στιγμή της πυροδότησης.
- Του τύπου και της μάζας του χρησιμοποιούμενου εκρηκτικού, που φέρει το όπλο σχεδιασμού.

Για τον σχεδιασμό των οχυρωματικών έργων, λαμβάνεται υπόψη το ύψος του μετώπου του ωστικού κύματος σε σχέση με την κατασκευή. Ως εκ τούτου, όταν το ύψος του μετώπου είναι μεγαλύτερο από το ύψος της κατασκευής, θεωρούμε ότι η κατασκευή καταπονείται με

ομοιόμορφη πίεση σε όλο το ύψος της. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η επέκταση του μετώπου του ωστικού κύματος σε μια επιφανειακή έκρηξη (TM5-1300, 1990).



**Σχήμα 3.2** Μορφή ωστικού κύματος επιφανειακής έκρηξης κοντά σε κατασκευή (Πηγή: TM5-1300, 1990).

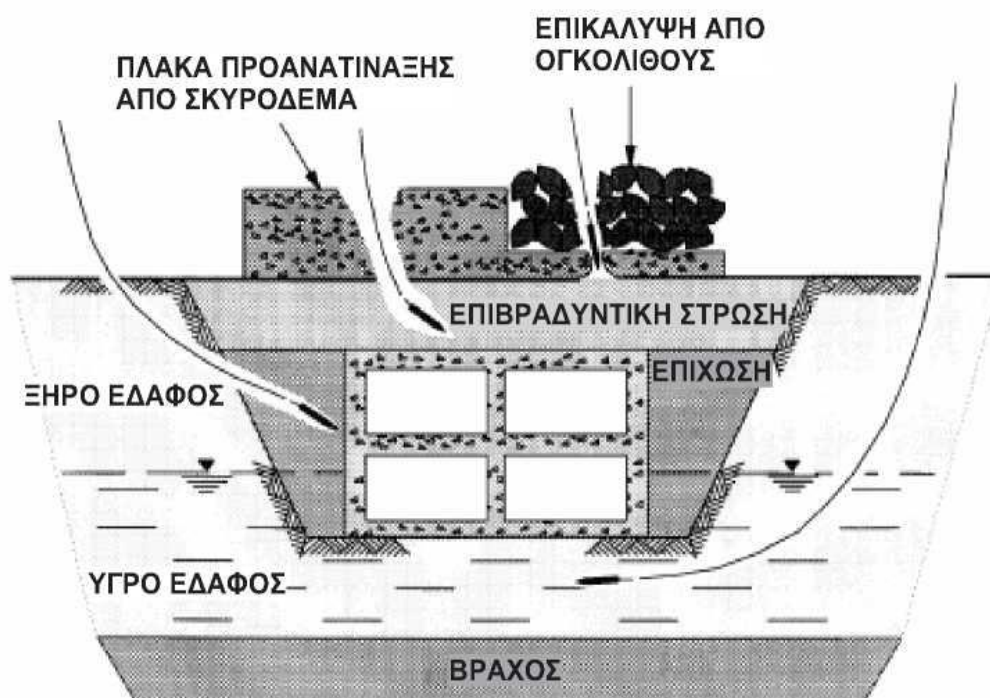
### 3.2 Εκρήξεις σε εσωτερικό χώρο

Εκρήξεις είναι πιθανό να σημειωθούν και στο εσωτερικό ενός οχυρωματικού έργου. Στην περίπτωση αυτή εκτός από την εμφάνιση του ωστικού κύματος, η έκρηξη έχει σαν αποτέλεσμα την αργή εκτόνωση των παραγόμενων αερίων που δημιουργούν πιέσεις στην κατασκευή με πολύ μεγαλύτερη διάρκεια σε σχέση με το ωστικό κύμα. Επιπλέον, οι πολλαπλές ανακλάσεις που δημιουργούνται στα τοιχώματα της κατασκευής κάνουν το πρόβλημα πιο σύνθετο. Το μέγεθος και η διάρκεια αυτών των πιέσεων εξαρτώνται από τη γεωμετρία της κατασκευής, τα ανοίγματα που ενδεχομένως να υπάρχουν και το είδος της εκρηκτικής ύλης. (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).

### 3.3 Εδαφική δόνηση και κρατήσεις

Μια πιθανή πυροδότηση βλήματος με εκρηκτική ύλη εντός του εδάφους έχει σαν αποτέλεσμα, αφενός τη δημιουργία εδαφικών κυμάτων, λόγω της διασποράς της εκλυόμενης ενέργειας, αφετέρου τη δημιουργία ενός κρατήρα στο έδαφος, ο οποίος ουσιαστικά είναι μια ζώνη παραμορφωμένου εδάφους. Μια τέτοια έκρηξη είναι δυνατόν να προκαλέσει σοβαρές βλάβες σε υπόγειες στρατιωτικές εγκαταστάσεις με δυσάρεστες συνέπειες αναφορικά με τη συνέχιση της λειτουργίας τους, ιδιαίτερα σε κατασκευές με σημαντικό βαθμό σπουδαιότητας.

Στον σχεδιασμό των οχυρωματικών έργων λαμβάνονται υπόψη κυρίως τα χαρακτηριστικά των εδαφικών κυμάτων που θα προκληθούν, όταν ένα βλήμα διεισδύσει και πυροδοτηθεί εντός του εδάφους σε κοντινή απόσταση από το οχυρωματικό έργο. Η απόσταση της έκρηξης από την κατασκευή, λαμβάνεται υπόψη ειδικά σε περιπτώσεις σχεδιασμού όπου κρίνεται αντισυμβατικό, λόγω μικρής σπουδαιότητας του έργου, να θεωρηθεί ότι το βλήμα θα προσβάλει απευθείας την κατασκευή ή σε κατασκευές με μεγαλύτερο βαθμό σπουδαιότητας, όπου λαμβάνονται ειδικά μέτρα προστασίας (πλάκα προανατίναξης, επικάλυψη ογκόλιθων κ.α.) και ως εκ τούτου αποφεύγεται η διείσδυση του βλήματος στα δομικά στοιχεία του έργου (Μπουκοβάλας κ.α., 2008). Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται οι πιθανές τροχιές και πιθανές θέσεις πυροδότησης ενός βλήματος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους



**Σχήμα 3.3** Θέσεις πυροδότησης βλήματος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: TM5-1300, 1990).

Η πίεση που θα δεχτεί η κατασκευή, λόγω μιας έκρηξης σε κοντινή απόσταση από αυτή, εξαρτάται εκτός από το είδος του εκρηκτικού και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους που την περιβάλλει, καθώς το είδος του εδάφους καθορίζει την ταχύτητα με την οποία θα διαδοθούν τα εδαφικά κύματα. Οι παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην εκτίμηση της εδαφικής κίνησης είναι (Μπουκοβάλας κ.α., 2008):

- Η μάζα και το είδος του πυροδοτούμενου εκρηκτικού.
- Το βάθος πυροδότησης, καθώς για να έχουμε εδαφική κίνηση, η ενέργεια που εκλύεται κατά την έκρηξη, δεν θα πρέπει να διαφεύγει στον αέρα με τη μορφή ωστικού κύματος.
- Τα χαρακτηριστικά του εδάφους που περιβάλλει την κατασκευή.

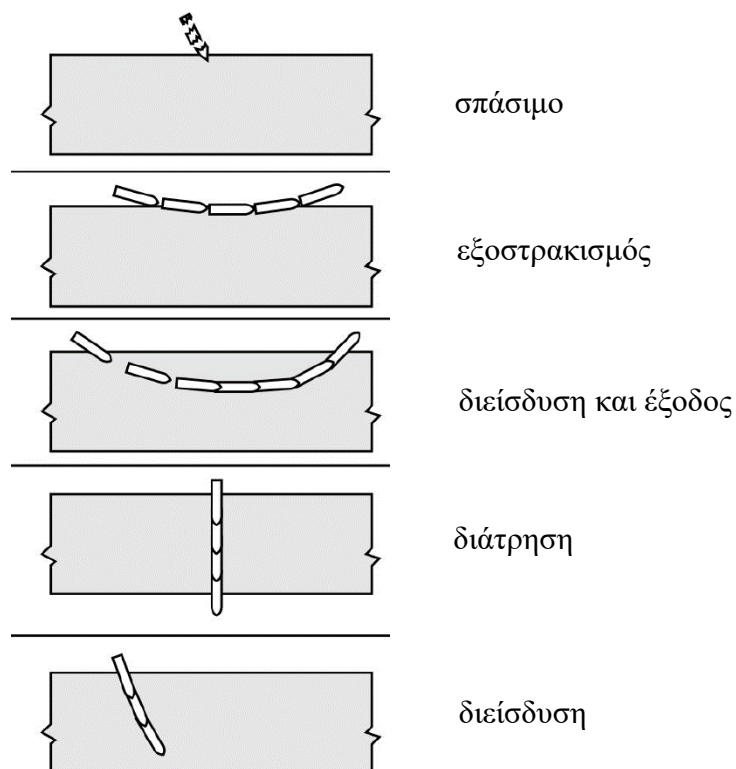
Οι εδαφικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή κατασκευής του οχυρωματικού έργου, έχουν ίσως τη μεγαλύτερη επίδραση στην ένταση της εδαφικής δόνησης που θα πλήξει το έργο και κατ' επέκταση στη μορφή της εδαφικής κίνησης. Η απόκριση του εδάφους εξαρτάται από το είδος και την κοκκομετρία του εδαφικού υλικού (άμμος, άργιλος κτλ.), τη σχετική του πυκνότητα και τον βαθμό κορεσμού του. Αξίζει να αναφερθεί, ότι όταν ο βαθμός κορεσμού ξεπεράσει το 95% η διάδοση της εδαφικής δόνησης γίνεται ιδιαίτερα σημαντική. Για παράδειγμα, αύξηση του βαθμού κορεσμού του εδάφους από το 96% στο 100%, οδηγεί σε αύξηση των μέγιστων εδαφικών ταχυτήτων κατά 2-10 φορές (Μπουκοβάλας κ.α., 2008). Για τον λόγο αυτό προτείνεται να αποφεύγεται η κατασκευή οχυρωματικών έργων σε κορεσμένα εδάφη. Επιπλέον, τα κοκκώδη εδαφικά υλικά, όπως άμμος, αμμοχάλικα κτλ. είναι πιο κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν ως υλικά επίχωσης σε σχέση με τα αργιλικά, διότι απομειώνουν ταχύτερα την εδαφική δόνηση, με αποτέλεσμα οι πιέσεις που δέχεται η κατασκευή να είναι μικρότερες (Κούκης, 1985).

Η δημιουργία κρατήρα, ως αποτέλεσμα μιας έκρηξης εντός του εδάφους, δεν αποτελεί άμεση απειλή για τα έργα οχύρωσης. Ωστόσο, συνίσταται να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό των οχυρωματικών έργων, όταν οι διαστάσεις του κρατήρα που θα δημιουργηθεί είναι ικανές να απειλήσουν την επικάλυψη της κατασκευής και να την αφήσουν εκτεθειμένη σε πλήγματα άλλων όπλων ή όταν το εδαφικό υλικό που εκτιμάται ότι θα εκτοξευθεί κατά την έκρηξη μπορεί να απειλήσει τόσο το προσωπικό όσο και τον ευαίσθητο εξοπλισμό του έργου (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).

Η μορφή του δημιουργούμενου κρατήρα, όπως και στην περίπτωση της εδαφικής δόνησης, εξαρτάται από το είδος του εκρηκτικού, το βάθος πυροδότησης, τη στρωματογραφία και τις ιδιότητες του εδάφους (αν η έκρηξη λαμβάνει χώρα σε εδαφικά υλικό ή σε βράχο). Επισημαίνεται, ότι στην περίπτωση έκρηξης σε βράχο ή σε σκυρόδεμα, μόνο ειδικά διατρητικά όπλα μπορούν να διεισδύσουν σε ικανό βάθος, ώστε να δημιουργηθεί κρατήρας. Αντίθετα, μια ενδεχόμενη έκρηξη σε χαλαρή κορεσμένη άμμο, θα έχει ως συνέπεια μια τοπική ρευστοποίηση του εδάφους και παράλληλα τη δημιουργία ενός πλατύ και ρηχού κρατήρα (Κούκης, 1985).

### 3.4 Διείσδυση

Η διείσδυση ενός βλήματος σε έναν στόχο και η διάτρηση του δομικού στοιχείου που ενδεχομένως να ακολουθήσει, είναι απειλές που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό οχυρωματικών έργων, προκειμένου να θωρακιστεί η κατασκευή έναντι τέτοιων μορφών αστοχίας και να ελαχιστοποιηθεί η ζημιά που θα προκληθεί στο έργο. Όταν ένα βλήμα προσκρούσει σε ένα στόχο, τότε το βλήμα μπορεί είτε να σπάσει, είτε να εξοστρακιστεί, είτε να διεισδύσει και στη συνέχεια να εξέλθει, είτε να διατρήσει το στόχο, είτε να διεισδύσει και να παραμείνει στον στόχο (Σχήμα 3.4) (TM5-855-1, 2008).



**Σχήμα 3.4** Πιθανές πορείες βλήματος μετά την πρόσκρουση (Πηγή: TM5-855-1, 2008).

Ο σχεδιασμός έναντι διείσδυσης από ένα όπλο σχεδιασμού, τόσο των νέων όσο και των υφιστάμενων έργων οχύρωσης, καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την τελική μορφή της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις έναντι διείσδυσης καθορίζουν (TM5-855-1, 2008):

- Τον τρόπο κατασκευής του οχυρωματικού έργου (σήραγγα ή όρυγμα).
- Το βάθος εγκιβωτισμού.

- Τα μέτρα προστασίας της κατασκευής που θα εφαρμοστούν (πλάκα προανατίναξης, επιχώσεις με εδαφικό υλικό, στρώση ογκόλιθων κ.α.).
- Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος των δομικών στοιχείων του έργου, ώστε να αναπτύξουν την επιθυμητή συμπεριφορά έναντι διείσδυσης από το όπλο σχεδιασμού.

Το φαινόμενο της διείσδυσης περιλαμβάνει την εκτίμηση του βάθους διείσδυσης ενός βλήματος σχεδιασμού σε ένα δομικό στοιχείο, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των μέτρων προστασίας της κατασκευής (πλάκα προανατίναξης, επιχώσεις, ογκόλιθοι κλπ.), καθώς και το απαιτούμενο πάχος των δομικών στοιχείων για τον επιθυμητό βαθμό βλάβης. Το βάθος διείσδυσης ενός βλήματος σε ένα δομικό στοιχείο, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του όπλου σχεδιασμού και κυρίως από την ταχύτητα και τη γωνία πρόσκρουσης του βλήματος στον στόχο του. Οι σχετικές ταχύτητες κρούσης κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 0,5 και 2,0 km/s. Αυτές είναι οι ταχύτητες με τις οποίες εκτοξεύονται τα βλήματα εναντίον κτιριακών στρατιωτικών εγκαταστάσεων και τεθωρακισμένων οχημάτων (Rosenberg & Dekel, 2020).

Η συμπεριφορά του στόχου από οπλισμένο σκυρόδεμα σε ενδεχόμενη διείσδυση, είναι ανάλογη της ποιότητας του χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος, της κοκκομετρίας των αδρανών του και σε μικρότερο βαθμό του χρησιμοποιούμενου οπλισμού του. Επιπλέον, η τροχιά που θα διαγράψει το βλήμα μέσα στις στρώσεις των γεωυλικών που καλύπτουν την κατασκευή πριν φτάσει στο στόχο του, καθορίζεται από τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού της επίχωσης ή του βράχου (πορώδες, πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, βαθμός αποσάθρωσης κ.α.) στην περίπτωση που το έργο είναι κατασκευασμένο μέσα σε σήραγγα (Μπουκοβάλας κ.α., 2008).

Τα φορτία με τα οποία σχεδιάζονται τα οχυρωματικά έργα έναντι διείσδυσης, παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, συγκριτικά με τα φορτία με τα οποία σχεδιάζονται οι συμβατικές κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα (Μπουκοβάλας κ.α., 2008) :

- Προκαλούν πολύ μεγάλες ωθήσεις για πολύ λίγο χρόνο.
- Εμφανίζουν μεγάλες αυξομειώσεις σε μια σχετικά μικρή περιοχή.
- Η διέγερση που προκαλούν στην κατασκευή εξαπλώνεται με την ταχύτητα του ωστικού κύματος και όχι ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία της.

### 3.4.1 Διείσδυση σε σκυρόδεμα

Η πρόσκρουση ενός βλήματος σε ένα δομικό στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να οδηγήσει στις εξής μορφές αστοχίας (Kennedy, 1976):

- Αποφλοίωση του δομικού στοιχείου στο σημείο της πρόσκρουσης (εξωτερική πλευρά της κατασκευής). Ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος, το ποσοστό οπλισμού, τα μέτρα προστασίας που προηγούνται της κατασκευής και την ταχύτητα του βλήματος, το βλήμα μπορεί να αναπηδήσει, να αλλάξει τροχιά ή να καταστραφεί πριν διεισδύσει στο στόχο.
- Αν το βλήμα διεισδύσει τελικά στο στόχο, πιθανώς να ακινητοποιηθεί μέσα στη μάζα του δομικού στοιχείου και να πυροδοτηθεί. Την ακινητοποίηση του βλήματος επηρεάζει άμεσα η ύπαρξη οπλισμού ή άλλων υλικών εντός του σκυροδέματος. Εάν το βλήμα δεν διαπεράσει το δομικό στοιχείο, αλλά πυροδοτηθεί μέσα στο δομικό στοιχείο, τότε ακολουθεί εκτόξευση θραυσμάτων στην εσωτερική πλευρά του οχυρωματικού έργου με κίνδυνο τραυματισμού του προσωπικού.
- Διάτρηση του δομικού στοιχείου της κατασκευής, όταν το πάχος του δομικού στοιχείου δεν επαρκεί ώστε να ακινητοποιήσει το βλήμα. Οι συνέπειες σε αυτή την περίπτωση, εξαρτώνται άμεσα από την ταχύτητα με την οποία θα διεισδύσει το βλήμα στην κατασκευή, η οποία επηρεάζει με τη σειρά της την παραμένουσα ταχύτητα του βλήματος τη στιγμή της εξόδου του από το δομικό στοιχείο. Αξίζει να αναφερθεί, ότι όταν κατά τον έλεγχο υφιστάμενων έργων οχύρωσης, παρατηρηθεί ότι το βλήμα μπορεί να διατρήσει κάποιο δομικό στοιχείο, τότε συνίσταται η κατασκευή διπλών τοιχωμάτων του χώρου που θα πληγεί ή άλλα αντίστοιχα μέτρα προστασίας.

Η ποιότητα του σκυροδέματος, το ποσοστό οπλισμού και ο μέγιστος κόκκος αδρανών, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες της αντοχής ενός οχυρωματικού έργου σε διείσδυση. Η μείωση του λόγου νερού/τσιμέντου, με τη χρησιμοποίηση πρόσμικτων στο μίγμα του σκυροδέματος, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους και την ταυτόχρονη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του. Γενικότερα, η προσθήκη νέων υλικών στο σκυρόδεμα, μειώνει την εξάπλωση των ρηγματώσεων κατά την κρούση με ένα όπλο σχεδιασμού (Vairagade & Dhale, 2023). Έχει υπολογιστεί πειραματικά ότι στα σκυροδέματα υψηλής αντοχής μειώνεται το βάθος διείσδυσης ενός βλήματος σχεδιασμού κατά 30%. Αντίθετα σε σκυροδέματα υπερ-υψηλής αντοχής, δεν παρατηρείται κάποια περαιτέρω μείωση του βάθους διείσδυσης και



δεδομένου του υψηλού κόστους παρασκευής τέτοιων σκυροδεμάτων, η χρησιμοποίηση τους δεν επιφέρει κάποιο επιπλέον όφελος (Μπουκοβάλας, 2008).

Επιπλέον, η ωρίμανση του σκυροδέματος μέσα στον χρόνο, με ταυτόχρονη μείωση του πορώδους του, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης σε διείσδυση. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι σε μια περίοδο 10 ετών η αύξηση της αντίστασης σε διείσδυση είναι της τάξης 15% έως 20%. Για τον λόγο αυτό, σε οχυρωματικά έργα με μεγάλου πάχους δομικά στοιχεία, ο χρόνος ωρίμανσης του σκυροδέματος πρέπει να είναι μεγαλύτερος των 6 μηνών και σε υπόγεια έργα, τα οποία είναι σε επαφή με τον υδροφόρο ορίζοντα επιβάλλεται η εφαρμογή πλήρους εξωτερικής στεγάνωσης (Μπουκοβάλας, 2008).

Ο οπλισμός εντός του σκυροδέματος συμβάλλει εκτός από την αύξηση της εφελκυστικής του αντοχής και στην αλλαγή της κατεύθυνσης ενός βλήματος που θα προσκρούσει σε μια στρώση οπλισμού, γεγονός που έχει παρατηρηθεί σε μικρού διαμετρήματος βλήματα. Πειραματικά έχει παρατηρηθεί ότι η παρουσία οπλισμού αυξάνει την αντίσταση ενός δομικού στοιχείου σε διείσδυση έως και 25%. Περαιτέρω αύξηση όμως του οπλισμού δεν μεταβάλλει θεαματικά τη αντίσταση της κατασκευής σε διείσδυση (TM5-855-1, 2008).

Αναφορικά με τον μέγιστο κόκκο των αδρανών στο σκυρόδεμα, έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση του μέγιστου κόκκου, μειώνει το βάθος στο οποίο ένα βλήμα μπορεί να διεισδύσει μέσα στο σκυρόδεμα, ειδικά για βλήματα σχεδιασμού μικρού διαμετρήματος. Σε όπλα μεγαλύτερου διαμετρήματος δεν επηρεάζεται το βάθος διείσδυσης από το μέγεθος του κόκκου των αδρανών (TM5-855-1, 2008).

### **3.4.2 Διείσδυση σε έδαφος και βράχο**

Όπως και στην περίπτωση διείσδυσης βλήματος σε σκυρόδεμα, έτσι και στην περίπτωση διείσδυσης σε έδαφος ή βράχο, αυτό που ενδιαφέρει κυρίως κατά τον σχεδιασμό είναι η πιθανή τροχιά που θα διαγράψει το βλήμα και το βάθος στο οποίο θα διεισδύσει μέσα στο γεωυλικό. Το βάθος διείσδυσης του βλήματος μέσα στο έδαφος εξαρτάται από τον τύπο του βλήματος, τη γεωμετρία του, την ταχύτητά του, τη γωνία πρόσκρουσης, τη στρωματογραφία του εδάφους και τις ιδιότητες των εδαφικών υλικών. Μια υψηλή ταχύτητα κρούσης, μια κάθετη πρόσκρουση και ένα μαλακό έδαφος θα οδηγήσει σε μείωση της σταθερότητας του εδάφους σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Τα καλά συγκολλημένα αμμοχάλικα ή μια χονδρόκοκκη άμμος έχουν πολύ μικρότερη διεισδυτικότητα από μια πολύ μαλακή άργιλο, η οποία θα πρέπει κατά τον σχεδιασμό να αντιμετωπίζεται ως ρευστό υλικό (TM5-855-1, 2008).

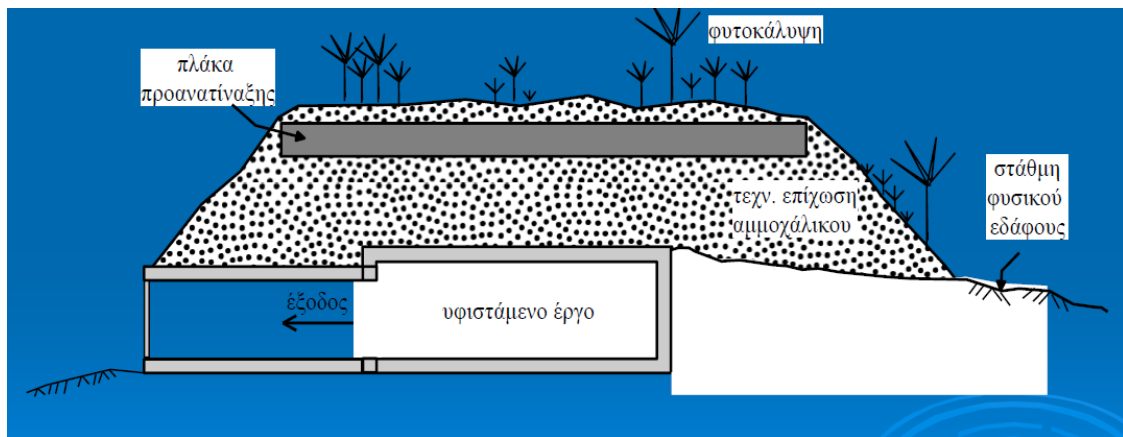
Έχει βρεθεί πειραματικά ότι όταν ένα βλήμα συγκρούεται με ένα κοκκώδες εδαφικό υλικό με χαμηλή ταχύτητα, του οποίου η πυκνότητα είναι παρόμοια με αυτή του υλικού του βλήματος, το έδαφος συμπεριφέρεται κατά τη διείσδυση σαν στερεό υλικό και το βάθος διείσδυσης του βλήματος είναι σχεδόν μηδενικό. Αντίθετα, όταν το βλήμα συγκρούεται με ένα κοκκώδες υλικό με υψηλή ταχύτητα και η πυκνότητα του υλικού του βλήματος είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των σωματιδίων του εδαφικού υλικού, το έδαφος συμπεριφέρεται σαν υγρό και το βλήμα μπορεί να διεισδύσει όπως θα διεισδύσε σε ένα παχύρρευστο υγρό (Goey et al, 2012).

Όταν η κρούση γίνεται σε βράχο, το πέτρωμα θεωρητικά λαμβάνεται ως απρόσβλητο. Ωστόσο, ο θρυμματισμός του βράχου που θα ακολουθήσει ίσως αλλάξει τις ιδιότητες και την αντοχή του πετρώματος. Επιπλέον, η αντοχή του μειώνεται όσο αυξάνεται το πορώδες του λόγω διάβρωσης και οι ρωγμές που σχηματίζονται σε αυτήν την περίπτωση επηρεάζουν σημαντικά το βάθος διείσδυσης. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διεισδυτικότητα ενός βραχώδους σχηματισμού είναι η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας και ο βαθμός αποσάθρωσής του, ενώ η ποιότητα του πετρώματος εξαρτάται από τη ρηγμάτωση και τις ασυνέχειες της μάζας του (TM5-855-1, 2008).

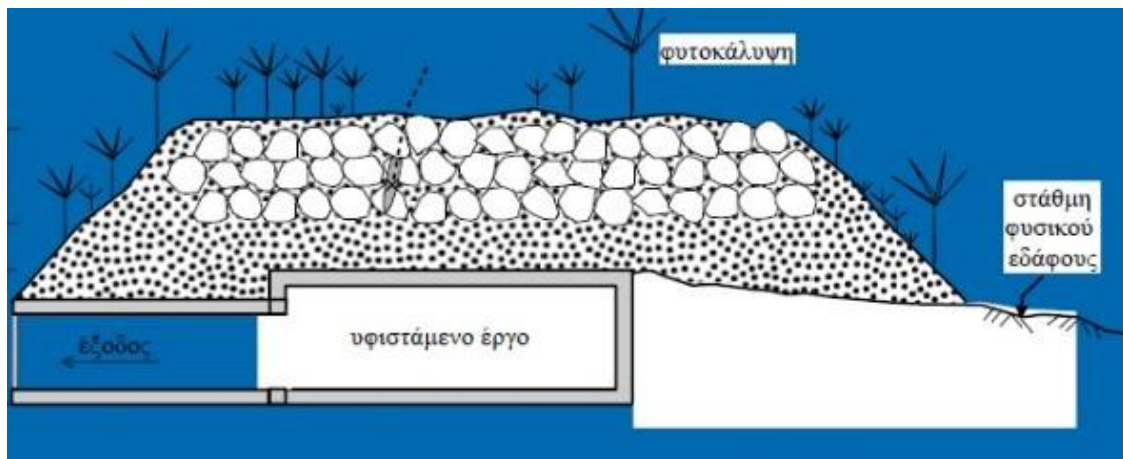
### **3.4.3 Μέτρα προστασίας έναντι διείσδυσης**

Πολύ συχνά, για την προστασία έναντι διείσδυσης των υπόγειων οχυρωματικών έργων, ιδιαίτερα εκείνων που χαρακτηρίζονται υψηλής σπουδαιότητας, αλλά και για την ενίσχυση υφιστάμενων, εφαρμόζονται προστατευτικές κατασκευές, όπως είναι η πλάκα προανατίναξης πάνω σε εδαφική επίχωση, μέσα στην οποία είναι εγκιβωτισμένο το έργο (Σχήμα 3.5) ή η τοποθέτηση στρώσεων φυσικών ογκολίθων από σκληρό βράχο πάνω σε τεχνητή επίχωση συνήθως αμμοχάλικου (Σχήμα 3.6).

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου γίνεται βάσει των τοπικών συνθηκών και των μέσων κατασκευής του έργου, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί και συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων (στρώσεις ογκόλιθου πάνω από πλάκα προανατίναξης). Σκοπός της εφαρμογής των εν λόγω μέτρων προστασίας είναι να ανακοπεί η τροχιά του όπλου σχεδιασμού, καθώς το βλήμα στην προσπάθειά του να διαπεράσει τις προστατευτικές κατασκευές υπάρχει πιθανότητα είτε να καταστραφεί, είτε να εξοστρακιστεί, είτε να εκτραπεί από την πορεία του (TM5-855-1, 2008).



**Σχήμα 3.5** Πλάκα προανατίναξης πάνω σε εδαφική επίχωση (Πηγή: Σ.Τ.Ε.Α.ΜΧ, 2008)



**Σχήμα 3.6** Στρώσεις φυσικού ογκόλιθου πάνω σε εδαφική επίχωση (Πηγή: Σ.Τ.Ε.Α.ΜΧ, 2008)

Οι διαστάσεις και το πάχος της πλάκας προανατίναξης εξαρτάται από την απόσταση στην οποία θέλουμε να εκτρέψουμε το όπλο σχεδιασμού, ώστε η κατασκευή να μην επηρεαστεί από το ωστικό κύμα που θα προκληθεί κατά την πυροδότησή του. Το υλικό επίχωσης, μέσα στο οποίο είναι εγκιβωτισμένο το έργο, συνίσταται να είναι θραυστό αμμοχάλικο λατομείου, το οποίο απομειώνει γρήγορα το ωστικό κύμα. Επιπλέον, απαιτείται να λαμβάνονται μέτρα αποστράγγισης, ώστε το αμμοχάλικο να μην είναι κορεσμένο με νερό, διότι σ' αυτήν την περίπτωση η εδαφική δόνηση που θα προκληθεί λόγω της έκρηξης στο κορεσμένο έδαφος, δεν θα μπορέσει να αναληφθεί με ασφάλεια από την κατασκευή (Σ.Τ.Ε.Α.ΜΧ, 2008).

### 3.5 Θραύσματα

Η περίπτωση πλήγματος ενός οχυρωματικού έργου από θραύσματα, είναι παρόμοια με την περίπτωση πλήγματος λόγω διείσδυσης, με τη διαφορά ότι τα χαρακτηριστικά των

θραυσμάτων δεν είναι πλήρως γνωστά (σχήμα, ταχύτητα, σκληρότητα κτλ.), όπως είναι τα χαρακτηριστικά του βλήματος κατά τη διείδυση. Επομένως, ο καθορισμός των θραυσμάτων που θα πλήξει ένα οχυρωματικό έργο μετά από έκρηξη βλήματος, καθώς και η εκτίμηση της απόκρισης των δομικών στοιχείων του έργου κατά τον σχεδιασμό του, μπορεί να γίνει με πιθανοτική ακρίβεια. Αυτό συμβαίνει διότι τα χαρακτηριστικά των θραυσμάτων δεν μπορούν να προσδιοριστούν παρά μόνο με στατιστική ακρίβεια.

Τα θραύσματα που αφορούν κυρίως το σχεδιασμό των έργων οχύρωσης, είναι τα πρωτεύοντα θραύσματα, δηλαδή αυτά που προέρχονται από τη διάλυση του περιβλήματος του όπλου σχεδιασμού και εκτοξεύονται με μεγάλη ταχύτητα. Εκτός από αυτά υπάρχουν και τα δευτερεύοντα θραύσματα, τα οποία μπορούν σε κάποιες περιπτώσεις να φτάσουν σε ταχύτητες παρόμοιες με αυτές των πρωτεύοντων και προέρχονται από υλικά που υπάρχουν στο περιβάλλον του έργου και μπορεί να παρασυρθούν από το ωστικό κύμα (Σ.Τ.Ε.Α.ΜΧ, 2008).

Το νέφος θραυσμάτων που παράγεται κατά την έκρηξη ενός βλήματος, δημιουργεί πιέσεις στην κατασκευή ανάλογες με τις πιέσεις λόγω διείδυσης, οι οποίες ενδεχομένως μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία. Ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση της κατασκευής έναντι θραυσμάτων, χρησιμοποιεί τις ίδιες παραμέτρους σχεδιασμού με την περίπτωση σχεδιασμού έναντι διείδυσης.

### **3.6 Επιθυμητά επίπεδα βλάβης και κριτήρια σχεδιασμού**

Με δεδομένο το όπλο σχεδιασμού, ορίζονται από το κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τον σχεδιασμό των οχυρωματικών έργων, τα επιθυμητά επίπεδα βλάβης – αναλόγως της σπουδαιότητας του έργου - που επιτρέπεται να αναλάβουν τα δομικά στοιχεία των κατασκευών. Τα κριτήρια σχεδιασμού λαμβάνονται με γνώμονα τρεις επιτρεπτές στάθμες βλάβης, την αποφυγή της κατάρρευσης (βαριά βλάβη), τον περιορισμό των βλαβών (μέτρια βλάβη) και την αδιάλειπτη λειτουργία του έργου (ελαφριά βλάβη) (Μπουκοβάλας, 2008). Όπως προαναφέρθηκε, σε έργα οχύρωσης προέχει η ασφάλεια του προσωπικού και του απαραίτητου επιχειρησιακού εξοπλισμού, προκειμένου να συνεχιστεί η λειτουργία του έργου μετά από πλήγμα του όπλου σχεδιασμού. Ωστόσο, για έργα μικρότερης στρατηγικής σπουδαιότητας, ενδεχομένως να αρκεί η εξασφάλιση του κριτηρίου περιορισμού των βλαβών και αποφυγής της κατάρρευσης.

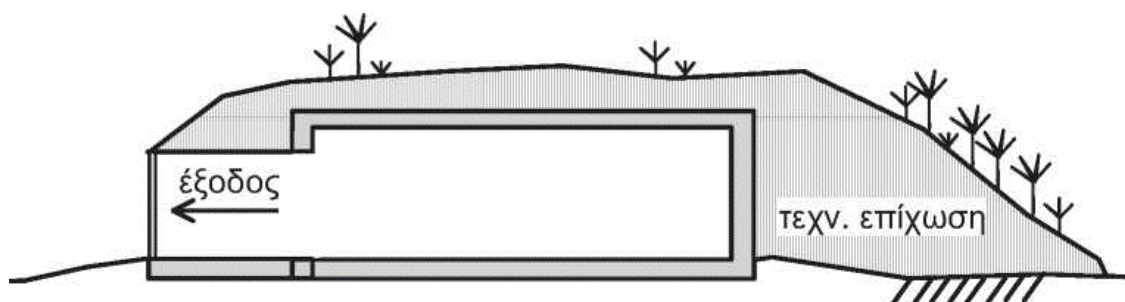
Στην περίπτωση κατασκευής οχυρωματικού έργου από οπλισμένο σκυρόδεμα τα κριτήρια σχεδιασμού καθορίζονται ως εξής (Μπουκοβάλας, 2008):

- *Αδιάλειπτη λειτουργία.* Τα δομικά στοιχεία της κατασκευής παρουσιάζουν μόνο κάποιες μέτριες ρωγμές, χωρίς αποκόλληση σκυροδέματος. Αυτό το επίπεδο βλάβης λαμβάνεται υπόψη όταν η λειτουργία του έργου δεν πρέπει να διακοπεί, επομένως απαιτείται προστασία του ανθρώπινου δυναμικού, καθώς και του απαραίτητου εξοπλισμού με πολύ μικρή πιθανότητα τραυματισμού ή καταστροφής.
- *Περιορισμός βλαβών.* Παρατηρείται, στα δομικά στοιχεία της κατασκευής, μερική αποκόλληση κάποιων τμημάτων σκυροδέματος, χωρίς ωστόσο ο οπλισμός να αστοχήσει σημαντικά. Συνήθως εκτοξεύεται σημαντικός αριθμός θραυσμάτων στην εσωτερική πλευρά του έργου με κίνδυνο τραυματισμού του προσωπικού και καταστροφής του εξοπλισμού. Αυτό το επίπεδο βλάβης λαμβάνεται υπόψη, όταν απαιτείται προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού, με μια υπολογίσιμη πιθανότητα τραυματισμού και καταστροφής.
- *Αποφυγή κατάρρευσης.* Πολύ μεγάλο ποσοστό του οπλισμού έχει φτάσει στη θραύση και τα δομικά στοιχεία της κατασκευής είναι έτοιμα να αστοχήσουν. Σε αυτό το επίπεδο βλάβης, δεχόμαστε τη μέγιστη καταστροφή στην κατασκευή, σε έργα που στεγάζουν μη απαραίτητο εξοπλισμό και καθόλου ανθρώπινο δυναμικό.

#### 4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΧΥΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

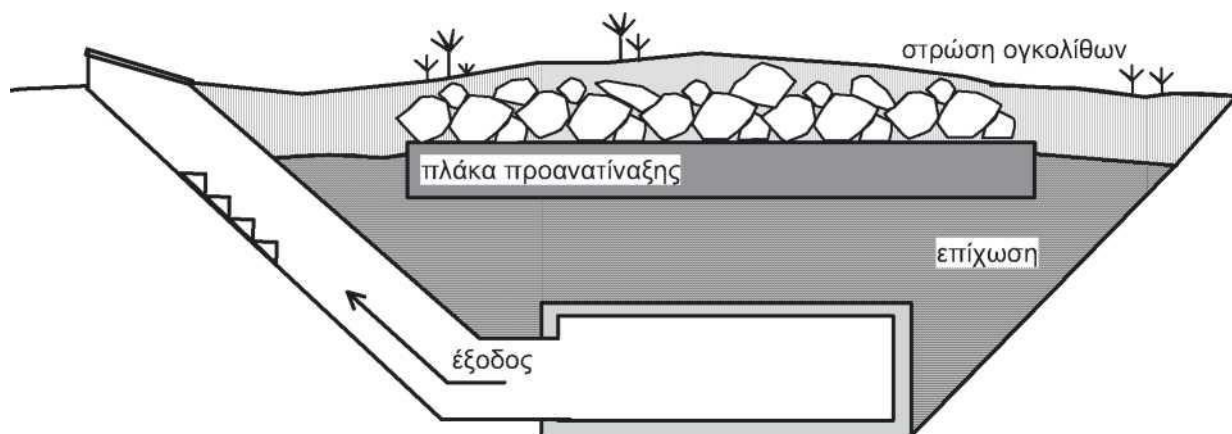
Τα οχυρωματικά έργα, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, κατατάσσονται σε τρεις βασικούς τύπους (Μπουκοβάλας, 2008):

Σύμφωνα με τον *Τύπο I* (Σχήμα 4.1) κατασκευάζονται έργα πάνω ή πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, τα οποία δεν απειλούνται από άμεση κρούση και διείσδυση από το όπλο σχεδιασμού.



**Σχήμα 4.1** Οχυρωματικό έργο Τύπου I (Πηγή: Μπουκοβάλας, 2008).

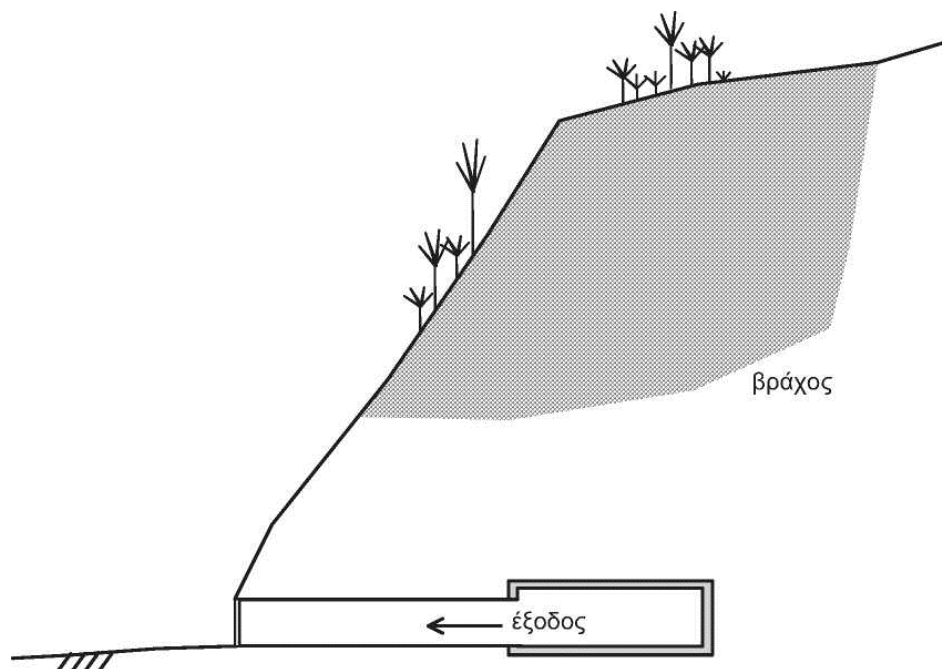
Σύμφωνα με τον *Τύπο II* (Σχήμα 4.2) κατασκευάζονται οχυρωματικά έργα με μεθόδους cut-and-cover, σε ικανό βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ώστε να προστατεύονται έναντι προσβολής από διατρητικά όπλα. Επιπλέον, λαμβάνονται μέτρα προστασίας της κατασκευής, όπως κατασκευή πλάκας προανατίναξης με ή χωρίς τοποθέτηση στρώσεων ογκολίθων.



**Σχήμα 4.2** Οχυρωματικό έργο Τύπου II (Πηγή: Μπουκοβάλας, 2008).

Σύμφωνα με τον *Τύπο III* (Σχήμα 4.3) κατασκευάζονται έργα με τη μορφή σηράγγων σε βραχώδεις όγκους. Τον ρόλο της προστατευτικής ζώνης, σε αυτή την περίπτωση, παίζει η

υπερκείμενη βραχώμαζα, η οποία διαφυλάσσει την κατασκευή από την προσβολή ακόμα και από όπλα μεγάλης διατρητικής ικανότητας, ενώ το έργο πρακτικά είναι μη ανιχνεύσιμο είτε από την επιφάνεια του εδάφους είτε από τον αέρα.



**Σχήμα 4.3** Οχυρωματικό έργο Τύπου ΙΙΙ (Πηγή: Μπουκοβάλας, 2008).

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε τύπου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1

**Πίνακας 4.1** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών τύπων οχυρωματικών έργων.

Τύπος	Βαθμός προστασίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
I	χαμηλός έως μέσος	<ul style="list-style-type: none"> <li>• χαμηλό κόστος</li> <li>• εύκολη κατασκευή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• μειωμένη αντοχή</li> <li>• μειωμένη κάλυψη</li> </ul>
II	μέσος	<ul style="list-style-type: none"> <li>• υψηλή αντοχή</li> <li>• υψηλή κάλυψη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• κόστος εκσκαφών και μέτρων επικάλυψης</li> <li>• απαίτηση ειδικών εισόδων π.χ. ανελκυστήρες</li> </ul>

III	υψηλός	<ul style="list-style-type: none"> <li>• απρόσβλητο</li> <li>• μη ανιχνεύσιμο</li> <li>• δεν απαιτείται επίχωση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ειδικός εξοπλισμός κατασκευής</li> <li>• αυξημένο κόστος μέτρων υποστήριξης χαμηλής ποιότητας βράχου</li> <li>• δύσκολος καθαρισμός εισόδων/εξόδων μετά από πλήγμα</li> <li>• η αντοχή του πετρώματος επηρεάζει τη διάταξη του έργου</li> </ul>
-----	--------	--	--

#### 4.1 Κριτήρια επιλογής του κατάλληλου τύπου

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου οχυρωματικού έργου, βασίζεται στα εξής κριτήρια (Μπουκοβάλας, 2008):

- Επιχειρησιακά κριτήρια και επίπεδο ασφαλείας. Η ταξινόμηση ενός οχυρωματικού έργου στις τρεις βασικές κατηγορίες που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.2 (πλήρως προστατευμένο, μερικώς προστατευμένο ή ημι-προστατευμένο), καθορίζει και τον τύπο του. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι πλήρως προστατευμένα οχυρωματικά έργα κατασκευάζονται σύμφωνα με τον τύπο II ή III, καθώς η προστασία τους, στην περίπτωση κατασκευής του τύπου I, απαιτεί εξαιρετικά μεγάλες διατομές δομικών στοιχείων, καθιστώντας την κατασκευή αντικοινομική και τεχνικά δύσκολη.
- Χαρακτηριστικά του όπλου σχεδιασμού. Ο καθορισμός, από τον κύριο του έργου, της σπουδαιότητας της κατασκευής και του όπλου σχεδιασμού από το οποίο απαιτείται πλήρης προστασία, οδηγεί και στην επιλογή του καταλληλότερου τύπου κατασκευής.
- Οικονομοτεχνικά κριτήρια. Οι τοπικές συνθήκες και τα διαθέσιμα τεχνικά μέσα καθορίζουν το κόστος των διαφορετικών τύπων κατασκευής, παράγοντας ο οποίος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή του τύπου του έργου.
- Τοπογραφικό ανάγλυφο. Η εκμετάλλευση του ανάγλυφου και των εδαφικών συνθηκών στον τόπο κατασκευής του έργου, ενδεχομένως να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους, καθώς και σε αυξημένη προστασία της κατασκευής, λόγω της κάλυψης που μπορεί να προσφέρει.



- Ανάγκες κάλυψης της κατασκευής. Το θερμικό ίχνος πρακτικά εξαφανίζεται για βάθος κατασκευής μεγαλύτερο των έξι μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, επομένως όταν οι ανάγκες για κάλυψη μιας κατασκευής είναι αυξημένες, τότε επιλέγεται ο τύπος II ή III.

#### **4.2 Οχρωματικά έργα τύπου I**

Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει αυτός ο τύπος οχρωματικού έργου, είναι το χαμηλό κόστος και η σχετικά απλή κατασκευή. Ωστόσο, όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις επιβιωσιμότητας της κατασκευής, αυξάνεται και το κόστος της, καθώς απαιτούνται μεγαλύτερες διατομές δομικών στοιχείων. Για υπέργειες κατασκευές, θα πρέπει να λαμβάνονται κατά τον σχεδιασμό και ειδικά μέτρα κάλυψης της κατασκευής.

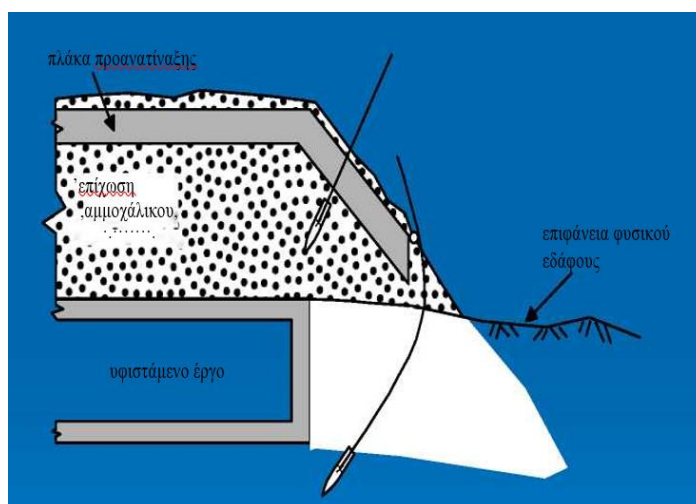
Ο τύπος I γενικά ενδείκνυται για έργα, τα οποία κατατάσσονται στα μερικώς προστατευμένα ή στα ημι-προστατευμένα, καθώς δεν θεωρείται ότι τα δομικά στοιχεία θα πληγούν από άμεση κρούση του όπλου σχεδιασμού. Επομένως, το ωστικό κύμα και κυρίως η εδαφική δόνηση θα καθορίσουν το πάχος των δομικών στοιχείων του έργου. Επίσης, η θέση του υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους, καθορίζει και το αν η κατασκευή θα γίνει υπέργεια ή υπόγεια, καθώς σε κορεσμένα εδάφη, η εδαφική δόνηση είναι εντονότερη, επομένως συνίσταται οι κατασκευές να γίνονται υπέργειες (Σ.Τ.Ε.Α.ΜΧ, 2008).

#### **4.3 Οχρωματικά έργα τύπου II**

Για οχρωματικά έργα που κατατάσσονται στα πλήρως προστατευμένα, συνιστάται η κατασκευή τους να γίνει σε ικανό βάθος, με ταυτόχρονη κατασκευή έργων προστασίας, όπως πλάκας προανατίναξης και στρώσεις ογκολίθων. Κατόπιν, η κάλυψη του έργου επιτυγχάνεται με την φυτοκάλυψη και τη γενικότερη αποκατάσταση του εδάφους.

Σε αυτόν τον τύπο οχρωματικού έργου, τα μέτρα που λαμβάνονται έναντι διείσδυσης από το όπλο σχεδιασμού, είναι και το βασικότερο στάδιο στον σχεδιασμό του. Τέτοια μέτρα είναι η κατασκευή πλάκας προανατίναξης από συμβατικό σκυρόδεμα ή από σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής και η διάταξη στρώσεων ογκολίθων σε συνδυασμό ή όχι με την πλάκα προανατίναξης. Η χρησιμοποίηση ινών χάλυβα για την κατασκευή της πλάκας προανατίναξης βελτιώνει την αντοχή της έναντι διείσδυσης, ενώ η εφαρμογή σκυροδεμάτων υπέρ-υψηλής αντοχής έχει βρεθεί ότι μειώνει το βάθος διείσδυσης του βλήματος σχεδιασμού κατά 20-30%. Ωστόσο, το μεγάλο κόστος αυτών των υλικών και οι τεχνικές δυσκολίες που ενέχει η παραγωγή τέτοιου

τύπου σκυροδεμάτων, καθιστούν ευκολότερη την κατασκευή μιας πλάκας μεγαλύτερου πάχους από συμβατικό σκυρόδεμα. Επιπλέον, για να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές τροχιές του βλήματος σχεδιασμού, η πλάκα προανατίναξης διαμορφώνεται με περύγια στα άκρα της (Σχήμα 4.4). Τέλος, αν η κατασκευή της πλάκας συνδυαστεί με την τοποθέτηση στρώσεων ογκολίθων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, τότε επιτυγχάνεται ακόμα μεγαλύτερη προστασία της οχυρωματικής κατασκευής (Σ.Τ.Ε.Α.ΜΧ, 2008).



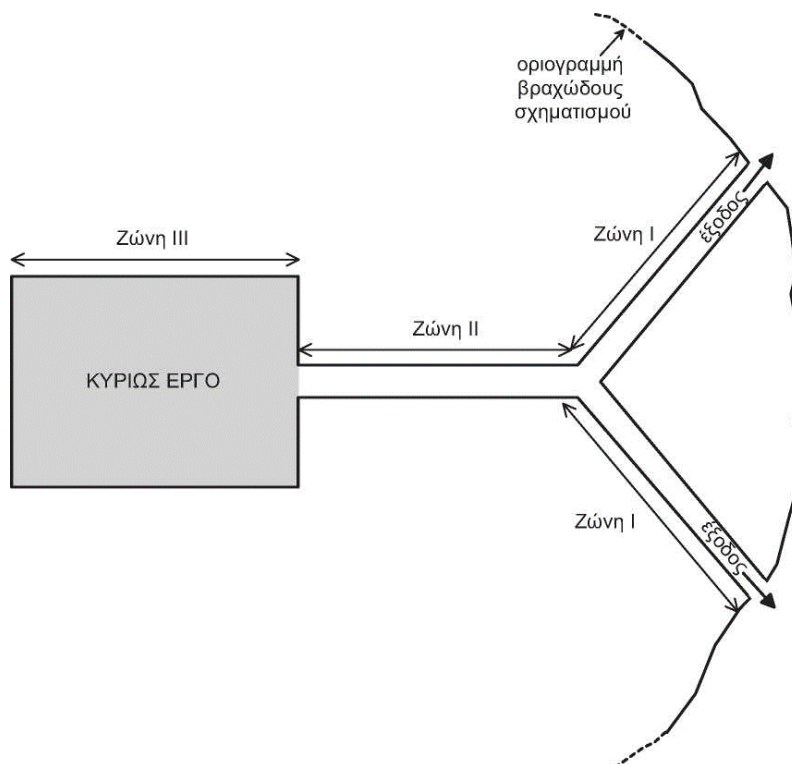
**Σχήμα 4.4** Κατασκευή πλάκας προανατίναξης με περύγια στα άκρα (Πηγή: Σ.Τ.Ε.Α.ΜΧ, 2008)

Όσον αφορά στην επίχωση μέσα στη οποία είναι εγκιβωτισμένη η κατασκευή, θα πρέπει να ελέγχεται αρχικά η διαθεσιμότητα υλικών επίχωσης στην περιοχή κατασκευής του οχυρωματικού έργου. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στο πάχος της επίχωσης, ώστε να διασφαλίζεται ότι η πυροδότηση του όπλου σχεδιασμού μέσα στην επίχωση δεν θα επηρεάσει δυσμενώς την κατασκευή.

#### 4.4 Οχυρωματικά έργα τύπου ΙΙΙ

Για οχυρωματικά έργα με αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας και υψηλής προστασίας από μεγάλα διατρητικά όπλα, επιλέγεται η κατασκευή τους να γίνεται σύμφωνα με τον τύπο ΙΙΙ. Τέτοια έργα προτιμάται να κατασκευάζονται μέσα σε βραχώδεις σχηματισμούς, καθώς η κατασκευή τους μέσα σε εδαφικό υλικό, δεν προσφέρει καμία ουσιαστική επιπλέον προστασία σε σχέση με τα έργα τύπου ΙΙ, ενώ το αυξημένο κόστος που απαιτείται για την αντιστήριξη του εδάφους, καθιστά την κατασκευή αντιοικονομική ακόμα και σε σχέση με τη διάνοιξη σήραγγας μέσα σε βραχώδες υπόβαθρο (Μπουκοβάλας, 2008).

Η κάτοψη των έργων τύπου ΙΙΙ, χωρίζεται σε τρεις ζώνες. Η κάθε ζώνη έχει διαφορετική τρωτότητα σε ενδεχόμενο πλήγμα από κάποιο όπλο σχεδιασμού (Σχήμα 4.5).



**Σχήμα 4.5** Κάτοψη οχυρωματικού έργου τύπου ΙΙΙ (Πηγή: Μπουκοβάλας, 2008)

Η ζώνη Ι περιλαμβάνει τις περιοχές που βρίσκονται κοντά στις εξόδους της σήραγγας, οι οποίες είναι πιο τρωτές σε ενδεχόμενο χτύπημα του όπλου σχεδιασμού. Η ζώνη αυτή σχεδιάζεται όπως τα έργα τύπου Ι και ΙΙ, διότι στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται η κατασκευή πρόσθετων μέτρων προστασίας, κάτι που εξαρτάται από την τοπογραφία της περιοχής, αλλά και από την ποιότητα της βραχώμαζας. Συνήθως διαμορφώνεται με δεύτερη έξοδο σε μια ορισμένη απόσταση από την πρώτη.

Η ζώνη ΙΙ περιλαμβάνει την περιοχή από τη ζώνη Ι μέχρι το σημείο στο οποίο η κατασκευή βρίσκεται σε τέτοιο βάθος, όπου δεν είναι δυνατόν να πληγεί άμεσα από το όπλο σχεδιασμού. Οι διαστάσεις αυτής της περιοχής καθορίζονται από τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, από το όπλο σχεδιασμού και από τα υλικά επένδυσης της σήραγγας.

Η ζώνη ΙΙΙ περιλαμβάνει το κυρίως έργο και θεωρείται απρόσβλητη, καθώς εκτείνεται από πάνω της και σε πολύ μεγάλο ύψος ο όγκος της βραχώμαζας. Η μέθοδος κατασκευής του κυρίως έργου, αλλά και των σιράγγων ακολουθεί την τεχνική κατασκευής συνήθων σιράγγων σε βραχώδεις όγκους.

## **5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΝΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

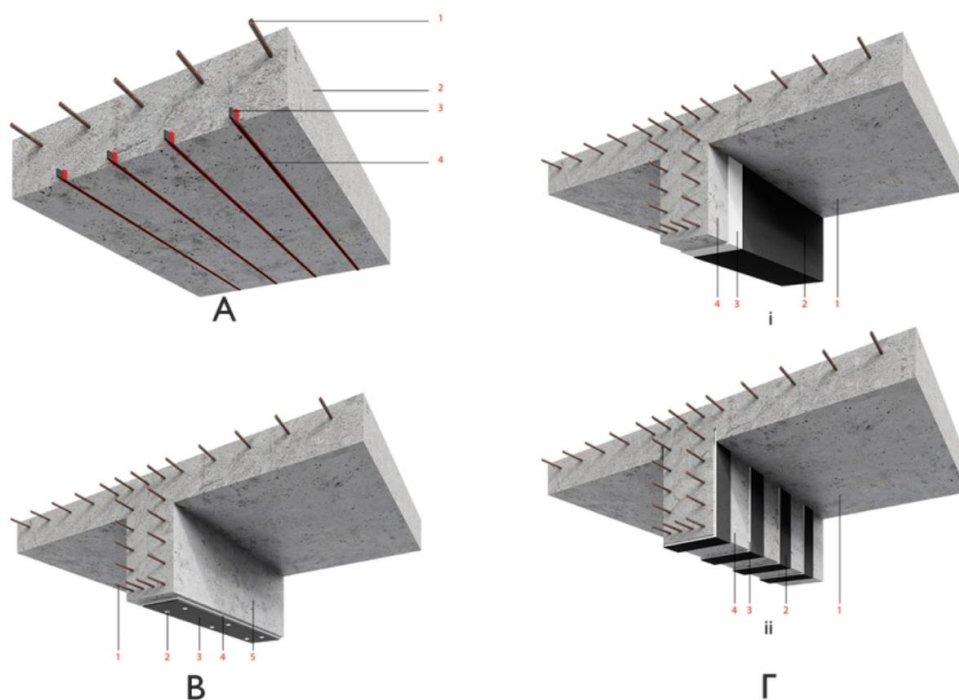
Η εφαρμογή νέων υλικών και τεχνολογίας, όπως σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ), παρασκευή ινοπλισμένων σκυροδεμάτων ή παρασκευή σκυροδεμάτων υψηλής και υπερ-υψηλής αντοχής, με την προσθήκη ειδικών προσμίκτων, διευκολύνει τη δημιουργία νέων τύπων προστασίας για νέα και υφιστάμενα οχυρωματικά έργα, ιδιαίτερα για κατασκευές υψηλής σπουδαιότητας και στρατηγικής σημασίας. Αυτά τα υλικά βρίσκουν εφαρμογή είτε σε ενισχύσεις επιφανειών υφιστάμενων έργων, είτε για την εξ' ολοκλήρου κατασκευή τους. Το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται είναι η αύξηση της αντοχής της κατασκευής, ώστε τα δομικά της στοιχεία να αποκριθούν επιτυχώς στη δράση του όπλου σχεδιασμού και να αποφευχθεί το ενδεχόμενο τραυματισμού του προσωπικού και καταστροφής του εξοπλισμού.

### **5.1 Σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ)**

Τα σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) είναι υλικά που αποτελούνται από ίνες γυαλιού, άνθρακα ή πολυαραμίδης εμποτισμένα με εποξικές ρητίνες. Τα τελευταία χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θωράκιση κατασκευών έναντι κρουστικών φορτίων. Τα ΙΟΠ συναντώνται με τη μορφή ελάσματος, υφάσματος ή ράβδου και συνδέονται εξωτερικά στα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής, μέσω συγκολλητικών ουσιών (π.χ. εποξικής κόλλας,) (Εικόνα 5.1). Είναι υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών. Απαραίτητη διαδικασία στην ορθή εφαρμογή του υλικού, είναι η κατάλληλη προετοιμασία και εξομάλυνση της επιφάνειας στην οποία θα συγκολληθεί το ΙΟΠ, καθώς η επιτυχημένη σύνδεση του σύνθετου υλικού με το ήδη υπάρχον σκυρόδεμα είναι καθοριστικής σημασίας, προκειμένου να ενισχυθεί επαρκώς η κατασκευή. Τα βασικά πλεονεκτήματα των ελασμάτων ΙΟΠ που εφαρμόζονται ως εξωτερικός οπλισμός σε στοιχεία σκυροδέματος είναι η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής των στοιχείων, η αντοχή τους σε διάβρωση, το χαμηλό κόστος, το μικρό ίδιο βάρος και η σχετικά απλή εφαρμογή τους ακόμα και σε δυσπρόσιτα σημεία της κατασκευής (Σπυράκος, 2004).

Η εφαρμογή σύνθετων πολυμερών σε δομικά στοιχεία οδηγεί στην αύξηση της περίσφιξης, της καμπτικής και διατμητικής αντοχής, καθώς και της αντοχής σε κρουστικά φορτία. Η περίσφιξη στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη φέρουσα ικανότητά τους, την ολκιμότητα, τη θλιπτική αντοχή, καθώς και να οδηγήσει σε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, περιορίζοντας ταυτόχρονα τον ρυθμό διαστολής του πυρήνα του σκυροδέματος. Ειδικότερα, η εφαρμογή πολυμερών με ίνες άνθρακα αυξάνει τη

φέρουσα ικανότητα των στοιχείων δύο φορές περισσότερο σε σχέση με τα πολυμερή με ίνες γυαλιού (Sruthi et al., 2023).



**Εικόνα 5.1** Εφαρμογές ενίσχυσης δομικών στοιχείων με ΙΟΠ (Πηγή: <https://www.ktirio.gr/>)

Επιπλέον, η εξωτερική επικόλληση με εποξειδική συγκόλληση, ινοπλισμένων πολυμερών με τη μορφή μανδύα, σε δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, αποτελούν μια πολύ αποτελεσματική τεχνική για την αύξηση της καμπτοδιατμητικής αντοχής τους, με ταυτόχρονη μείωση της παραμόρφωσης τους. Η αύξηση αυτή στην καμπτοδιατμητική αντοχή μπορεί να φτάσει και το 40% σε σχέση με τα στοιχεία που δεν ενισχύονται με μανδύες ΙΝΟ (Onal, 2009).

Αυτό που κυρίως ενδιαφέρει στον σχεδιασμό οχυρωματικών έργων, αφορά ενισχύσεις από ΙΟΠ έναντι κρουστικών και εκρηκτικών φορτίων. Η εξωτερική ενίσχυση με στρώσεις πολυμερών από ίνες άνθρακα, των δομικών στοιχείων που υπόκεινται σε κρουστικά φορτία, έχει βρεθεί ότι αυξάνει σημαντικά την ικανότητά τους να αντιστέκονται στο φορτίο κρούσης, μειώνοντας τις μέγιστες μετατοπίσεις. Η αύξηση της αντοχής εξαρτάται από τον τύπο, το βάρος και το πάχος των στρώσεων του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιείται (Tang and Saadatmanesh 2003).

Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι η ενίσχυση ενός στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ, προκαλεί ψαθυρή συμπεριφορά σε ενδεχόμενη αστοχία, καθώς μπορεί να αστοχήσει η διεπιφάνεια ΙΟΠ-σκυροδέματος ή ακόμα και το ίδιο το ΙΟΠ (Μπουκοβάλας, 2008).

## **5.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα**

Η προσθήκη ινών διαφόρων υλικών και κυρίως ινών χάλυβα και πολυπροπυλενίου στη μάζα του σκυροδέματος, έχει ευρεία εφαρμογή στην κατασκευή υπόγειων έργων, στην κατασκευή του πρώτου κελύφους στήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων, καθώς και σε εργασίες στήριξης πρανών. Στο εμπόριο οι ίνες οπλισμού διατίθενται σε ποικίλες μορφές και μεγέθη, αναλόγως την εκάστοτε χρήση. Συντελούν στη μείωση των ρηγματώσεων, στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας του σκυροδέματος και της εφελκυστικής του αντοχής, ενώ δεν αυξάνεται δραματικά η θλιπτική του αντοχή (Κομνηνού & Οικονόμου, 2015).

Σημαντική είναι και η αύξηση της αντοχής σε κρούση των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων σε σχέση με τα συμβατικά οπλισμένα σκυροδέματα. Η αύξηση της αντοχής εξαρτάται από την περιεκτικότητα, το είδος και τη μορφή των ινών, καθώς και από τον ρυθμό και την ταχύτητα του κρουστικού φορτίου. Καθώς ο όγκος των ινών στη μάζα του σκυροδέματος αυξάνεται, η αντοχή σε κρούση από την πρώτη ρωγμή έως την τελική θραύση αυξάνεται έως και 4 φορές σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Επιπλέον, έχει βρεθεί πειραματικά ότι οι χαλύβδινες ίνες προσφέρουν μεγαλύτερη αντίσταση σε κρούση, συγκριτικά με τις ίνες πολυπροπυλενίου. (Vairagade & Dhale, 2023).

Με την πάροδο των χρόνων, παρασκευάστηκαν σκυροδέματα με αρκετά αυξημένο ποσοστό ινών. Τα σκυροδέματα αυτά περιέχουν ίνες είτε σε μορφή πλέξης (SIFCON), είτε σε στρώσεις από σύρμα υψηλής αντοχής (SIMCON). Η περιεκτικότητα των ινών στο SIFCON κυμαίνεται μεταξύ 5–20%. Έχουν αυξημένη αντοχή σε κάμψη, σε θραύση και ολκιμότητα, ιδιότητες που ενισχύονται από τη συνδυασμένη χρήση ινών πολυπροπυλενίου και ινών χάλυβα. Βασικός παράγοντας κατά την παρασκευή τέτοιων σκυροδεμάτων είναι η προσθήκη κατάλληλων προσμίκτων, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η επιθυμητή εργασιμότητα του σκυροδέματος. (Ipek & Aksu, 2019).

## **5.3 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής**

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν ινοπλισμένα σκυροδέματα υπέρ-υψηλής αντοχής, με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, τα οποία είναι πολύ ανθεκτικά σε κρουστικά φορτία και

εκρήξεις και ως εκ τούτου μπορούν να συνεισφέρουν σε μεγαλύτερο βαθμό από τα συμβατικά σκυροδέματα στην προστασία των στρατιωτικών έργων. Χαρακτηρίζονται από την υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο (600–800 kg/m<sup>3</sup>), την πολύ χαμηλή αναλογία νερού/τσιμέντο (0,15-0,20), την προσθήκη πυριτικής παιπάλης ή ιπτάμενης τέφρας, τη σωστή κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών (μέγεθος κόκκου μεταξύ 150–8000μm), τη χρησιμοποίηση υπερρρευστοποιητών και την ενσωμάτωση ινών συνήθως από χάλυβα (1,5%-3% κατ' όγκο) (Yoo & Banthia, 2016).

Όπως προαναφέρθηκε, ένα από τα πλεονεκτήματα των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων υπέρ-υψηλής αντοχής είναι (εκτός από την αυξημένη αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη), η αντοχή του σε κρούση και διείσδυση, η οποία είναι σημαντικά πιο αυξημένη σε σχέση με το συμβατικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες χάλυβα, μειώνεται αρκετά η ρευστότητα και η εργασιμότητα του σκυροδέματος, πρόβλημα το οποίο οξύνεται με τη χρησιμοποίηση μη ευθύγραμμων χαλύβδινων ινών, όπως είναι κυματοειδείς ή με άγκιστρα στις άκρες. Ωστόσο, για αναλογία χαλύβδινων ινών 1,5% κατ' όγκο, παρατηρείται μια αύξηση κατά 50% στην αντοχή σε κρούση (Das & Nanthagopalan, 2022).

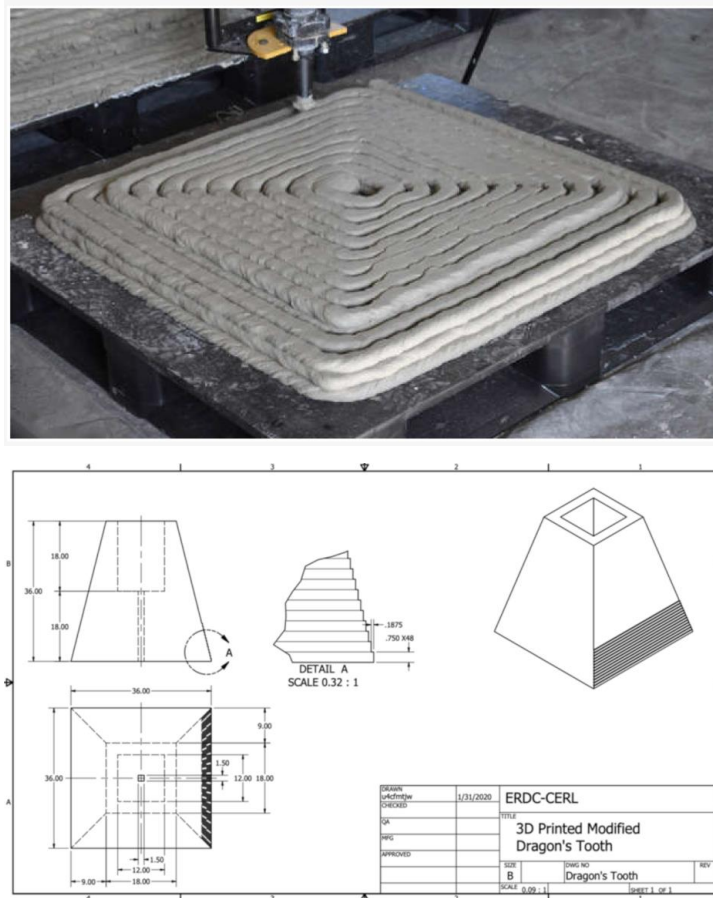
Η αντοχή που αναπτύσσεται σε κρούση, εξαρτάται από την περιεκτικότητα, τον προσανατολισμό, το μέγεθος και το σχήμα των ινών. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε χαλύβδινες ίνες, επιφέρει αύξηση της φέρουσας ικανότητας, καθώς οι ίνες αντιστέκονται στο σχηματισμό ρωγμών. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες με αγκιστρωμένα άκρα έχουν μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα συγκριτικά με τις ευθείες ή τις κυματοειδείς, ενώ ο σωστός προσανατολισμός των ινών επιδρά ευεργετικά στην καμπτική αντοχή των δομικών στοιχείων (Wu et al., 2016).

Η χρήση σκυροδέματος υπέρ-υψηλής αντοχής σε κατασκευές που υπόκεινται σε κρουστικά φορτία, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του βάθους διείσδυσης του βλήματος σχεδιασμού στα δομικά στοιχεία της κατασκευής, καθώς και της διαμέτρου του κρατήρα που δημιουργείται λόγω της άμεσης κρούσης. Μάλιστα η αύξηση της κατ' όγκου αναλογίας των χαλύβδινων ινών, προκαλεί αύξηση της αντίστασης σε διείσδυση του βλήματος, ενώ σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση του βάθους διείσδυσης αποτελεί η ταχύτητα κρούσης, το σχήμα του βλήματος, καθώς και το υλικό κατασκευής του (Tai, 2009).

#### 5.4 Εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης σε στρατιωτικά έργα

Η τεχνολογία της ψηφιακής κατασκευής, που αναφέρεται ευρέως ως τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι μια ταχέως αναδυόμενη τεχνολογία, η οποία έχει εφαρμογή σε πολλούς επιστημονικούς και τεχνολογικούς τομείς, μεταξύ αυτών και ο τομέας των κατασκευών. Η εισαγωγή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα των κατασκευών, εισήγαγε νέες δυνατότητες στην κατασκευή τόσο των πολιτικών όσο και των στρατιωτικών έργων εκστρατείας στο πεδίο.

Τον Νοέμβριο του 2019, το προσωπικό των Αμερικανών Πεζοναυτών, της Πολεμικής Αεροπορίας και του Σώματος Μηχανικών Στρατού των Η.Π.Α., εφάρμοσαν την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, προκειμένου να κατασκευάσουν αντιαρματικά εμπόδια, χρησιμοποιώντας έναν ειδικό εκτυπωτή και ένα εμπορικά διαθέσιμο κονίαμα (Εικόνα 5.2). Η κατασκευή αποδείχθηκε ότι ήταν ταχύτερη, ασφαλέστερη και απαιτήθηκε λιγότερο προσωπικό. Το μειονέκτημα της μεθόδου ήταν το πρόσθετο κόστος λόγω της προμήθειας του εμπορικού κονιάματος και η υλικοτεχνική επιβάρυνση της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Jagoda et al, 2020).



**Εικόνα 5.2** Κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωμένου αντιαρματικού (Πηγή: Jagoda et al, 2020)



Το Εργαστήριο Ερευνών Μηχανικών Κατασκευών του Στρατού των Η.Π.Α. (CERL) εκτυπώνει τρισδιάστατες κατασκευές με σκυρόδεμα από το 2015. Το εγχείρημα ξεκίνησε με μια απλή θέση μάχης και μία αποθήκη και το 2018 εκτύπωνε τρισδιάστατους στρατώνες με μόνο 10%-15% περισσότερο σκυρόδεμα (Εικόνα 5.3). Στη συνέχεια, κατασκεύασαν την πρώτη πεζογέφυρα από οπλισμένο σκυρόδεμα με τρισδιάστατη εκτύπωση πλάτους περίπου ενός μέτρου, ενώ το εργαστήριο έχει καταρτίσει ήδη τα σχέδια για τη δημιουργία της πρώτης τρισδιάστατης εκτυπωμένης γέφυρας οχημάτων στον κόσμο. Φαίνεται ότι η εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας μπορεί να έχει εφαρμογή και σε πιο απαιτητικές κατασκευές, αναφορικά με την ασφάλειά τους, μέσα σε πιο επικίνδυνα περιβάλλοντα (Hambling, 2021).



**Εικόνα 5.3** Κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωμένου στρατώνα (Πηγή: <https://www.erdc.usace.army.mil>)

## 6. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ΟΧΥΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΞΑ (1936-1941)

### 6.1 Γενικά

Την περίοδο μεταξύ των δύο παγκοσμίων πολέμων, η κατασκευή οχυρώσεων βρισκόταν σε πλήρη εξέλιξη στην Ευρώπη. Η Ελλάδα δεν αποτέλεσε εξαίρεση, καθώς κατά την περίοδο 1936-1941 κατασκευάστηκαν κατά μήκος των βόρειων ορεινών συνόρων με τη Βουλγαρία, μια σειρά από οχυρωματικά έργα, η οποία ονομάστηκε "Γραμμή Μεταξά" από τον εμπνευστή της, τον τότε πρωθυπουργό Ιωάννη Μεταξά και αποτέλεσε τη μεγαλύτερη οχυρωματική γραμμή που κατασκευάστηκε στην Ελλάδα τον 20<sup>ο</sup> αιώνα (Kupka, 2001).

Η σχέση της Ελλάδας με τη Βουλγαρία, με την οποία είχε και τα μεγαλύτερα χερσαία σύνορα συνολικού μήκους τριακοσίων χιλιομέτρων, ήταν αρκετά τεταμένη πριν από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Οι εδαφικές απαιτήσεις της Βουλγαρίας για ελληνικά εδάφη που είχε χάσει κατά τους Βαλκανικούς Πολέμους και η απειλή μιας ξαφνικής εισβολής που ίσως λάμβανε χώρα, ώθησαν την ελληνική πλευρά να προχωρήσει στην κατασκευή στρατιωτικών οχυρωματικών έργων, προκειμένου να αυξηθεί η προστασία των βόρειων συνόρων της και κατ' επέκταση η ασφάλεια των αστικών κέντρων της Ανατολικής Μακεδονίας. Πρωτεύον καθήκον της οχυρωματικής γραμμής ήταν εκτός από την ασφάλεια των ελληνικών συνόρων από αιφνιδιαστική εισβολή από το βουλγαρικό έδαφος και η απρόσκοπτη κίνηση των ελληνικών ενόπλων δυνάμεων και η είσοδός τους στις καθορισμένες τοποθεσίες. Λόγω των μεγάλων αποστάσεων από το εσωτερικό τμήμα της χώρας και από τα νησιά, της μικρής πληθυσμιακής πυκνότητας και του ανύπαρκτου σχεδόν δικτύου συγκοινωνίας, η διαδικασία επιστράτευσης σε περίπτωση σύρραξης απαιτούσε αρκετό χρόνο, κατά τον οποίο, χωρίς την ύπαρξη οχυρώσεων, ο επιτιθέμενος μπορούσε να προχωρήσει σε σημαντικό βάθος στο ελληνικό έδαφος (Kupka, 2001).

Έτσι αποφασίστηκε το 1935 να κατασκευαστεί μια σειρά από μόνιμα οχυρωματικά έργα κατά μήκος των συνόρων με τη Βουλγαρία, τα οποία θα εκτείνονταν από το όρος Μπέλες (Κερκίνη) της Δυτικής Μακεδονίας μέχρι την Κομοτηνή. Κατά μήκος της γραμμής, οι σημαντικότερες θέσεις έπρεπε να προστατεύονται από μόνιμες οχυρώσεις και οι λιγότερο σημαντικές από ημιμόνιμες κατασκευές. Τα έργα αυτά αποτελούνταν κυρίως από υπόγειες σήραγγες με εγκαταστάσεις υποστήριξης (θάλαμοι οπλιτών και αξιωματικών, γραφεία διοίκησης, ιατρεία, χώροι υγιεινής, μαγειρεία, συστήματα αερισμού, δεξαμενές νερού κ.α.), επιφανειακά έργα

βολής και παρατήρησης (παρατηρητήρια, πολυβολεία, ολμοβολεία κ.λπ.), καθώς και αντιαρματικά κωλύματα, όπως τάφροι ή αντιαρματικές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Επιχειρησιακά, το σημαντικότερο τμήμα της Γραμμής Μεταξά, ο λεγόμενος πυρήνας, οριζόταν από τους ποταμούς Στρυμόνα και Νέστο, όπου βρίσκονταν οι δύο πιο εύκολα προσπελάσιμοι "δρόμοι" που οδηγούσαν από το βουλγαρικό στο ελληνικό έδαφος και περνούσαν μέσα από το στενό του Ρούπελ και από το Κάτω Νευροκόπι. Για τον λόγο αυτό, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν εδώ οι δύο μεγαλύτερες οχυρώσεις, ενώ οι ενδιάμεσες περιοχές έπρεπε να προστατεύονται, ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους, από διάσπαρτες μόνιμες και ημιμόνιμες κατασκευές (Kurka, 2001). Εκτός από την κύρια αμυντική γραμμή κοντά στα σύνορα, επρόκειτο επίσης να κατασκευαστούν ορισμένες οπίσθιες θέσεις, προκειμένου να σταματήσουν τις εχθρικές δυνάμεις που θα κατάφερναν να διεισδύσουν πιο βαθιά στο ελληνικό έδαφος.

Συνολικά κατασκευάστηκαν 21 οχυρωματικά έργα, αποκλειστικά από Έλληνες μηχανικούς και εργάτες (Εικόνα 6.1), σε μια γραμμή μήκους περίπου 350 χιλιομέτρων, μέσα σε χρονικό διάστημα μόλις τεσσάρων ετών. Διανοίχτηκαν συνολικά 174χλμ οδικού δικτύου, ενώ οι υπόγειες και οι επιφανειακές εκσκαφές ανέρχονται σε 900.000κ.μ. Επιπλέον, κατασκευάστηκε, σε κοντινή απόσταση από τις εκβολές του Στρυμόνα, λιμάνι που διέθετε τέσσερις προβλήτες για τη φορτοεκφόρτωση υλικών και μεταφορά εργατών από τη νησιωτική και νότια Ελλάδα (Εικόνα 6.2). Τα έργα περιλάμβαναν 650 επιφανειακά έργα, 13.000μ. υπόγειων καταφυγίων και 24.000μ. υπόγειων διαδρόμων συγκοινωνίας. Κατασκευάστηκαν 14.000μ. εσωτερικού δικτύου ύδρευσης και 74.000μ. εξωτερικού δικτύου, 24.000μ. δικτύου αποχέτευσης, 17.000μ. αγωγών εξαερισμού, ενώ χρησιμοποιήθηκαν 110.000μ. υπόγειων εσωτερικών καλωδίων διαβιβάσεων και 119.000μ. εξωτερικών. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν 66.000 τόνοι τσιμέντου, 158.000μ<sup>3</sup> σκύρων, 80.000μ<sup>3</sup> άμμου, 4.000 τόνοι θηραϊκής γης και 12.000 τόνοι σιδήρου. Συνολικά παρασκευάστηκαν 180.000μ<sup>3</sup> σκυροδέματος. Το συνολικό κόστος κατασκευής άγγιξε το 1,50δισ δραχμές, από τα οποία το 68,28% αντιστοιχεί στην εργολαβική εργασία και το 31,72% σε υλικά και γενικά έξοδα (Τάσιος, 2002).





### ΟΧΥΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ «ΜΕΤΑΞΑ»

1. Ποποτλίβιτσα , 2. Ιστίμπεη, 3. Κελκαγιά, 4. Αρπαλούκι, 5. Παληουριώνες, 6. Ρούπελ , 7. Καρατάς,
8. Κάλη, 9. Περσέκ, 10. Μπαμπαζώρα, 11. Μαλιάγκα, 12. Περιθώρι, 13. Παρταλούσκα, 14. Ντασαβλή,
15. Λίσσε, 16. Πυραμοειδές, 17. Καστίλλο, 18. Άγιος Νικόλαος , 19. Μπαρτίσεβα, 20. Εχίνος,
21. Νυμφαία

**Εικόνα 6.1** Οχυρά Γραμμής Μεταξά (Πηγή: [www.slideplayer.gr](http://www.slideplayer.gr))





**Εικόνα 6.2** Λιμάνι στις εκβολές του ποταμού Στρυμόνα (Πηγή: [www. www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org))

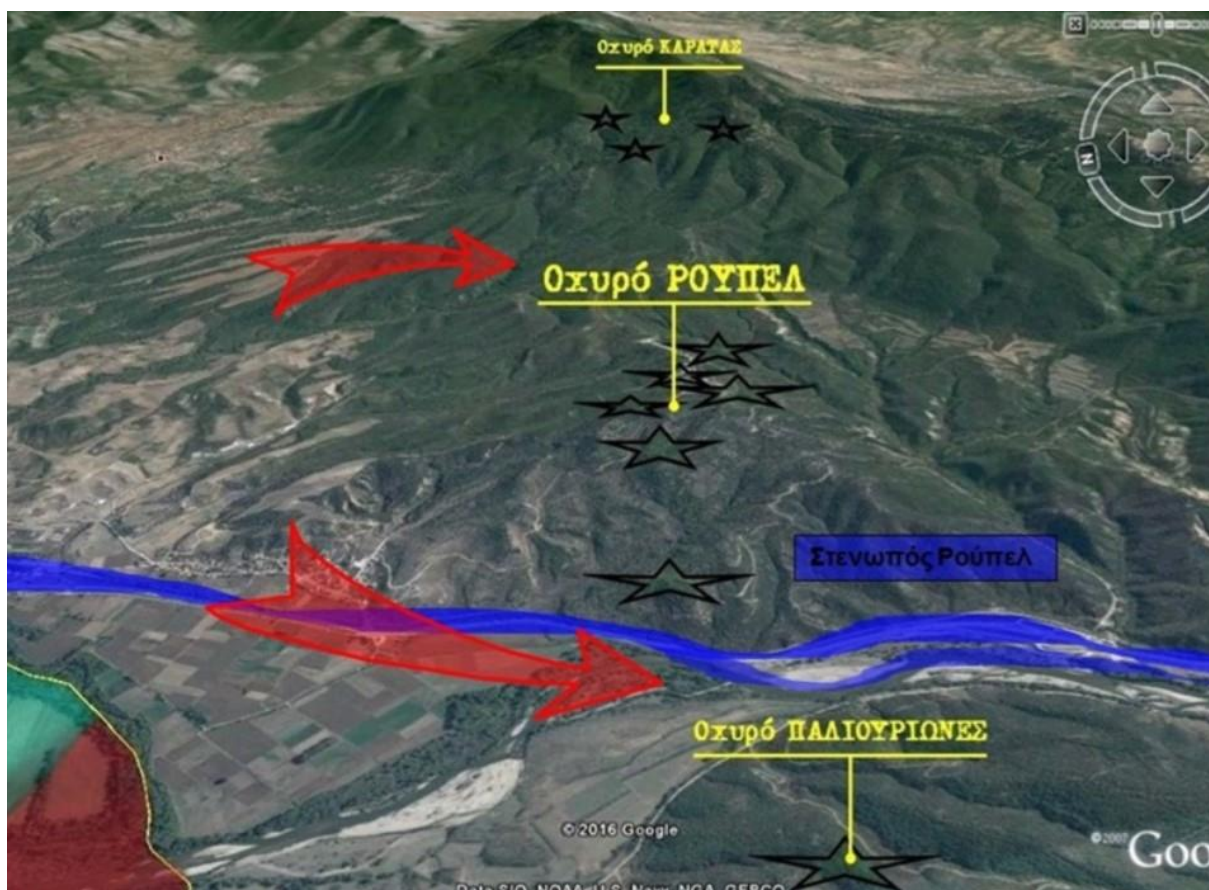
Αξίζει να αναφερθεί, ότι το 1941 στο Γερμανικό Προξενείο Θεσσαλονίκης, ξεκίνησαν εργασίες καταγραφής και μελέτης της οχυρωματικής γραμμής Μεταξά από αξιωματικούς του Γερμανικού Στρατού, καθώς τους έκανε εντύπωση η ανθεκτικότητα και η αντοχή που εμφάνισαν τα εν λόγω έργα εν μέσω ανελέητων βομβαρδισμών. Έτσι, το 1942 ολοκληρώθηκε το «Μνημόνιο Ελληνικής Οχύρωσης», το οποίο αποτελεί μέχρι και σήμερα τη μόνη πηγή αναλυτικής περιγραφής των κατασκευαστικών λεπτομερειών των οχυρωματικών έργων της Γραμμής Μεταξά (Denkschrift über die Griechische Landesbefestigung, 1942). Επιπλέον, το 2006 συστάθηκε η Εταιρεία Μελέτης Οχυρωματικής Γραμμής Μεταξά «Γοργύρα», η οποία αποτελείται από ιστορικούς, αρχιτέκτονες, πολιτικούς μηχανικούς και άλλες ειδικότητες επιστημόνων και εργάζεται μεθοδικά, προκειμένου να αποτυπωθούν και να αναδειχτούν όλες οι κατασκευές που αποτελούν την «Οχυρωματική Γραμμή Μεταξά» και να διατηρηθεί μέσω αυτής η ιστορική μνήμη της. ([www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org)).

## 6.2 Τοπογραφία περιοχής

Τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα διατρέχουν δύο σημαντικοί ορεινοί όγκοι, το όρος Μπέλες ή Κερκίνη δυτικά και η οροσειρά της Ροδόπης ανατολικά. Οι κορυφές τους ξεπερνούν σε πολλά σημεία το υψόμετρο των 2.000 μέτρων και καλύπτονται κυρίως από μια σχεδόν αδιαπέραστη θαμνώδη βλάστηση, αλλά χωρίς μεγάλους δασικούς όγκους. Επιπλέον, τη συνοριακή γραμμή των δύο κρατών διασχίζουν δύο μεγάλα υδάτινα ρεύματα, οι ποταμοί Νέστος στα ανατολικά και ο Στρυμόνας στα δυτικά. Η κύρια οδός επικοινωνίας της βόρειας Ελλάδας με τη Βουλγαρία,

περνάει από την πλατιά κοιλάδα του ποταμού Στρυμόνα στο πέρασμα του Ρούπελ, ενώ χερσαίες συνδέσεις με το βουλγαρικό έδαφος υπάρχουν επίσης στο Νευροκόπι, στην Ξάνθη και στην Κομοτηνή, ενώ εκείνη την εποχή δεν υπήρχε σιδηροδρομική σύνδεση μεταξύ των δύο κρατών.

Ο μεγαλύτερος επιθετικός άξονας εισβολής στην Ελλάδα από τον βορρά υλοποιείται κατά μήκος της κοιλάδας του ποταμού Στρυμόνα. Η διαδρομή που ακολουθεί ο Στρυμόνας, είναι η συντομότερη οδός από τη Σόφια έως το Αιγαίο Πέλαγος όπου εκβάλλει. Καθώς ο Στρυμόνας ρέει από τον βορρά προς τον νότο, μεταξύ των ορεινών όγκων Μπέλες και Άγκιστρο, σχηματίζεται η στενωπός Ρούπελ, η οποία βρίσκεται στον νομό Σερρών, έχει μήκος περίπου 10 χιλιόμετρα και μέγιστο πλάτος 2 χιλιόμετρα. Προκειμένου να προστατευτεί η στενωπός Ρούπελ και να αποκλειστεί ένα ενδεχόμενο εχθρικό πέρασμα προς τον νότο από αυτό το σημείο αποφασίστηκε να κατασκευαστούν εκεί δύο οχυρά, το οχυρό Ρούπελ και το οχυρό Παλιουριώνες (Εικόνα 6.3) ([www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org))



**Εικόνα 6.3** Οχύρωση στενωπού Ρούπελ (Πηγή: [www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org))



Ο δεύτερος μεγαλύτερος επιθετικός άξονας εισβολής μετά τη στενωπό Ρούπελ, αποτελεί το οροπέδιο του Κάτω Νευροκοπίου, το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο 545 μέτρων και απέχει 12 χιλιόμετρα περίπου από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα. Πρόκειται για πεδιάδα επιφάνειας περίπου 64km<sup>2</sup>, που παρέχει μικρή κάλυψη κυρίως από μικρούς θάμνους και συστάδες δέντρων με μοναδικό ύψωμα έναν βραχώδη όγκο με επιφάνεια ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου, στη βάση του οποίου βρίσκεται το χωριό Οχυρό. Ενδεχόμενο εχθρικό πέρασμα από το οροπέδιο του Κάτω Νευροκοπίου θα σήμαινε απώλεια των πόλεων της Δράμας και της Καβάλας, ενώ θα διέτρεχε σοβαρό κίνδυνο κατάληψης και η Θεσσαλονίκη. Έτσι, για την προστασία της περιοχής κατασκευάστηκαν έξι οχυρά, το οχυρό Μάλιαγκα, το Περιθώρι, το Παρταλούσκα, το Ντάσαβλη, το Λίσσε και το Πυραμιδοειδές (Εικόνα 6.4) ([www.metaxaline.org](http://www.metaxaline.org))



**Εικόνα 6.4** Οχύρωση οροπεδίου Κάτω Νευροκοπίου (Πηγή: [www.metaxaline.org](http://www.metaxaline.org))

Η πόλη της Θεσσαλονίκης εξασφαλίζεται βόρεια από το όρος Μπέλες, το οποίο αποτελεί φυσικό εμπόδιο εισβολής από τον βορρά, εκτείνεται από τη λίμνη Δοϊράνη μέχρι τον ποταμό Στρυμόνα και αποτελεί φυσικό σύνορο της Ελλάδας με τη Βουλγαρία. Πρόκειται για ορεινό όγκο με απότομες απολήξεις (κυρίως για 25 χιλιόμετρα δυτικά μέχρι το Τριεθνές), όπου δεν είναι δυνατή η κατασκευή οχυρώσεων αλλά ούτε και η κίνηση αρμάτων. Ανατολικά για να αποφευχθεί είσοδος από βορρά προς το Νέο Πετρίτσι κατασκευάστηκαν τέσσερα οχυρά, το οχυρό Ποποτλίβιτσα, το Ιστίμπεη, το Κέλχαγια και το Αρπαλούκι ([www.metaxaline.org](http://www.metaxaline.org))



Από τα σύνορα με τη Θράκη, μια ενδεχόμενη εχθρική εισβολή θα περνούσε είτε από τον Εχίνο, είτε από τη Νυμφαία, που βρίσκονται βόρεια της Ξάνθης και της Κομοτηνής αντίστοιχα. Από εκεί, μέσω της Νέας Καρβάλης ή του ποταμού Νέστου, οι εχθρικές δυνάμεις θα μπορούσαν να κινηθούν δυτικά και να απειλήσουν την πόλη της Καβάλας και στη συνέχεια την πόλη της Θεσσαλονίκης. Σε αυτά τα δύο περάσματα αποφασίστηκε να κατασκευαστούν δύο οχυρά, το οχυρό Εχίνος και το οχυρό Νυμφαία ([www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org))

Τα υπόλοιπα οχυρά κατασκευάστηκαν σε άλλες πιθανές διαβάσεις κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων, όπως είναι η διάβαση της Κάλη που βρίσκεται σε ένα ημιορεινό πέραςμα στο όρος Άγκιστρο, η στενωπός Βαθύτοπου που οδηγεί στο Σιδηρόκαστρο και η λεκάνη του Βόλακα που βρίσκεται σε υψόμετρο 830 μέτρων, απέχει 20 χιλιόμετρα από το Κάτω Νευροκόπι και οδηγεί στη Δράμα ([www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org))

### 6.3 Σχεδιασμός

Η προετοιμασία της κατασκευής των έργων ξεκίνησε το 1935. Τότε ιδρύθηκε η "Κεντρική Επιτροπή Οχύρωσης" και υπό την ηγεσία του Συνταγματάρχη Μηχανικού Στρίμπερ καθορίστηκαν οι τοποθεσίες κατασκευής των οχυρώσεων, καθώς και οι τεχνικές λεπτομέρειες για την κατασκευή τους (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1956). Προτάθηκε από την επιτροπή η κατασκευή δύο οχυρών στην κοιλάδα του Στρυμόνα, πέντε στο οροπέδιο του Κάτω Νευροκοπίου, αντίστοιχα έργα στην περιοχή του ποταμού Νέστου, ένα οχυρό στην Ξάνθη και ένα στην Κομοτηνή. Αναζητήθηκαν τα πιο ευνοϊκά σημεία προκειμένου να κατασκευαστούν πολυβολεία, έτσι ώστε να αναπτυχθεί στο έπακρο το μέγιστο βεληνεκές των όπλων, ενώ κρίθηκε πολύ σημαντικό θέμα η συνεχής παρατήρηση και για τον σκοπό αυτό αποφασίστηκε η κατασκευή ενός σημαντικού αριθμού παρατηρητηρίων.

Μια από τις κυριότερες απαιτήσεις, ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού των έργων, ήταν η βελτιστοποίηση της φυσικής αμυντικής δύναμης του εδάφους στο οποίο επρόκειτο να κατασκευαστούν (Kupka, 2001). Αυτό σήμαινε ότι τα επιμέρους έργα των οχυρώσεων έπρεπε να ταυτίζονται όσο το δυνατόν περισσότερο με το ορεινό ανάγλυφο, να ελαχιστοποιηθούν οι δρόμοι πρόσβασης σε αυτά και να χρησιμοποιηθούν όλα τα φυσικά εμπόδια, όπως βαλτώδη εδάφη και ποτάμια, ώστε να μειωθεί η κατασκευή τεχνητών οδοφραγμάτων, τουλάχιστον στο μεγαλύτερο τμήμα της γραμμής των οχυρών. Δεδομένου ότι οι συνθήκες του εδάφους καθιστούσαν εξαιρετικά δύσκολη έως αδύνατη την κίνηση μηχανοκίνητων μονάδων του

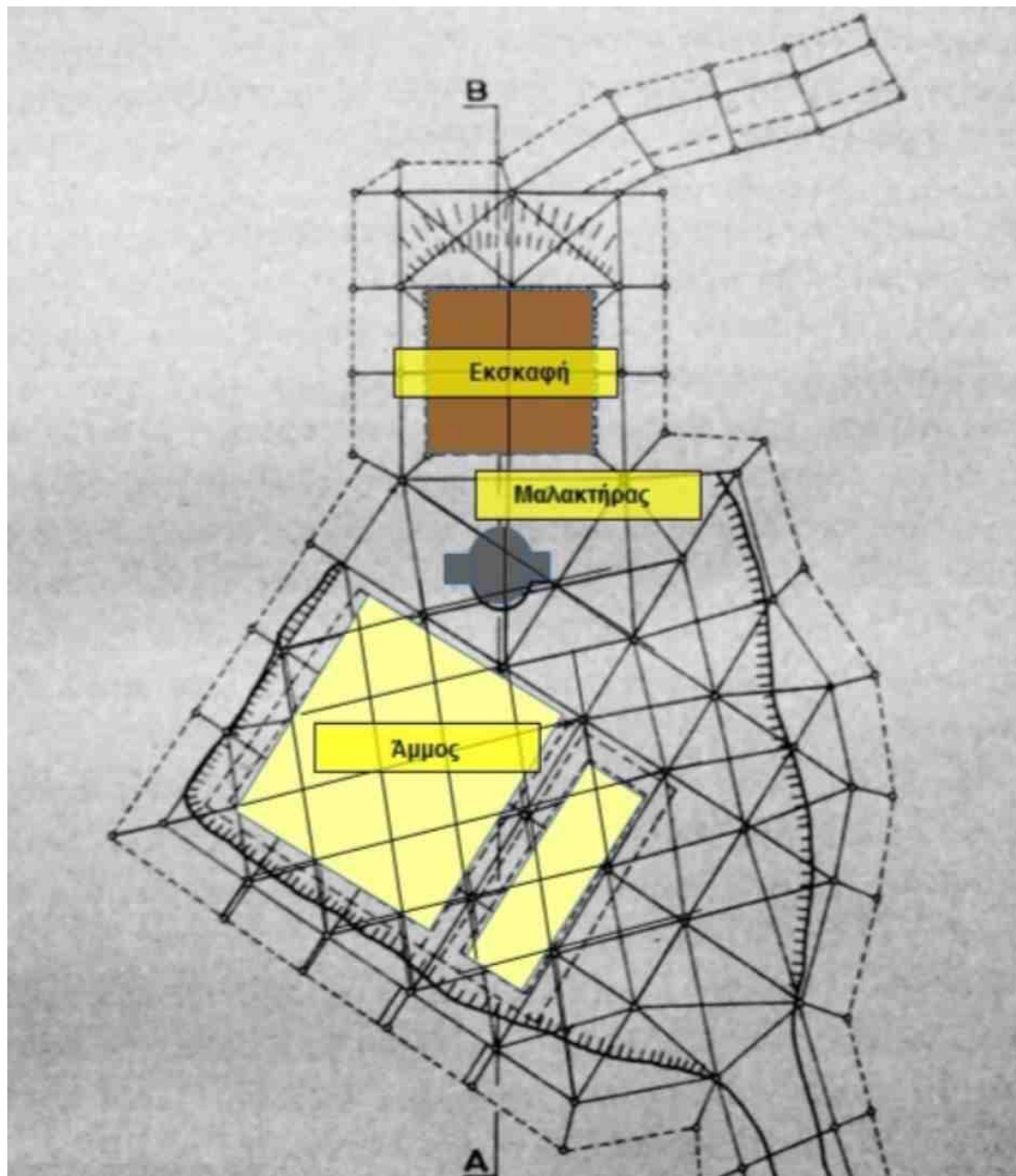
εχθρού μέσα στο ελληνικό έδαφος, καθώς το οδικό δίκτυο έως τότε ήταν σχεδόν ανύπαρκτο, αυτός ο στόχος επιτεύχθηκε σε πολύ μεγάλο βαθμό.

Παράλληλα, συγκροτήθηκε η "Διοίκηση Φρουρίου Θεσσαλονίκης", στην οποία ανατέθηκε από το Γ.Ε.Σ. η αποστολή της κατασκευής των οχυρωματικών έργων, ενώ η διαχείριση και ο έλεγχος προόδου των οικοδομικών εργασιών, ελεγχόταν από αξιωματικούς του Μηχανικού μέσα σε κάθε μεμονωμένο εργοτάξιο. Αρχικά, εκπονήθηκαν μελέτες σχετικά με το οδικό δίκτυο που θα διευκόλυνε την πρόσβαση στις περιοχές των εργοταξίων, διότι παρουσιάστηκαν σημαντικά προβλήματα κατά την μεταφορά δομικών υλικών από τα νότια τμήματα της χώρας στα βόρεια σύνορα. Κατόπιν οργανώθηκαν τα εργοτάξια και καθορίστηκαν οι τοποθεσίες λήψης νερού και αδρανών υλικών. Τον Ιούνιο του 1936 ξεκίνησε η εκτέλεση των εργασιών σε εννέα οχυρά, ενώ μετά την άνοιξη του 1937 κανονικοποιήθηκε ο ρυθμός κατασκευής των έργων, λόγω απόκτησης της απαραίτητης εμπειρίας (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1956).

Η κατασκευή των οχυρών έγινε με απόλυτη μυστικότητα, καθώς δεν εντοπίστηκαν και δεν συλλέχθηκε καμία πληροφορία ούτε από τη βουλγάρικη αλλά ούτε και από τη γερμανική κατασκοπεία. Σε αυτό συνετέλεσε το σχέδιο που εκπονήθηκε τόσο για την απόκρυψη υλικών όσο και των εργοταξίων τα οποία διακρίνονταν με δυσκολία ακόμα και από τον αέρα. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται ο σχεδιασμός ενός σκέπαστρου κάλυψης εργοταξίου.

Το 1938, ελληνική αντιπροσωπεία της Κεντρικής Επιτροπής Οχύρωσης πραγματοποίησε εκπαιδευτική επίσκεψη σε έργα της οχυρωματικής Γραμμής Μαζινό στη Γαλλία, στην κατασκευή της οποίας εφαρμόστηκε από τη Γαλλική Κυβέρνηση η τελευταία τεχνολογία της εποχής εκείνης σε θέματα οχυρώσεων. Μετά από αυτή την επίσκεψη αναθεωρήθηκαν κάποια κατασκευαστικά ζητήματα και καθορίστηκαν νέες οδηγίες σχεδιασμού από το ΓΕΣ, όπως για παράδειγμα η κατάργηση των χαρακωμάτων, η υπόγεια σύνδεση όλων των επιμέρους κατασκευών που συγκροτούν το συνολικό οχυρωματικό έργο, η ενίσχυση με χαλύβδινο πλέγμα των φατνωμάτων των επιφανειακών έργων βολής κ.α. Επίσης, αναθεωρήθηκε και η ποιότητα του σκυροδέματος, που ενώ αρχικά είχε προκριθεί η άποψη να χρησιμοποιηθεί ένα πολύ στεγνό μείγμα με πολύ μικρό λόγο νερού/τσιμέντο, τελικά επικράτησε η άποψη να κατασκευαστεί ένα πιο ρευστό μείγμα ανάλογης πλαστιμότητας, καθώς στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν διαπίστωσαν ότι το αρχικό μείγμα ήταν αρκετά πορώδες, ενώ δεν γέμιζε τις περιοχές με πυκνό οπλισμό (Γκιρμπάτσης, 2018). Η μελέτη σύνθεσης, οι κανόνες όπλισης και ο έλεγχος ποιότητας του σκυροδέματος εκπονήθηκαν από μηχανικούς του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, οι

οποίοι συνέβαλαν σε πολύ μεγάλο βαθμό στην υλοποίηση του έργου και ιδιαίτερα ο καθηγητής οπλισμένου σκυροδέματος Περικλής Παρασκευόπουλος.



**Σχήμα 6.1** Σκέπαστρο κάλυψης εργοταξίου (Πηγή: ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987)

Τέλος, η επιτροπή αναθεώρησε και τα βάθη κατασκευής των υπόγειων έργων, τα οποία θα έπρεπε να προστατεύονται πλήρως από τη διείσδυση των βλημάτων, καθώς πέρα από την ασφάλεια της ζωής του προσωπικού, οι δυνατές εκρήξεις και οι δονήσεις του εδάφους από βομβαρδισμούς είχαν σοβαρό αντίκτυπο στο νευρικό σύστημα των ανθρώπων που επιχειρούσαν μέσα σε αυτά (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Έτσι αποφασίστηκε τα προστατευτικά εδαφικά πάχη πάνω από υπόγειες κατασκευές να αυξηθούν κατά τρία μέτρα για τα κοινά εδάφη, ενώ

αντίστοιχα και αναλογικά αυξήθηκαν τα προστατευτικά πάχη που αφορούσαν σε συνεκτικά εδάφη και μαλακό ή σκληρό βράχο.

### **6.3.1 Όπλο σχεδιασμού και διαστασιολόγηση**

Εξετάζοντας αρχικά οι αξιωματικοί του Μηχανικού και οι Καθηγητές του Πολυτεχνείου τη δομή και τη μορφή που θα έπρεπε να έχει η ελληνική οχύρωση, τέθηκαν δύο βασικές παράμετροι σχεδιασμού, οι οποίες ήταν καθοριστικές για την ανθεκτικότητα των κατασκευών. Οι παράμετροι αυτές ήταν αφενός ο τρόπος εκδήλωσης της ενέργειας ενός βλήματος κατά την κρούση του πάνω σε ένα επιφανειακό έργο και αφετέρου τα αποτελέσματα της ενέργειας αυτής πάνω στις επιφανειακές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, λόγω της ύπαρξης των ράβδων οπλισμού (Γκιρμπάτσης, 2024).

Διαπιστώθηκε ότι η ενέργεια του βλήματος το οποίο προσπίπτει πάνω σε μία επιφάνεια, εκδηλώνεται σε τρία διαδοχικά στάδια: κρούση, διείσδυση και έκρηξη (Τάσιος, 2002). Οι συνέπειες των τριών παραπάνω σταδίων πάνω σε μια κατασκευή είναι ανάλογη του μεγέθους του βλήματος. Κατόπιν δοκιμών, διαπιστώθηκε επίσης, ότι η μόνη αντίδραση κατά της τεράστιας δύναμης πρόσκρουσης και εν συνεχεία της διείσδυσης του βλήματος, προέρχεται κυρίως από τη μάζα του σκυροδέματος, αφού καμία ράβδος οπλισμού δεν μπορεί να αντισταθεί ουσιαστικά. Επιπλέον, οι κραδασμοί λόγω της κρούσης ήταν πιο έντονοι στις ράβδους οπλισμού οι οποίοι λειτουργούν ως αγωγοί μετάδοσης των κραδασμών στην κατασκευή. Έτσι έπρεπε να εξεταστεί η σωστή όπλιση του σκυροδέματος, ώστε τα δύο υλικά να συνεργάζονται επιτυχώς, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη ανθεκτικότητα των επιφανειακών κατασκευών έναντι κρουστικών φορτίων.

Επομένως, αποφασίστηκε ότι το σκυρόδεμα θα πρέπει να απορροφά το σύνολο της κρουστικής ενέργειας με όσο το δυνατόν πιο χαμηλά επίπεδα βλάβης και η επιφανειακή του ζώνη να μπορεί αποτρέπει τη διείσδυση του βλήματος. Από την άλλη, ο οπλισμός θα πρέπει να παρέχει τη μέγιστη ενίσχυση των επιφανειακών κατασκευών, χωρίς όμως να ενισχύει τους κραδασμούς που προέρχονται από την κρούση του βλήματος. Έτσι αποφασίστηκε η όπλιση να ακολουθεί το γαλλικό πρότυπο και οι ράβδοι χάλυβα να είναι πυκνές, λεπτές, διαταγμένες στις τρεις διαστάσεις και ασύνδετες μεταξύ τους (Γκιρμπάτσης, 2018). Σύμφωνα με τον Τάσιο (2002), η επιτροπή των Καθηγητών του Ε.Μ.Π. και των Αξιωματικών, που μελέτησε και αποφάσισε τον συγκεκριμένο τρόπο όπλισης, καινοτόμησε διότι εφηύρε κατά κάποιον τρόπο το ινοπλισμένο σκυρόδεμα τριάντα χρόνια πριν την σύλληψή του σε Ευρώπη και Αμερική.

Κατά τον αρχικό σχεδιασμό των έργων προσδιορίστηκε από τους αξιωματικούς του κάθε οχυρού το επίπεδο αντίστασης που θα έπρεπε να διαθέτουν σε ενδεχόμενο πλήγμα. Τα επίπεδα αντίστασης προέκυψαν από τα υποτιθέμενα όπλα των επιτιθέμενων, με τα οποία θα μπορούσαν να απειλήσουν το κάθε έργο κατά τη διάρκεια μιας πολεμικής σύρραξης, κατ' αντιστοιχία με το όπλο σχεδιασμού των σημερινών κανονισμών όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.4. Ενώ αρχικά θεωρήθηκε ως βάση των δράσεων σχεδιασμού η διπλή βολή στο ίδιο σημείο ενός πυροβόλου 220mm, κατόπιν για λόγους οικονομίας αυτό άλλαξε και η βάση αναθεωρήθηκε σε μονή βολή σε κάποιο σημείο, διότι θεωρήθηκε αρκετά σπάνια περίπτωση η βολή δύο βλημάτων στο ίδιο σημείο (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Μόλις το 1938 καθιερώθηκε μια κλίμακα τριών επιπέδων αντίστασης από τη Διοίκηση Φρουρίου Θεσσαλονίκης για την προστασία από συνεχείς βομβαρδισμούς από όπλα που ήταν τότε διαθέσιμα στη Βουλγαρία (Kupka, 2001):

- Επίπεδο αντίστασης (Φ) για πυροβόλο διαμετρήματος έως 105mm
- Επίπεδο αντίστασης (Θ) για πυροβόλο διαμετρήματος από 105mm έως 155 mm ή για βόμβα αέρος - εδάφους 100kg
- Επίπεδο αντίστασης (Ψ) για πυροβόλο διαμετρήματος από 155 mm έως 220cm ή για βόμβα αέρος - εδάφους 300kg.

Με βάση τα παραπάνω επίπεδα αντίστασης έναντι των όπλων σχεδιασμού, καθορίστηκαν τα πάχη των δομικών στοιχείων που φαίνονται στον Πίνακα 6.1 για επιφανειακές κατασκευές (Kupka, 2001):

**Πίνακας 6.1** Πάχη δομικών στοιχείων ανάλογα με το επίπεδο αντίστασης στα όπλα σχεδιασμού

Τμήμα κατασκευής	Βαθμός αντίστασης		
	Φ	Θ	Ψ
Δάπεδο	0,50 m	0,80 m	1,00 m
Τοίχωμα	0,95 m	1,25 m	1,50 m
Οροφή	0,70 m	1,10 m	1,40 m

\* Τα συγκεκριμένα πάχη των δομικών στοιχείων αντιστοιχούν σε σκυρόδεμα περιεκτικότητας 400kg/m<sup>3</sup> σε ειδικό τσιμέντο υψηλής αντοχής.

Στην περίπτωση που το έργο ήταν πλήρως προστατευμένο από απευθείας πυρά πυροβολικού, το επίπεδο αντίστασης των δομικών στοιχείων στην αντίστοιχη τοποθεσία μειωνόταν στο αμέσως χαμηλότερο επίπεδο, αλλά ποτέ λιγότερο από το ελάχιστο επίπεδο (Φ).

Οι υπόγειοι χώροι των οχυρωματικών έργων απαιτούσαν το μεγαλύτερο βαθμό προστασίας και ασφάλειας, καθώς οι λειτουργίες τους ήταν καθοριστικές για τη συνέχιση της αποστολής τους μετά από εχθρική επίθεση. Επομένως, σε υπόγειες κατασκευές απαιτούνταν το υψηλότερο επίπεδο αντίστασης, ωστόσο, όταν υπήρχε επαρκής φυσική κάλυψη εδάφους, θεωρούνταν ότι είχαν έναν βαθμό προστασίας, οπότε η διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων της κατασκευής γινόταν με γνώμονα τις ελάχιστες τεχνικές απαραίτητες απαιτήσεις. Στον Πίνακα 6.2 φαίνονται οι απαιτούμενες εδαφικές προστατευτικές στρώσεις των υπόγειων οχυρωματικών έργων ανάλογα με τον τύπο του εδάφους για τέσσερα βλήματα διαφορετικού διαμετρήματος με διαφορετικό μέγιστο βάθος διείσδυσης σε κάθε περίπτωση (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987):

**Πίνακας 6.2** Προστατευτικά εδαφικά πάχη υπόγειων οχυρωματικών έργων σύμφωνα με τον τύπο εδάφους και το διαμέτρημα του βλήματος

Βλήμα διαμετρή- ματος (mm)	Κοινά εδάφη		Συνεκτικά εδάφη		Μαλακός βράχος		Ημίσκληρος βράχος	
	Βάθος διεί- σδυσης (m)	Πάχος εδαφι- κού καλύμ- ματος (m)	Βάθος διεί- σδυσης (m)	Πάχος εδαφι- κού καλύμ- ματος (m)	Βάθος διεί- σδυσης (m)	Πάχος εδαφι- κού καλύμ- ματος (m)	Βάθος διεί- σδυσης (m)	Πάχος εδαφι- κού καλύμ- ματος (m)
<b>75</b>	3,50	<b>5,10</b>	1,60	<b>3,10</b>	1,20	<b>2,55</b>	0,70	<b>1,85</b>
<b>105</b>	5,00	<b>7,35</b>	2,20	<b>4,35</b>	1,50	<b>3,50</b>	1,00	<b>2,60</b>
<b>155</b>	6,00	<b>10,00</b>	3,00	<b>6,60</b>	2,30	<b>5,65</b>	1,30	<b>4,10</b>
<b>220</b>	8,50	<b>14,50</b>	4,00	<b>9,45</b>	3,30	<b>8,00</b>	1,50	<b>5,75</b>

\* Ο ημίσκληρος βράχος αντιστοιχεί σε σκληρό ασβεστόλιθο, ενώ ο μαλακός σε κιμωλία, μάργα, σχιστόλιθο και λιθορριπή

Τέλος, ο τύπος του εδάφους και κατ' επέκταση το πάχος του εδαφικού καλύμματος καθόριζε το πάχος των υπόγειων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, προκειμένου οι υπόγειοι χώροι να προστατεύονται απόλυτα από υπόγεια διάρρηξη του βλήματος και το προσωπικό από τις επιδράσεις στο νευρικό σύστημα λόγω των δυνατών εδαφικών δονήσεων από τους βομβαρδισμούς (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987).

### **6.3.2 Οπλισμένο Σκυρόδεμα**

Τα μόνιμα έργα της Γραμμής Μεταξά κατασκευάστηκαν από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η Διοίκηση Φρουρίου Θεσσαλονίκης ανέπτυξε γενικούς κανονισμούς και τεχνικές οδηγίες για την προετοιμασία και την επεξεργασία του σκυροδέματος, οι οποίοι βασίζονταν γενικά στα γερμανικά και γαλλικά πρότυπα και έλαβαν υπόψη τις ειδικές απαιτήσεις για τις οχυρώσεις κτιρίων.

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του σκυροδέματος όλων των έργων της Γραμμής Μεταξά ήταν τσιμέντο πόρτλαντ ελληνικής προέλευσης. Η Διοίκηση Φρουρίου Θεσσαλονίκης επιδίωξε την κατασκευή ενός ειδικού τσιμέντου υψηλής αντοχής που δεν κατασκευαζόταν στην Ελλάδα (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Πριν τις ενέργειες προμήθειας του συγκεκριμένου τσιμέντου από το εξωτερικό, έγινε επαφή με τις ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες και φάνηκε ότι υπήρχε η δυνατότητα κατασκευής του. Έτσι μετά από σχετικό διαγωνισμό εξασφαλίστηκε η προμήθεια της απαραίτητης ποσότητας εξολοκλήρου από τις ελληνικές βιομηχανίες, των οποίων το παραγόμενο τσιμέντο αποδείχτηκε εξαιρετικής ποιότητας και εξασφάλιζε την απαιτούμενη αντοχή.

Τα απαραίτητα αδρανή υλικά για την παρασκευή του σκυροδέματος προέρχονταν από περιοχές όσο το δυνατόν πιο κοντά στα εργοτάξια. Έγιναν λεπτομερείς αναγνωρίσεις των περιοχών των οχυρών, προκειμένου να εξασφαλιστούν άριστης ποιότητας πετρώματα για την παραγωγή αδρανών. Στις περισσότερες περιπτώσεις έγινε εκμετάλλευση των ενεργών λατομείων ασβεστόλιθου των περιοχών. Όταν δεν υπήρχαν λατομεία σε λειτουργία κοντά στα εργοτάξια με υγιή και ανθεκτικά πετρώματα, ανοίχθηκαν νέα (Kupka, 2001). Έτσι για παράδειγμα εξορύχθηκε πολύ καλός ασβεστόλιθος ανατολικά της κοιλάδας του ποταμού Στρυμόνα, αλλά και νότια του Κλειδιού. Όπου ήταν δυνατόν, χρησιμοποιήθηκε αμμοχάλικο από αποθέσεις ρευμάτων ή προσχώσεων. Η άμμος ήταν πυριτικής σύστασης και έπρεπε να είναι εντελώς καθαρή και απαλλαγμένη από προσμίξεις, ενώ χρησιμοποιήθηκε και άμμος λατομείου κυρίως για την παρασκευή των σκυροδεμάτων των υπόγειων χώρων. Για την άμμο, το

προδιαγεγραμμένο μέγεθος κόκκου ήταν από 0,2mm έως 7mm, ενώ το απαιτούμενο μέγεθος κόκκου του χαλικιού ήταν από 7mm έως 30mm. Η ελάχιστη τιμή θλιπτικής αντοχής καθορίστηκε στα 600kg/cm<sup>2</sup> σύμφωνα με τις τότε χρησιμοποιούμενες μονάδες μέτρησης (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Την άμμο και το χαλίκι παρείχαν ιδιώτες προμηθευτές, ενώ η ποιότητά τους ελεγχόταν από τους αρμόδιους αξιωματικούς του κάθε εργοταξίου.

Στα κάθετα τοιχώματα των έργων τοποθετήθηκε τόσο κατακόρυφος όσο και οριζόντιος οπλισμός, ενώ μόνο λίγες στρώσεις εγκάρσιας οριζόντιας ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκαν για τις πλάκες βάσης, αλλά και για τις οροφές των οχυρώσεων, οι οποίες ήταν σύμφωνες με το γαλλικό πρότυπο, το οποίο προέβλεπε μείωση του οπλισμού στις πλάκες και στα δάπεδα των κατασκευών σε σχέση με το γερμανικό σύστημα όπλισης (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Ο οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν το κοινό σίδερο του εμπορίου για έργα οπλισμένου σκυροδέματος και η προμήθειά του γινόταν μέχρι το 1940 από το εξωτερικό και κατά τα έτη 1940-1941 από την εγχώρια βιομηχανία. Οι διάμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Ø6, Ø10 και Ø20. Οι πλάκες οροφής και τα κατακόρυφα τοιχεία των επιφανειακών έργων και ιδιαίτερα των έργων βολής που χρησιμοποιούνταν ως πυροβολεία, ολμοβολεία κτλ. ενισχύθηκαν εσωτερικά ακριβώς κάτω από το ανώτερο στρώμα σοβά, με ένα ειδικό μεταλλικό πλέγμα, προκειμένου να αποφευχθούν οι αποφλοιώσεις και η εκτόξευση θραυσμάτων σκυροδέματος στο εσωτερικό της κατασκευής, στην περίπτωση που χτυπηθεί από βλήμα και προκληθούν κραδασμοί και δονήσεις (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται μια τυπική διατομή επιφανειακού έργου με τους ανάλογους οπλισμούς (Kupka, 2001).

Με βάση τον Γαλλικό Κανονισμό καθορίστηκε και η σύνθεση του μείγματος του σκυροδέματος, η οποία προέβλεπε ότι για την παρασκευή ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος θα χρησιμοποιούνταν: 400kg ειδικό τσιμέντο υψηλής αντοχής, 0,855-0,865m<sup>3</sup> σκύρα, 0,335-0,345m<sup>3</sup> άμμος και 160-220kg νερό ανάλογα με την ώρα και την εποχή, αλλά και με την περιεχόμενη υγρασία των αδρανών (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Το νερό ήταν κατάλληλο, τελείως καθαρό, απαλλαγμένο από άλατα και έλαια και προερχόταν από τις πηγές ύδρευσης των οχυρών. Ο περιορισμός της απόλυτα απαραίτητης δόσης νερού, ήταν καθοριστικής σημασίας για τη ζητούμενη αντοχή του σκυροδέματος. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε λεπτή θηραϊκή γη σε αναλογία 50kg/m<sup>3</sup> σκυροδέματος, σε όλες τις επενδύσεις των τόξων των σηράγγων, προκειμένου αφενός να αυξηθεί η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, αφετέρου να προστατευτούν οι κατασκευές από την εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό τους (Kupka, 2001).





**Σχήμα 6.2** Τυπική διατομή επιφανειακού έργου της Γραμμής Μεταξά (Πηγή: Kurka, 2001)

Για την κατασκευή της πλάκας οροφής των επιφανειακών έργων, αποφασίστηκε η ποσότητα του τσιμέντου για στρώση πάχους 5-8cm της εξωτερικής πλευράς των πλακών να είναι  $800\text{kg/m}^3$ , για να επιτευχθεί καλύτερη στεγανότητα. Σε αυτό συνεπικουρούσε και η ελαφριά κλίση που δινόταν στην επιφάνεια της πλάκας προς τις πλευρές δεξιά και αριστερά του φατνώματος του έργου. Για την αμέσως επόμενη στρώση πάχους 20cm η αναλογία τσιμέντου μειωνόταν στα  $600\text{kg/m}^3$ , προκειμένου να ενισχυθεί η κατασκευή έναντι διείσδυσης και διάρρηξης. Στο υπόλοιπο πάχος του δομικού στοιχείου η περιεκτικότητα σε τσιμέντο ήταν  $400\text{kg/m}^3$  (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Ωστόσο, η παραπάνω μέθοδος κατασκευής των πλακών οροφής των επιφανειακών έργων με τρεις στρώσεις διαφορετικής ποιότητας σκυροδέματος, έφερε αρκετά προβλήματα, καθώς ήταν εξαιρετικά δύσκολο να διατηρηθούν οι τρεις διαφορετικές στρώσεις χωρίς ανάμειξη των επιμέρους ποιοτήτων σκυροδέματος (Kurka, 2001).

Η επεξεργασία του μίγματος του σκυροδέματος γινόταν σε αναμικτήρες που είχαν προμηθευτεί όλα τα εργοτάξια. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην πλαστιμότητα του σκυροδέματος, ώστε να οδηγείται εύκολα χωρίς ισχυρή δόνηση, σε όλα τα σημεία της κατασκευής, ακόμα και σε αυτά

με πυκνό οπλισμό, χωρίς να αφήνει κενά. Για να διευκολύνεται η ομοιόμορφη διάστρωση και να μην πέφτει το σκυροδέμα από ύψος μεγαλύτερο από 2 μέτρα, χρησιμοποιούνταν ξύλινοι οδηγοί που κατέληγαν σε κινητούς σωλήνες. Για τη δόνηση χρησιμοποιούνταν βαριοπούλες βάρους 2-8kg, ενώ αργότερα τα περισσότερα εργοτάξια προμηθεύτηκαν και δονητές σκυροδέματος, η χρήση των οποίων έγινε με πολύ καλά αποτελέσματα (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Η αφαίρεση των ξυλοτύπων γινόταν σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό παρασκευής σκυροδέματος και σε καμία περίπτωση πριν τις 12 μέρες.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην τέλεια σκλήρυνση του σκυροδέματος, γι' αυτό και λήφθηκαν μέτρα κατά της πολύ γρήγορης ξήρανσής του, εξαιτίας της επίδρασης του ηλιακού φωτός, του ανέμου, του ψύχους ή της έκπλυσης του τσιμέντου κατά τις βροχερές περιόδους (Kurka, 2001). Κατά τη χειμερινή περίοδο, τις πρώτες 72 ώρες από τη διάστρωσή του, έπρεπε να προστατεύεται από το ψύχος και καλυπτόταν από σάκους, λινάτσες, χόρτα και άλλα υλικά. Όταν η θερμοκρασία άγγιζε τους  $-3^{\circ}\text{C}$ , ήταν απαραίτητη η προθέρμανση της άμμου και του χαλικιού μέχρι τους  $10^{\circ}\text{C}$  και του νερού μέχρι τους  $40^{\circ}\text{C}$ . Για θερμοκρασίες από  $-3^{\circ}\text{C}$  έως  $-10^{\circ}\text{C}$ , η άμμος και τα χαλίκια προθερμαίνονταν στους  $70^{\circ}\text{C}$  και το νερό στους  $50^{\circ}\text{C}$ , ενώ το διαστρωμένο σκυρόδεμα καλυπτόταν με υλικά πάχους 30εκ. Για θερμοκρασίες κάτω των  $-10^{\circ}\text{C}$  δεν εκτελούνταν εργασίες. (Γκιρμπάτσης, 2018).

Κατά την κατασκευή των επιφανειακών έργων στέλνονταν στο Μετσόβιο Πολυτεχνείο κυβικά δοκίμια ακμής 20cm για τον έλεγχο της αντοχής τους. Το εργαστήριο του Πολυτεχνείου κοινοποιούσε στη Διοίκηση Φρουρίου Θεσσαλονίκης τα δελτία αποτελεσμάτων των δοκιμών σε θλίψη των δοκιμών. Όλες οι επίσημες δοκιμές έδωσαν εξαιρετικά αποτελέσματα με την αντοχή σε θλίψη να κυμαίνεται μεταξύ  $300\text{-}400\text{ kg/cm}^2$  (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987). Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι μετά από τον καταγιστικό βομβαρδισμό των οχυρώσεων από τους Γερμανούς παρατηρήθηκαν μόνο μικρές αποφλοιώσεις και σε καμία περίπτωση ολική καταστροφή όπως έγινε σε αντίστοιχα έργα στη Γαλλία και στο Βέλγιο. Για τον λόγο αυτό μετά την κατάληψη της χώρας από τα γερμανικά στρατεύματα, ο Διοικητής Μηχανικού της ΝΑ Ευρώπης Στρατηγός Σνάιντερ, επισκέφθηκε τον Καθηγητή της Γεωλογίας Μάξιμο Μητσόπουλο και αφού επαίνεσε την ελληνική οχύρωση ως την καλύτερη της Ευρώπης ως προς την αντοχή, την απόκρυψη και τη διάταξη των έργων, ζήτησε να μάθει τα αίτια της εξαιρετικής αντοχής του σκυροδέματος των ελληνικών οχυρών (Τάσιος, 2002).

## 6.4 Τρόπος κατασκευής

Κάθε συγκρότημα οχυρωματικών έργων αποτελούνταν από ένα σύνολο υπόγειων χώρων που επικοινωνούσαν μεταξύ τους με ένα δαιδαλώδες δίκτυο στοών, το οποίο κατέληγε στα επιφανειακά έργα βολής και παρατήρησης. Τα επιφανειακά έργα, ανάλογα με τον οπλισμό και την αποστολή τους διακρίνονταν σε σκέπαστρα προβολών, παρατηρητήρια, πολυβολεία, ολμοβολεία, βομβιδοβολεία, αντιαρματικά και αντιαεροπορικά πυροβολεία. Τα πολυβολεία ήταν κατάλληλα διατεταγμένα, ώστε να εξασφαλίζουν την άμυνα περιμετρικά της προστατευόμενης θέσης (Γκιρμπάτσης, 2024).

Οι υπόγειες εγκαταστάσεις κατασκευάστηκαν, ώστε να καλύπτουν τόσο τις ανάγκες διαβίωσης του προσωπικού, όσο και την υποστήριξη της αποστολής τους. Περιλάμβαναν γραφεία διοίκησης, τηλεφωνικό κέντρο, αποθήκες πυρομαχικών, θαλάμους αξιωματικών και οπλιτών, μαγειρείο, ιατρείο, αποθήκες τροφίμων, χώρους υγιεινής, δεξαμενές νερού, συστήματα εξαερισμού κ.α. Η επάρκεια κάθε οχυρού σε τρόφιμα, νερό και πυρομαχικά ήταν για 10 ημέρες (Γκιρμπάτσης, 2018).

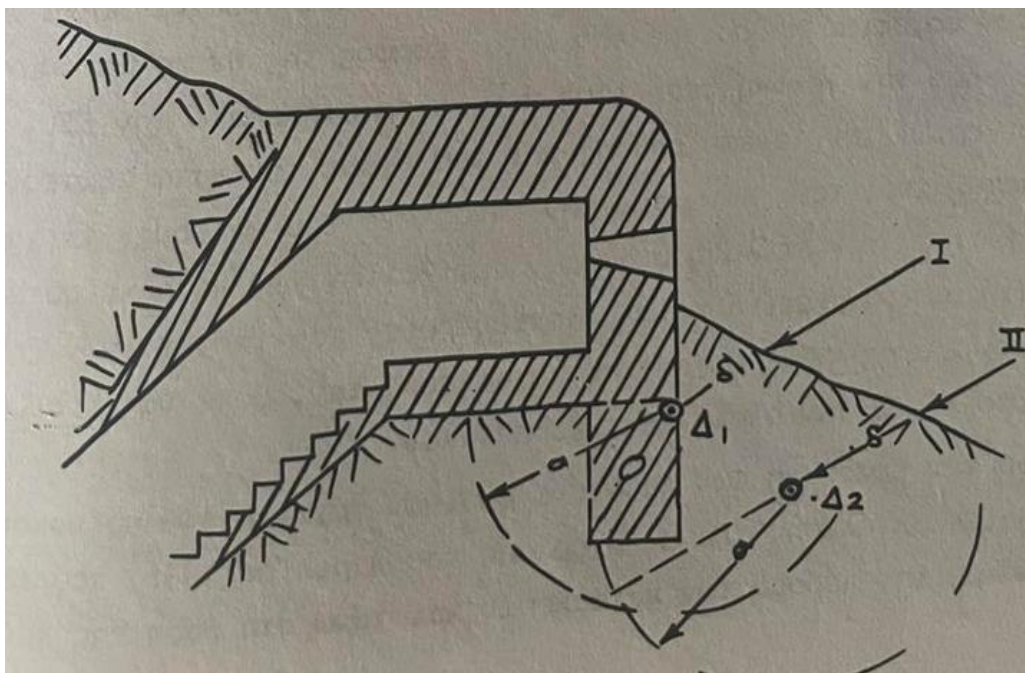
Τα πλευρικά όρια της οχυρωμένης περιοχής ενισχύονταν είτε με φυσικά κωλύματα, όπως ορεινούς όγκους και ποτάμια, είτε με τεχνητά κωλύματα, όπως αντιαρματικές τάφρους, σιδηροτροχιές και πυραμοειδή τσιμεντένια εμπόδια, τα λεγόμενα "Δόντια του δράκου".

### 6.4.1 Επιφανειακές μόνιμες κατασκευές

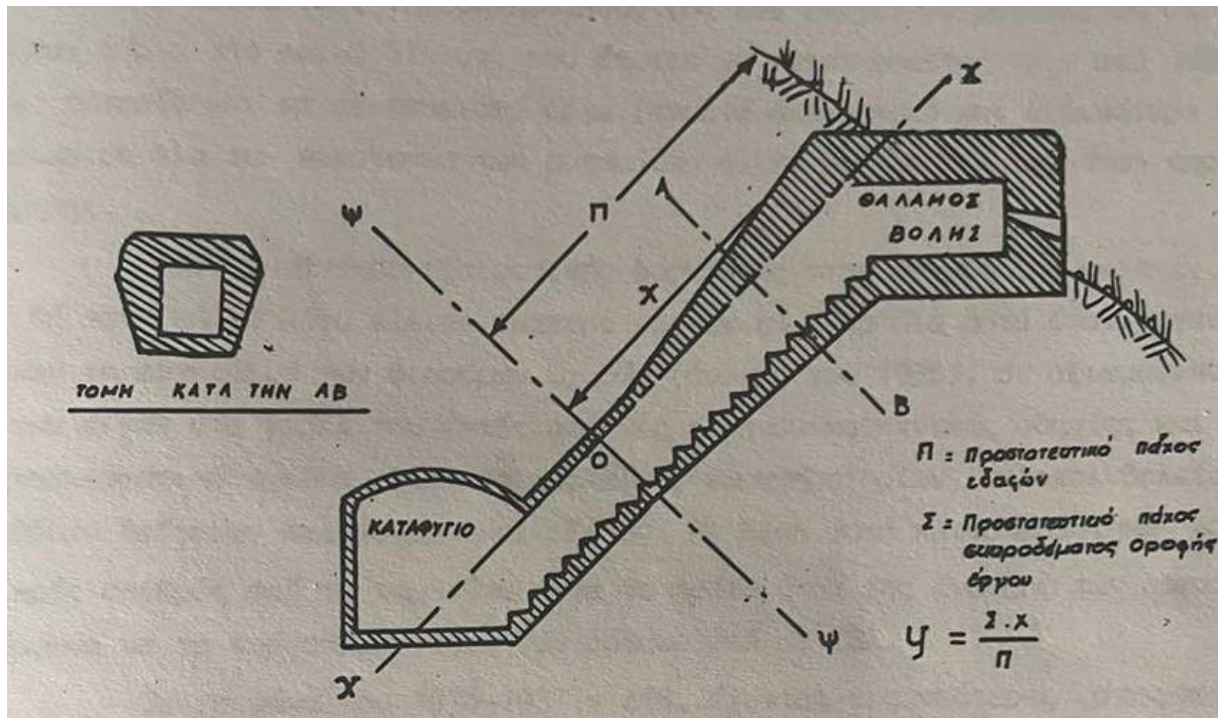
Τόσο οι επιφανειακές κατασκευές που επικοινωνούσαν με υπόγειες στοές, όσο και οι μεμονωμένες ανεξάρτητες επιφανειακές οχυρώσεις, κατασκευάστηκαν από οπλισμένο σκυρόδεμα και τυποποιήθηκαν σε κάποιες βασικές μορφές, προκειμένου να απλοποιηθεί η κατασκευή τους. Ωστόσο, η βασική μορφή τους θα μπορούσε να τροποποιηθεί, εάν οι τοπικές συνθήκες και επιχειρησιακοί λόγοι το απαιτούσαν (Kupka, 2001). Κατασκευάστηκαν για παράδειγμα σύνθετα επιφανειακά έργα, τα οποία ήταν συνδυασμός των παραπάνω και διέθεταν αντιαεροπορικά πυροβόλα, θέσεις πολυβόλων, αντιαρματικά πυροβόλα και παρατηρητήρια. Οι διαστάσεις των επιμέρους χώρων και όλων των ανοιγμάτων, καθώς και οι βάσεις σκοποβολής σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τον μέγιστο βαθμό όλα τα είδη των διαθέσιμων όπλων. Στις δυσπρόσιτες ορεινές περιοχές, όπου υπήρχε άφθονη ποσότητα υψηλής ποιότητας αδρανών υλικών, το σκυρόδεμα αντικαταστάθηκε κάποιες φορές από πέτρα λατομείου ενωμένη με τσιμεντοκονία. Αυτός ο τρόπος κατασκευής χρησιμοποιήθηκε κυρίως για εκείνα τα τμήματα των οχυρώσεων που δεν κινδύνευαν από άμεσο πλήγμα (Kupka, 2001).

Η ενίσχυση της θεμελίωσης των επιφανειακών έργων, κρίθηκε απαραίτητη μόνο στις περιπτώσεις με μεγάλη εδαφική κλίση, προκειμένου να αποφευχθεί η ανατροπή ή καταστροφή του έργου λόγω της υπόγειας διάρρηξης του βλήματος κάτω από την επιφάνεια του δαπέδου του έργου. Η ενίσχυση γινόταν με βύθιση του μετωπικού τοιχίου της κατασκευής σε κατάλληλο βάθος μέσα στο έδαφος, ώστε το δάπεδο να μη βρίσκεται μέσα στην ακτίνα ενέργειας της υπόγειας διάρρηξης του βλήματος (Σχήμα 6.3) (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987).

Εξαιτίας της έλλειψης προστατευτικής εδαφικής στρώσης στο τμήμα του έργου που βρισκόταν στην επιφάνεια του εδάφους, αποφασίστηκε, για την προστασία της καθόδου προς τα καταφύγια, να αναπληρωθεί η εδαφική στρώση που έλειπε, από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό καθιερώθηκε η χρήση ενός νομογραφήματος, που όριζε τη μεταβολή του πάχους του σκυροδέματος της επικάλυψης κατά την κάθοδο, συναρτήσει του πάχους του υπερκείμενου εδάφους. Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται το αντίστοιχο σχήμα που συνοδεύει το εν λόγω νομογράφημα (ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987).



**Σχήμα 6.3** Ενίσχυση θεμελίωσης επιφανειακής κατασκευής (Πηγή: ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987)



**Σχήμα 6.4** Σχήμα από το αντίστοιχο νομογράφημα μεταβολής των παχών σκυροδέματος της επικάλυψης συναρτήσει του πάχους του υπερκείμενου εδάφους (Πηγή: ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1987)

Τα ανοίγματα των επιφανειακών έργων, όπως ήταν τα φατνώματα των πολυβολείων, των παρατηρητηρίων κτλ., αποτελούσαν τα μοναδικά ανοίγματα των επιφανειακών έργων και ταυτόχρονα τα πιο τρωτά σημεία τους. Για να ελαττωθούν οι πιθανότητες εισχώρησης ενός βλήματος ή θραύσματος στο εσωτερικό της κατασκευής από εξοστρακισμό, αφηνόταν περιμετρικά των φατνωμάτων ο ξυλότυπος από ισχυρές πλανισμένες ξύλινες σανίδες πάχους 3εκ., που είχε χρησιμοποιηθεί κατά τη σκυροδέτησή τους. Επιπλέον, τα φατνώματα των πολυβολείων ήταν ενισχυμένα με χαλύβδινα πλαίσια πάχους 9 χιλιοστών (Kurka, 2001). Στην Εικόνα 6.5 φαίνεται το άνοιγμα ενός πολυβολείου, όπου διακρίνεται η ξύλινη και η χαλύβδινη επένδυση.

Το μειονέκτημα των επιφανειακών έργων ήταν η προεξοχή τους πάνω από το έδαφος, η οποία μαζί με τα υπόλοιπα ανοίγματα της κατασκευής, αποκάλυπταν τη θέση του έργου, στην περίπτωση που δεν ήταν επαρκώς προστατευμένη.



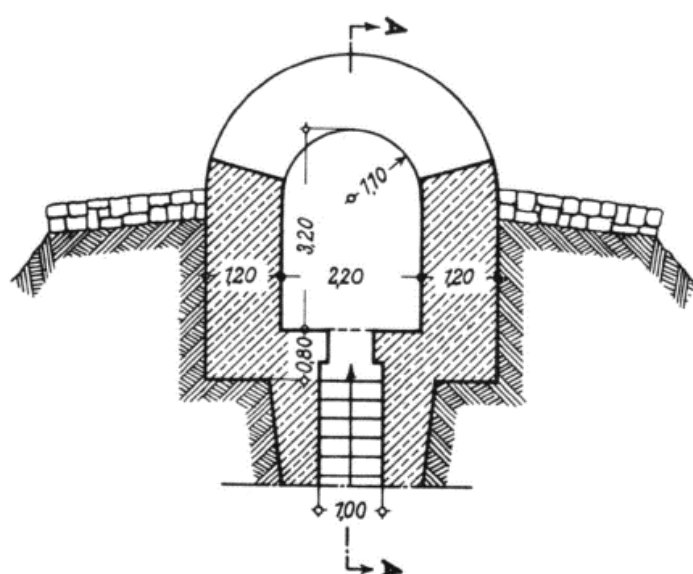
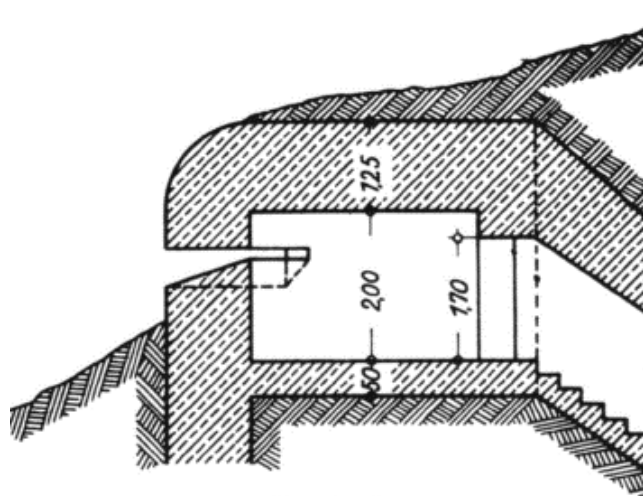


**Εικόνα 6.5** Φάτνωμα πολυβολείου όπου διακρίνεται η ξύλινη και η χαλύβδινη επένδυση (Πηγή: Γκιρμπάτσης, 2018)

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι των επιφανειακών έργων που συναντώνται κατά μήκος της Γραμμής Μεταξά (Kurka, 2001):

#### Παρατηρητήρια

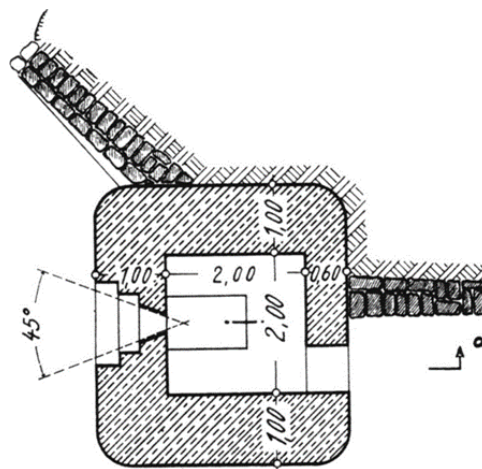
Σημαντική θέση ανάμεσα στις επιφανειακές κατασκευές κατείχαν τα παρατηρητήρια, αν κρίνει κανείς από τον μεγάλο αριθμό τους. Τα παρατηρητήρια φέραν ένα φάτνωμα παρατήρησης που επέτρεπε θέαση 180°, από το οποίο ήταν δυνατή και η βολή με οπλοπολυβόλο, εάν κρινόταν απαραίτητο. Το άνοιγμα παρατήρησης είχε τραπεζοειδές σχήμα και διαμόρφωνε ένα ημικύκλιο. Εσωτερικά είχε το μικρότερο ύψος του (10εκ.) και προστατευόταν από χαλύβδινη θυρίδα. Η επικοινωνία των παρατηρητηρίων με τα υπόγεια καταφύγια γινόταν μέσω κατακόρυφης ή ελικοειδούς σκάλας μέσα σε φρεάτιο, σε περίπτωση που η υψομετρική διαφορά ήταν μέχρι 8 μέτρα, ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις μέσω κεκλιμένης στοάς. Ήταν κατασκευασμένα όσο το δυνατό πιο βαθιά μέσα στο έδαφος και καμουφλαρισμένα, ώστε να μην γίνονται εύκολα αντιληπτά (Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6 Παρατηρητήριο (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)

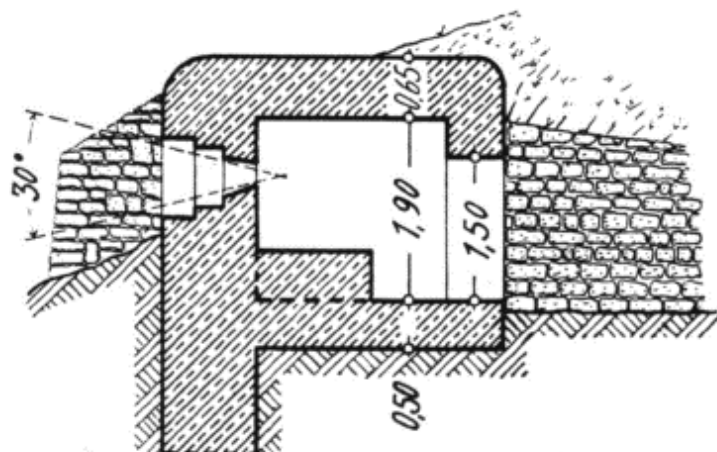
## Πολυβολεία

Τα πολυβολεία στον ενιαίο τύπο τους διέθεταν ένα άνοιγμα για χρήση πολυβόλου (Εικόνες 6.7 & 6.8), ενώ κατασκευάστηκαν και αρκετά διπλά πολυβολεία, για δύο θέσεις πολυβόλου, όταν επιχειρησιακά απαιτούνταν μεγαλύτερος βαθμός αντίστασης και προστασίας (Εικόνες 6.9 & 6.10). Το μονό πολυβολείο αποτελούσε και το μικρότερο στοιχείο μάχης. Τα περισσότερα πολυβολεία επικοινωνούσαν με τους υπόγειους χώρους μέσω κεκλιμένης στοάς, ενώ κάποια άλλα (λίγα στον αριθμό) αποτελούσαν ανεξάρτητες μεμονωμένες κατασκευές. Στο εσωτερικό των πολυβολείων υπήρχε υδατοδεξαμενή χωρητικότητας 200 λίτρων από γαλβανιζέ λαμαρίνα για την ψύξη των υδρόψυκτων πολυβόλων αλλά και για την παροχή νερού στο προσωπικό. Επίσης υπήρχε τηλέφωνο και ο φωτισμός εξασφαλιζόταν με λάμπες πετρελαίου. Σε πολλές περιπτώσεις, τα πολυβολεία διέθεταν δική τους ανεξάρτητη έξοδο κινδύνου.

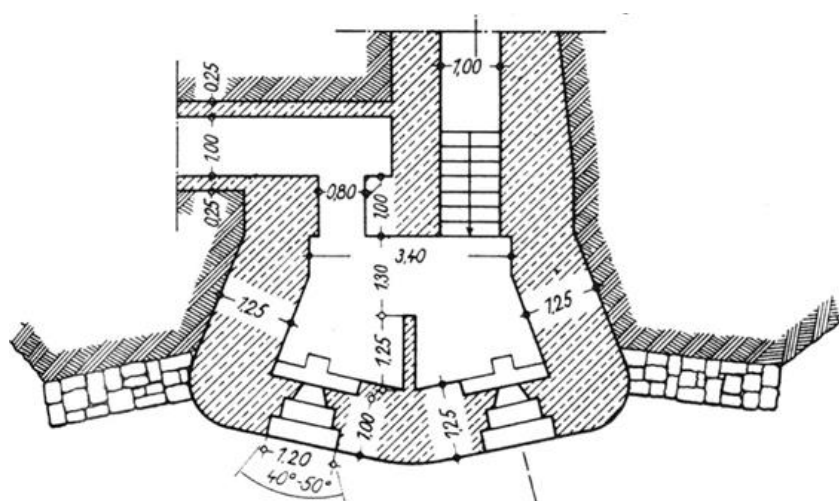


**Εικόνα 6.7** Άποψη και κάτοψη μονού πολυβολείου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)

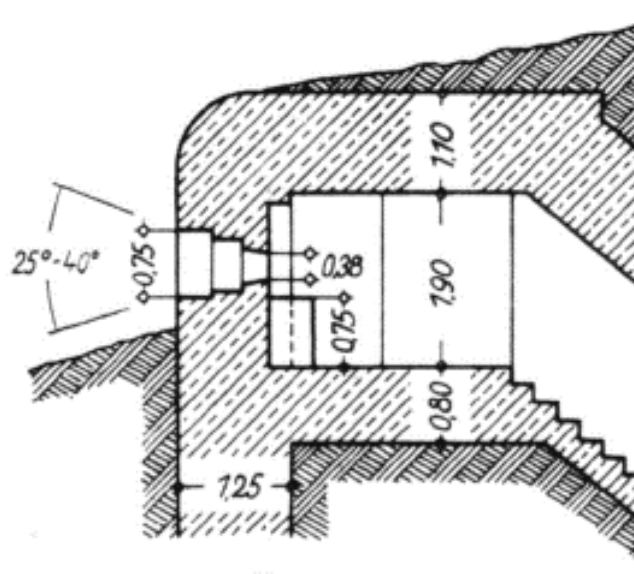




**Εικόνα 6.8** Τομή μονού πολυβολείου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)



**Εικόνα 6.9** Άποψη και κάτοψη διπλού πολυβολείου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)



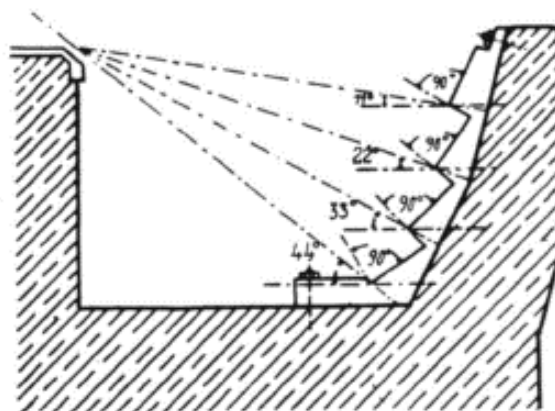
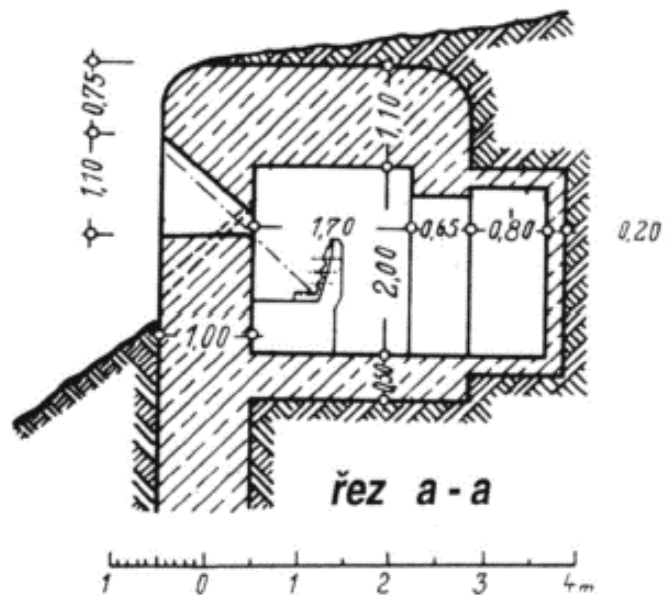
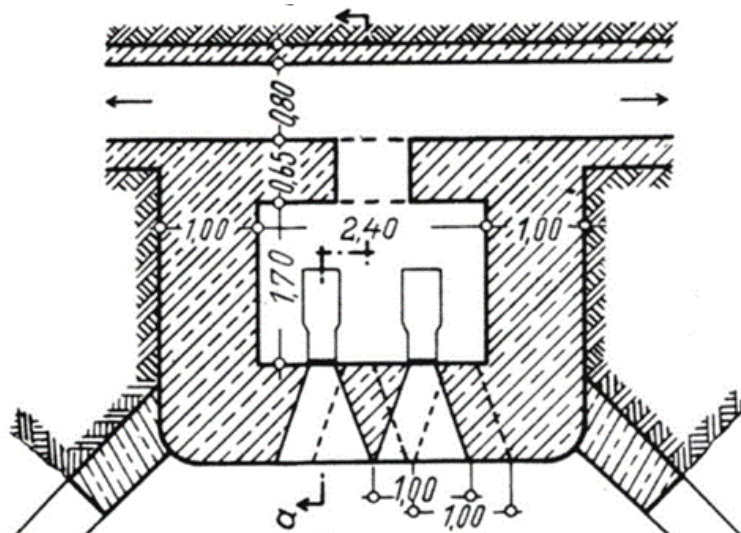
**Εικόνα 6.10** Τομή διπλού πολυβολείου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001\_)

#### Εκτοξευτές χειροβομβίδων

Σχεδόν σε όλα τα οχυρωματικά συγκροτήματα της Γραμμής Μεταξά συναντά κανείς επιφανειακές κατασκευές που χρησιμοποιούνταν ως εκτοξευτές χειροβομβίδων. Διέθεταν μονό ή διπλό λοξό φάτνωμα, μέσω του οποίου ήταν δυνατή η εκτόξευση χειροβομβίδων (Εικόνες 6.11 & 6.12).



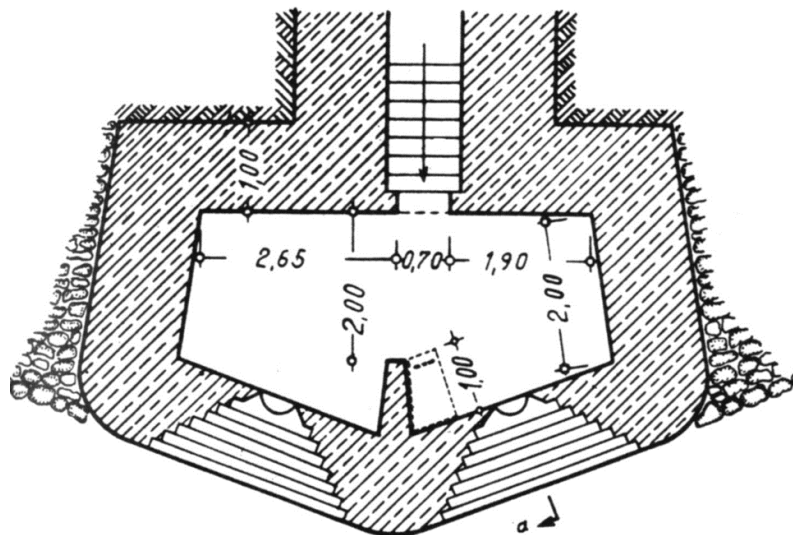
**Εικόνα 6.11** Άποψη εκτοξευτή χειροβομβίδων (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001\_)



**Εικόνα 6.12** Κάτοψη και τομές εκτοξευτή χειροβομβίδων (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Κυρκα, 2001)

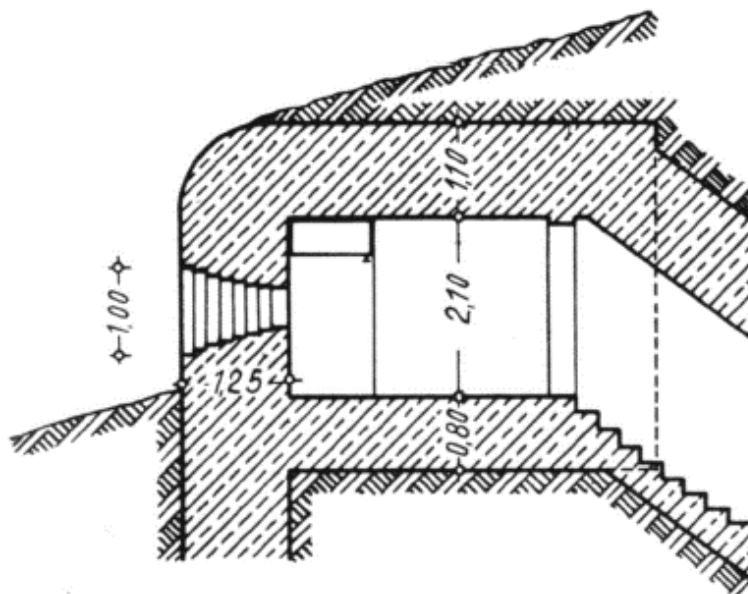
### Αντιαρματικά πυροβολεία

Τα αντιαρματικά πυροβολεία ήταν μονής ή διπλής βολής και τα φατνώματά τους ήταν σχεδιασμένα να φέρουν αντιαρματικά γερμανικά πυροβόλα 37 χιλιοστών, που τοποθετούνταν πάνω σε ειδικό κιλλίβαντα. Όπως και τα απλά πολυβολεία έτσι και τα αντιαρματικά, συνήθως επικοινωνούσαν με τους υπόγειους χώρους των οχυρών. Τα φατνώματα των αντιαρματικών πολυβολείων όπως και των απλών πολυβολείων ήταν ενισχυμένα με χαλύβδινα πλαίσια πάχους 9 χιλιοστών (Εικόνες 6.13 & 6.14).



**Εικόνα 6.13** Άποψη και κάτοψη διπλού αντιαρματικού πυροβολείου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)

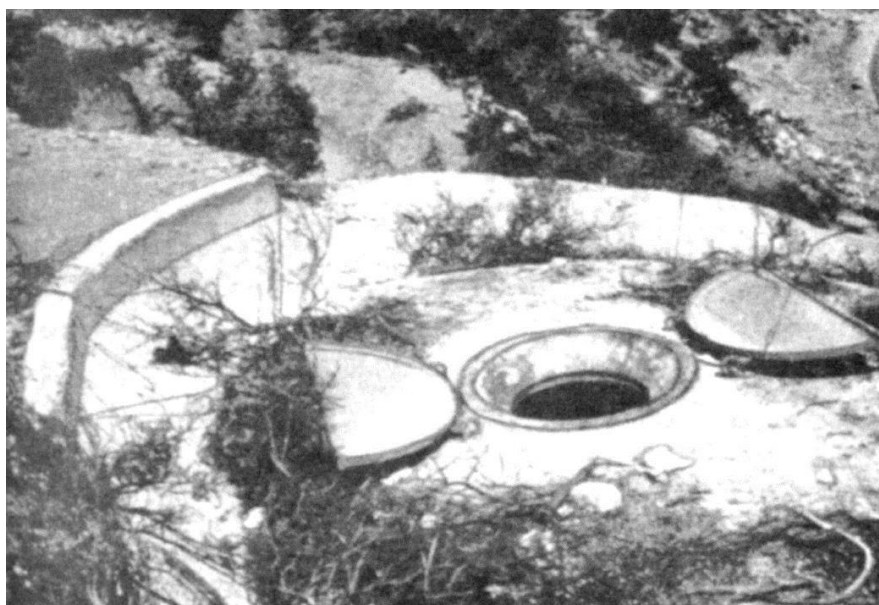




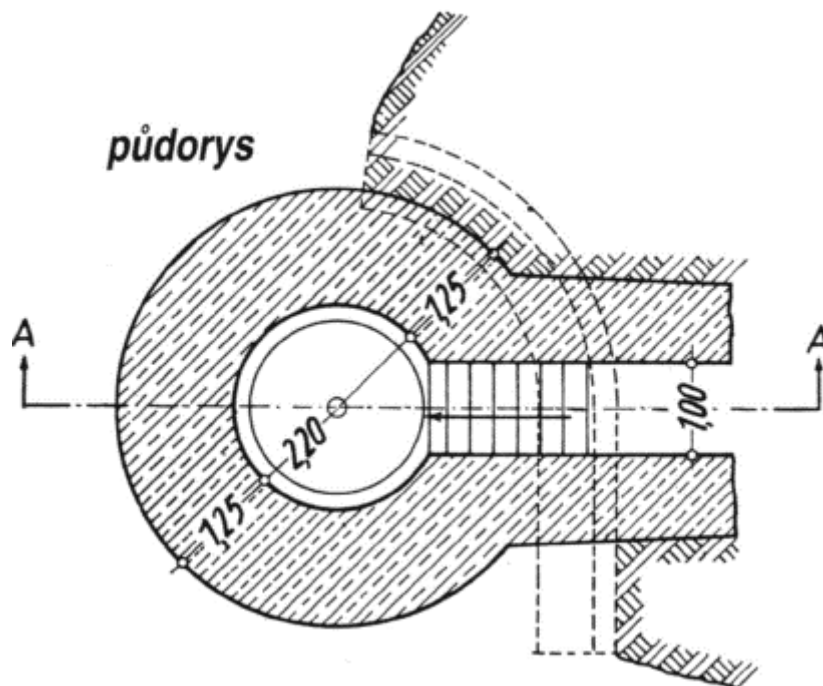
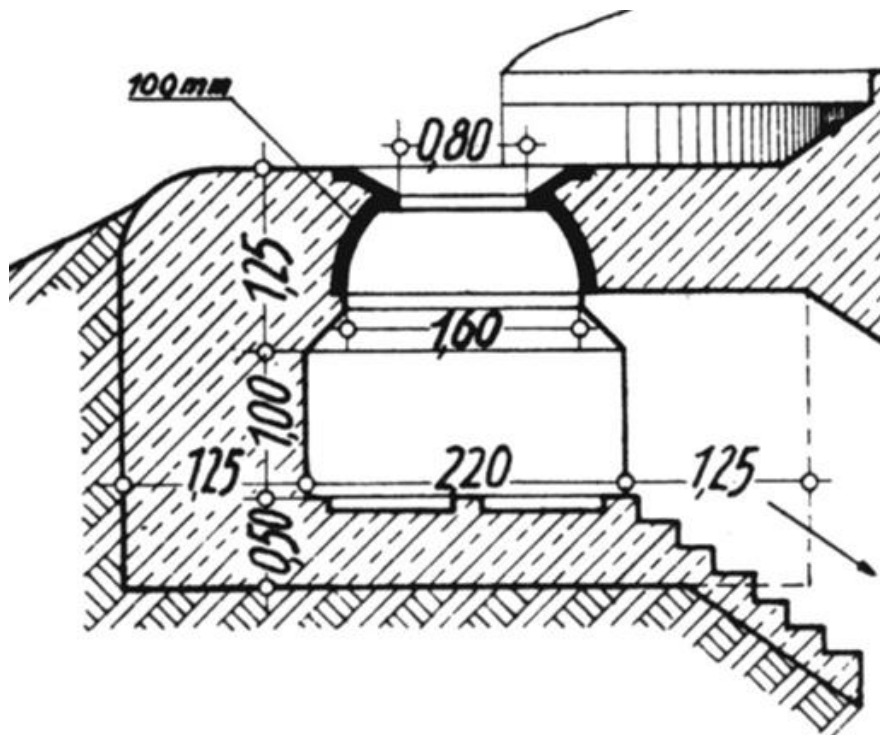
**Εικόνα 6.14** Τομή διπλού αντιαρματικού πυροβολείου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kyrka, 2001)

#### Ολμοβολείο

Κατασκευάστηκαν μονά και διπλά ολμοβολεία. Τα σκέπαστρα, διαμέτρου ενός μέτρου περίπου, είχαν κυκλικό άνοιγμα στην οροφή, ώστε να είναι εφικτές όλες οι κλίσεις βολής καμπύλης τροχιάς, με βεληνεκές από 200 μέτρα έως το μέγιστο. Ο θάλαμος βολής ήταν κυκλικός και καλυμμένος με θωράκιο από χυτοχάλυβα πάχους 10εκ (Εικόνες 6.15 & 6.16).



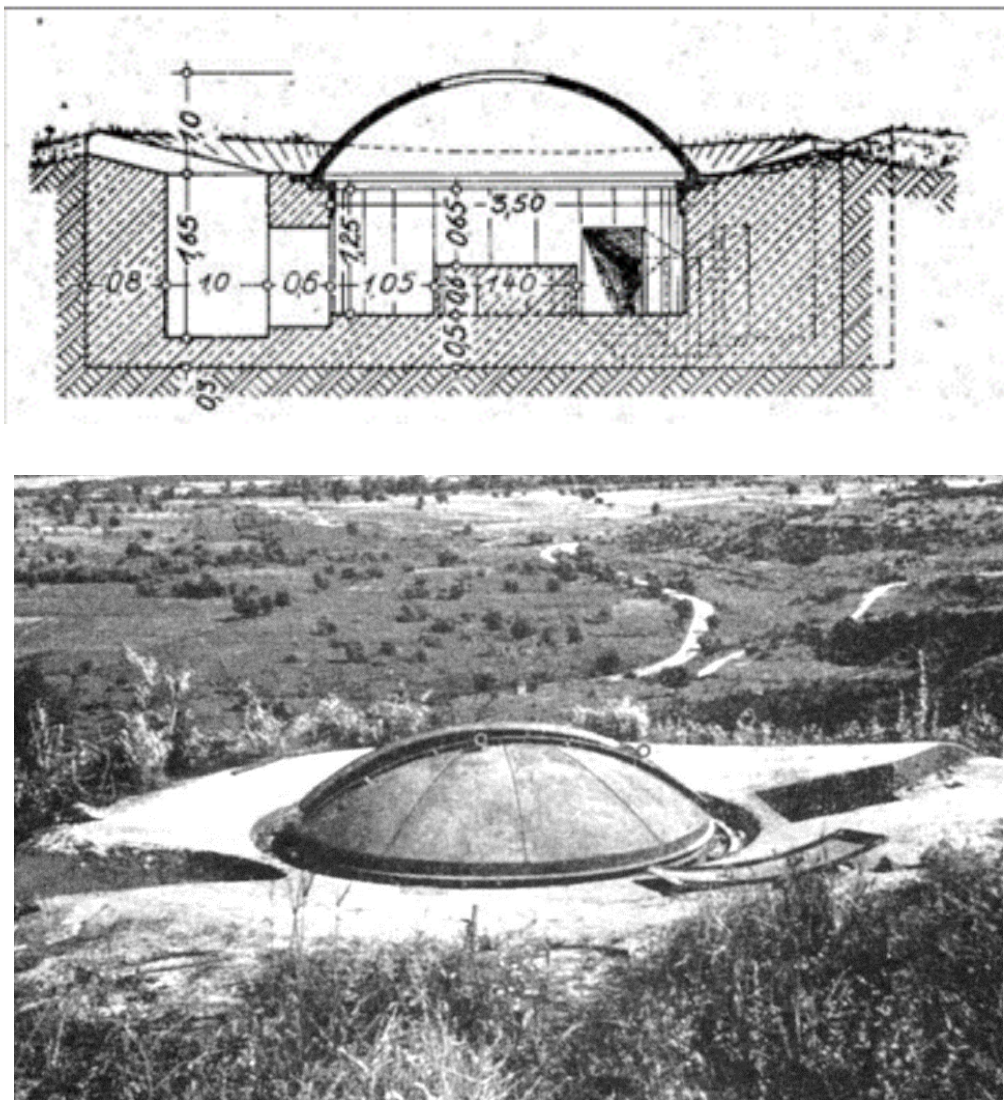
**Εικόνα 6.15** Άποψη μονού ολμοβολείου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kyrka, 2001)



**Εικόνα 6.16** Τομή και κάτοψη μονού ολμοβολείου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)

### Αντιαεροπορικά πυροβολεία

Η αντιαεροπορική άμυνα των ελληνικών οχυρών διέθετε αντιαεροπορικά πυροβολεία, τα οποία καλύπτονταν από ένα θολωτό σκέπαστρο από χάλυβα πάχους 8εκ και βάρους ενός τόνου για την προστασία τόσο του πυροβόλου όπλου όσο και του προσωπικού που επιχειρούσε (Εικόνα 6.17). Ο θάλαμος βολής ήταν κυλινδρικού σχήματος και το θολωτό σκέπαστρο είχε άνοιγμα πλάτους 40εκ και επέτρεπε την εκτέλεση κατακόρυφων βολών. Το πυροβόλο όπλο ήταν μόνιμα συνδεδεμένο στο άνοιγμα κι κινούνταν πάνω σε σιδηροτροχιά η οποία ήταν πακτωμένη μέσα στο επιφανειακό έργο. Τα αντιαεροπορικά πυροβολεία συνήθως δεν συνδέονταν με τα υπόγεια συστήματα των οχυρωματικών έργων (Denkschrift über die Griechische Landesbefestigung, 1942).

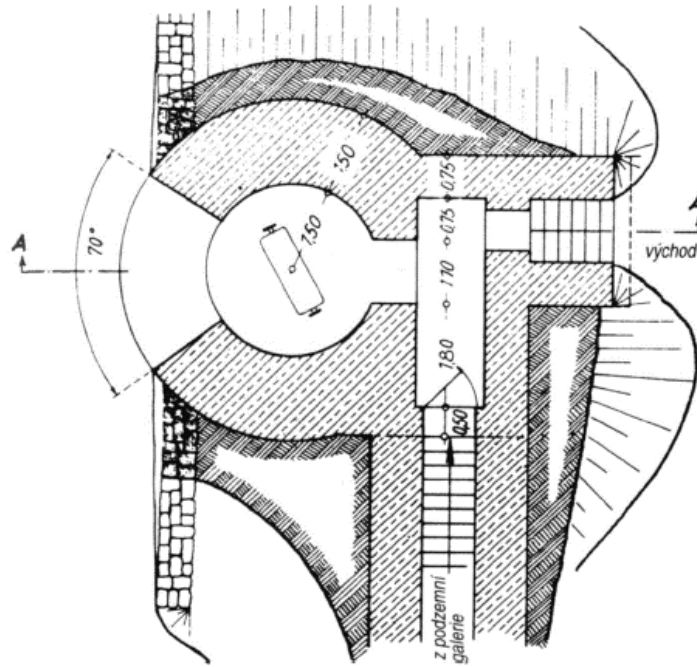


**Εικόνα 6.17** Αντιαεροπορικό πυροβολείο (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de))



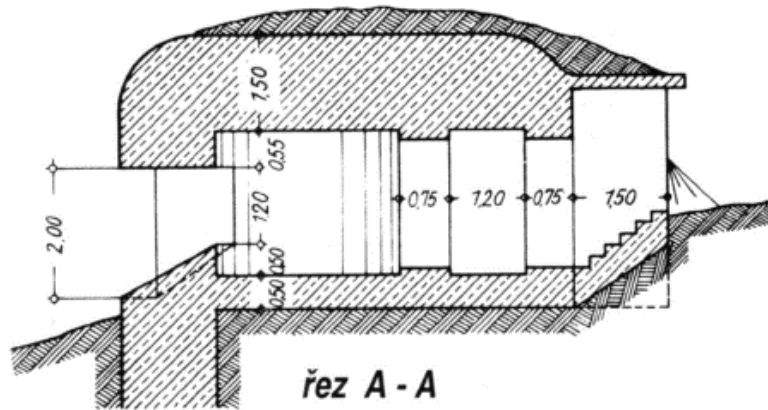
### Βάση προβολέων

Αυτού του είδους η κατασκευή, η οποία στέγαζε προβολείς, εμφανίζεται σε όλα σχεδόν τα οχυρωματικά συγκροτήματα με διάφορες παραλλαγές και διέθετε δική της έξοδο κινδύνου (Εικόνες 6.18 & 6.19)



**Εικόνα 6.18** Άποψη και κάτοψη σκέπαστρων προβολέων (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)





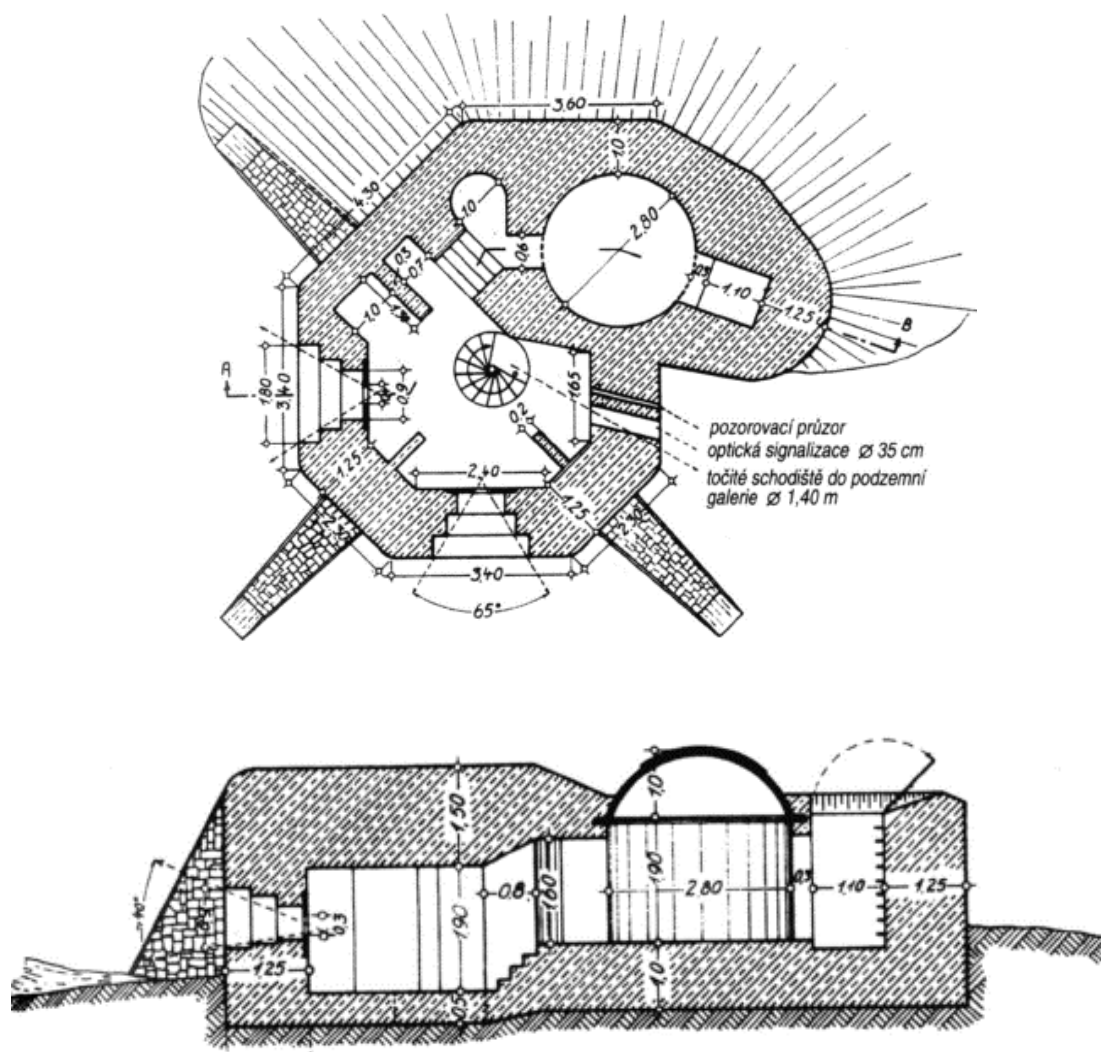
**Εικόνα 6.19** Τομή σκέπαστρου προβολέων (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)

#### Σύνθετα επιφανειακά έργα

Εκτός από τους απλούς βασικούς τύπους των επιφανειακών έργων, κατασκευάστηκαν και σύνθετα έργα που συνδυάζαν αρκετές από τις βασικές μορφές που προαναφέρθηκαν. Τέτοια σύνθετα έργα συναντώνται σχεδόν σε όλα τα οχυρωματικά συγκροτήματα της Γραμμής Μεταξά. Για παράδειγμα, στις Εικόνες 6.20 & 6.21, φαίνεται ένα επιφανειακό έργο το οποίο διαθέτει ένα αντιαεροπορικό πυροβόλο, δύο πολυβολεία, παρατηρητήριο και κατακόρυφη σπειροειδή σκάλα για την επικοινωνία με τα καταφύγια, ενώ στην Εικόνες 6.22 & 6.23 παρουσιάζεται ένα ακόμη σύνθετο έργο, το οποίο αποτελείται από ένα αντιαρματικό πυροβόλο, δύο παρατηρητήρια και δύο πολυβολεία. Το συγκεκριμένο έργο κατασκευάστηκε μόνο μία φορά στο οχυρό Ιστίμπεη, καθώς παραβιάζει την απαίτηση που είχε τεθεί για μικρές ελάχιστες διαστάσεις.



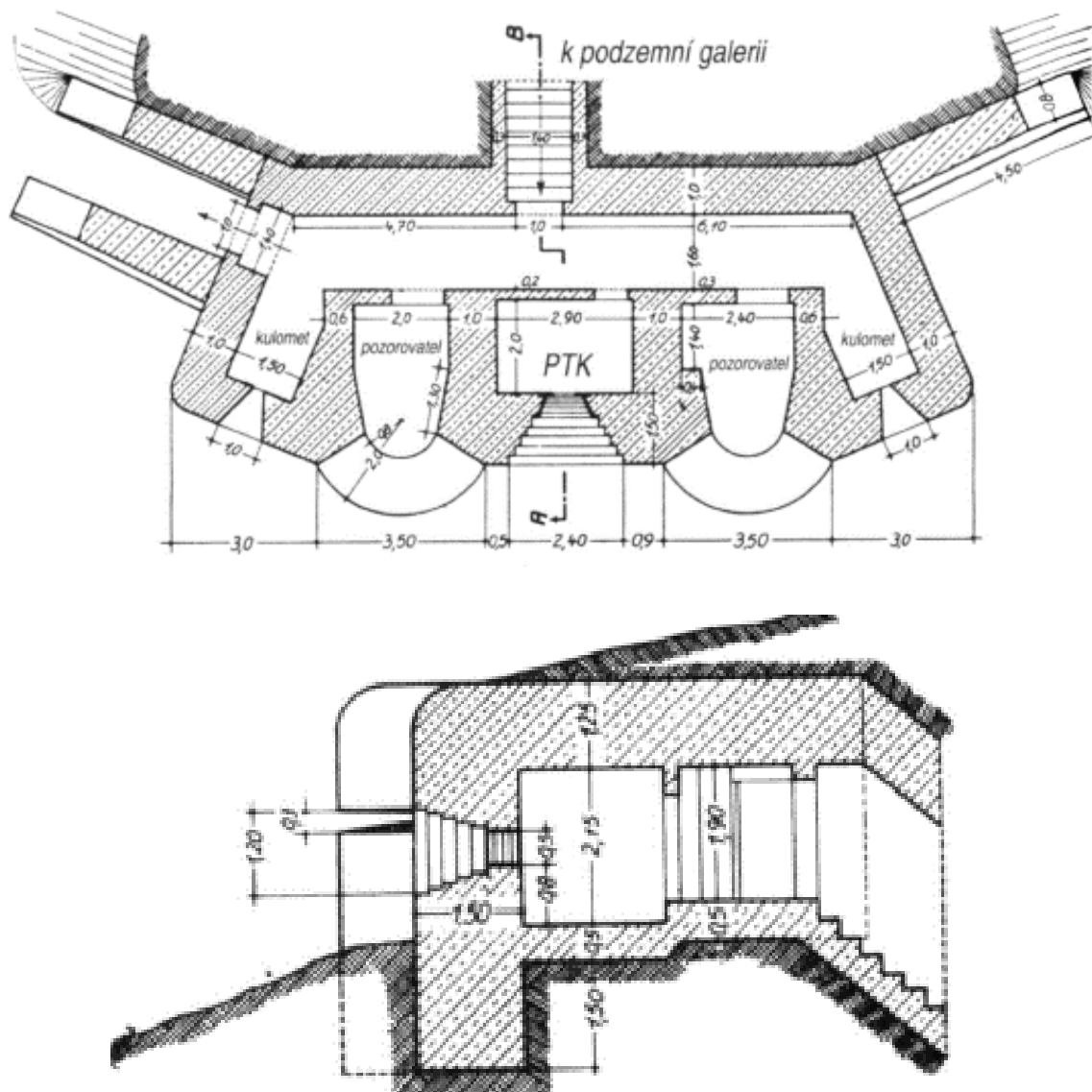
**Εικόνα 6.20** Άποψη σύνθετου επιφανειακού έργου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)



**Εικόνα 6.21** Κάτοψη και τομή σύνθετου επιφανειακού έργου (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)



**Εικόνα 6.22** Άποψη σύνθετου επιφανειακού έργου στο οχυρό Ιστίμπεη (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)

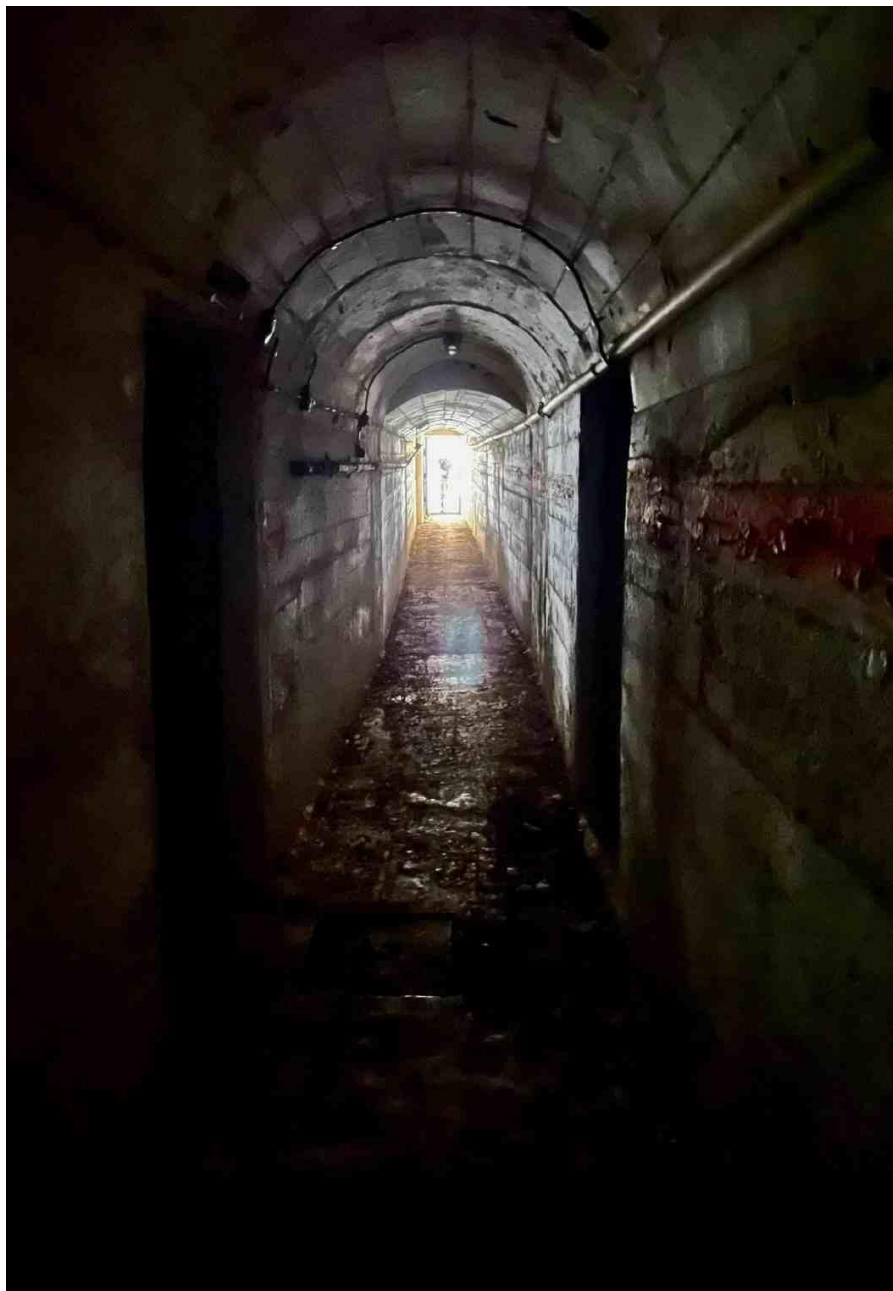


**Εικόνα 6.23** Κάτοψη και τομή σύνθετου επιφανειακού έργου στο οχυρό Ιστίμπεη (Πηγή: [www.festungsbauten.de](http://www.festungsbauten.de), Kupka, 2001)

#### 6.4.2 Υπόγειες κατασκευές

Σε κάθε οχυρωματικό συγκρότημα συναντάται ένα σύνολο καταφυγίων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ένα δαιδαλώδες δίκτυο στοών συγκοινωνίας (Εικόνα 6.24). Οι υπόγειες στοές και τα καταφύγια τυποποιήθηκαν, όπως και τα επιφανειακά έργα, προκειμένου να απλοποιηθεί η κατασκευή τους. Ωστόσο, το μέγεθος κάθε οχυρωματικού συγκροτήματος ήταν συνάρτηση της επιχειρησιακής αποστολής του, της αναμενόμενης απειλής, καθώς και των εδαφικών συνθηκών (Γκιρμπάτσης, 2018). Σημαντικό ρόλο έπαιζε επίσης η δυνατότητά του να καλύπτεται από γειτονικό οχυρό.

Όλοι οι υπόγειοι χώροι των οχυρωματικών έργων της Γραμμής Μεταξά κατασκευάστηκαν αποκλειστικά με τη μέθοδο της εξόρυξης, ακριβώς όπως στα ορυχεία και η κατασκευή τους προχωρούσε τμηματικά (Εικόνες 6.25 & 6.26). Η εκσκαφή απαιτούσε χάραξη των στοών με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια τόσο οριζόντια όσο και χωροσταθμικά. Για τον σκοπό αυτό καταρτιζόταν λεπτομερέστατο χωροσταθμικό σχεδιάγραμμα της διάταξης των στοών και καταφυγίων σε κλίμακα 1:200 (Δήμος Κάτω Νευροκοπίου, 2013). Η εκσκαφή κατευθυνόταν με ταχύμετρο και οι στοές υποστυλώνονταν με ξυλοδεσιές από ακατέργαστη ξυλεία.

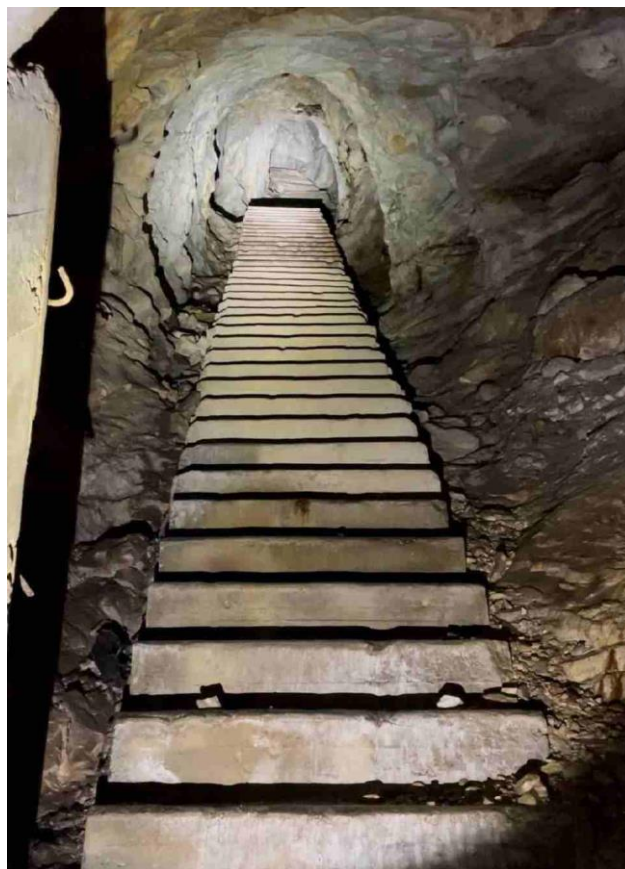


**Εικόνα 6.24** Στοά συγκοινωνίας με ευδιάκριτες τις εισόδους των καταφυγίων αριστερά και δεξιά (Πηγή: Γκιρμπάτσης, 2024)





**Εικόνα 6.25** Ημιτελής στοά στο οχυρό Λίσσε, κατασκευασμένη με τη μέθοδο της εξόρυξης (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



**Εικόνα 6.26** Ημιτελής στοά ανόδου με 220 σκαλοπάτια, στην οποία δεν πρόλαβαν να ολοκληρωθούν οι εργασίες επένδυσης με σκυρόδεμα (Πηγή: Γκιρμπάτσης, 2024)

Η εξόρυξη ξεκινούσε από τη νότια πλευρά του υψώματος που θα οχυρωνόταν. Αφού δημιουργούσαν έναν κεντρικό διάδρομο, από κει διακλαδίζονταν άλλοι μικρότεροι διάδρομοι που οδηγούσαν στους υπόλοιπους υπόγειους χώρους. Αρχικά, σκυροδετούσαν το δάπεδο αφήνοντας αναμονές για τα τοιχία. Στη συνέχεια σκυροδετούσαν τα τοιχία και τέλος την οροφή συνήθως σε μορφή θόλου. Οι αναμονές που αφήνονταν για την σύνδεση του δαπέδου με τα κατακόρυφα τοιχώματα και των τοιχωμάτων με την οροφή, αποτελούνταν από ράβδους χαλύβδινου οπλισμού συνήθως διαμέτρου Ø10, μήκους 60cm, οι οποίες τοποθετούνταν ανά 20cm. Στην Εικόνα 6.27 διακρίνονται οι αναμονές για τη σύνδεση του δαπέδου με τα τοιχία σε ημιτελές καταφύγιο του οχυρού Ρούπελ. Οι διατομές των δομικών στοιχείων των υπόγειων έργων ήταν πολύ μικρότερες συγκριτικά με τις διατομές των επιφανειακών έργων, καθώς δεν κινδύνευαν από άμεσο πλήγμα. Το σκυρόδεμα των στοών περιείχε  $250\text{kg/m}^3$  τσιμέντο και  $50\text{kg/m}^3$  θηραϊκή γη, ιδιαίτερα όταν επρόκειτο για υγρά εδάφη (Τάσιος, 2002).



**Εικόνα 6.27** Αναμονές για τη σύνδεση του δαπέδου με τα τοιχία σε ημιτελές καταφύγιο του οχυρού Ρούπελ (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)

Ο θόλος της οροφής καλυπτόταν από μια γαλβανιζέ λαμαρίνα για τη στεγανοποίησή του, ενώ μεταξύ της επένδυσης της στοάς και του φυσικού εδάφους παρεμβάλλονταν λιθορριπή για τη συνεχή αποστράγγιση του νερού. Το νερό κατευθυνόταν σε φρεάτιο, που υπήρχε κατά μήκος

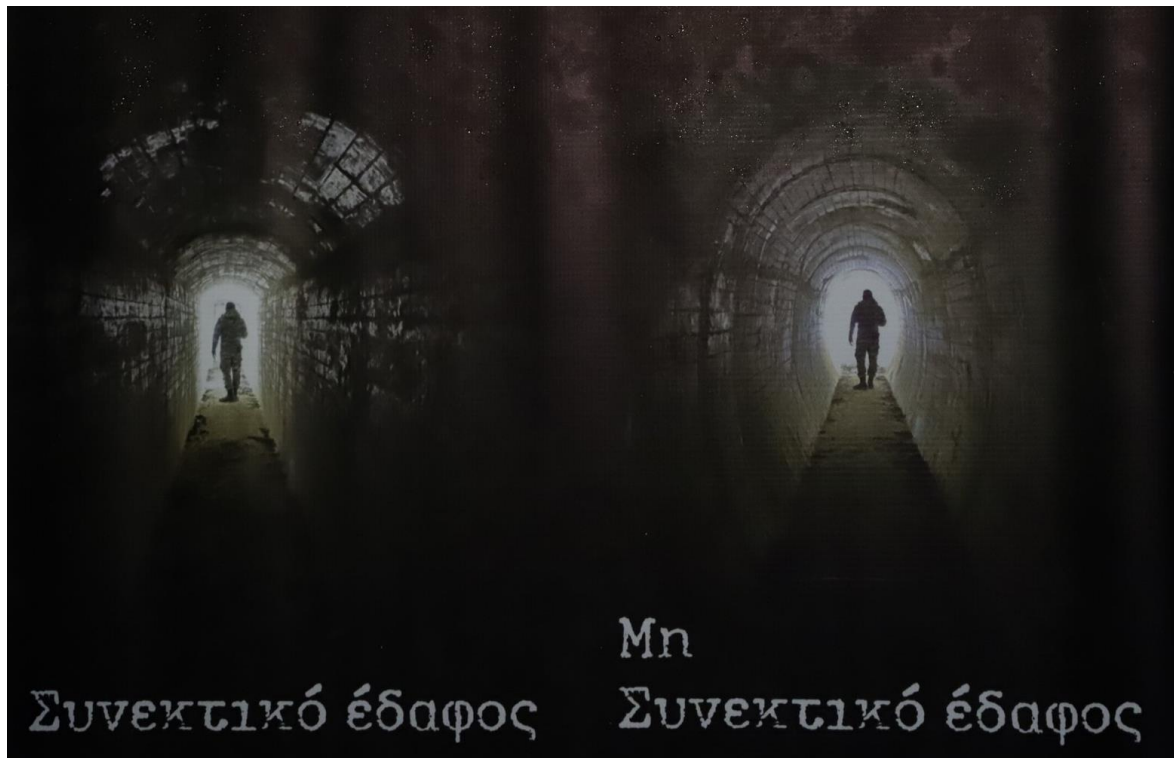


των στοών (Kurka, 2001). Στην Εικόνα 6.28 φαίνεται μια ημιτελής στοά στο οχυρό Ρούπελ. Διακρίνονται οι διατομές των τοιχίων και της οροφής της σήραγγας, περίπου 20cm, με τις αντίστοιχες αναμονές, η λαμαρίνα στεγανοποίησης και η λιθορριπή, που παρεμβάλλεται μεταξύ της επένδυσης της σήραγγας και του εδάφους για την αποστράγγιση του νερού.

Σε συνεκτικά βραχώδη εδάφη, όπου δεν υπήρχε κίνδυνος κατάρρευσης, οι διατομές των στοών και των καταφυγίων ήταν ορθογωνικές με ημικυκλική οροφή, ενώ σε μη συνεκτικά εδάφη η διατομή τους ήταν ωοειδής, ως στατικά ανθεκτικότερη (Εικόνα 6.29) (Γκιρμπάτσης, 2018). Επιπλέον, η επένδυση των υπόγειων στοών στην περίπτωση συνεκτικών εδαφών γινόταν με απλό σκυρόδεμα με πάχος δομικών στοιχείων 0,15-0,20μ., ενώ στα μη συνεκτικά εδάφη το πάχος των δομικών στοιχείων ήταν 0,20μ.



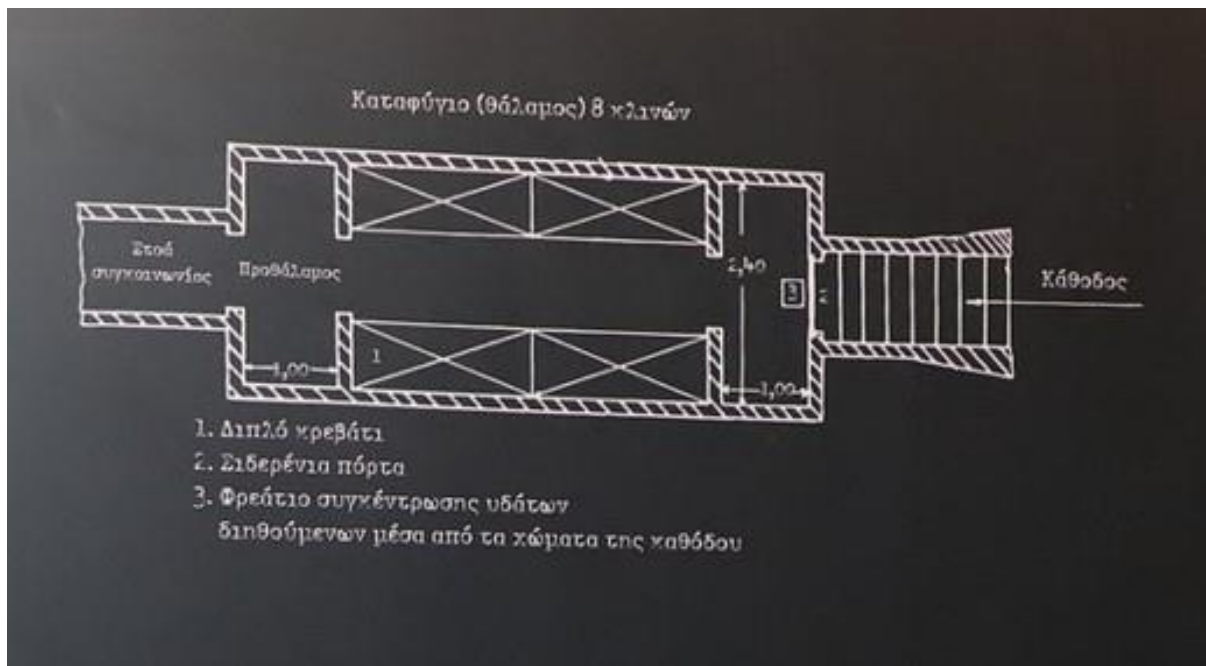
**Εικόνα 6.28** Ημιτελής στοά στο οχυρό Ρούπελ (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



**Εικόνα 6.29** Διατομές στοών ανάλογα με το έδαφος (Πηγή: Αφίσα του Γ.Ε.Σ. σε στοά του οχυρού Ρούπελ)

Το πλάτος των στοών συγκοινωνίας κυμαινόταν από 1,00-1,40μ. Τα καταφύγια που προορίζονταν για την ανάπαυση των οπλιτών είχαν πλάτος 2,40μ. για να χωράει διπλή σειρά κρεβατιών και διέθεταν δύο προθάλαμους, έναν σε κάθε άκρο του (Εικόνα 6.30). Οι προθάλαμοι διευκόλυναν την κυκλοφορία μέσα στα καταφύγια. Σε κάθε στρατιώτη αντιστοιχούσε επιφάνεια 4μ<sup>2</sup>, ενώ σε κάθε αξιωματικό 6μ<sup>2</sup> (Kurka, 2001). Το μέγεθος των ιατρικών εγκαταστάσεων (ιατρείο, χειρουργείο, αποθήκες ιατροφαρμακευτικού υλικού κτλ.) ήταν ανάλογο του αριθμού προσωπικού που υπηρετούσε σε κάθε οχυρωματικό συγκρότημα, και είχε μέγιστο πλάτος 3,00μ. Ο χώρος του μαγειρείου είχε πλάτος 2μ. και μήκος 3-4μ., ενώ υπήρχε και ένας χώρος με χρήση αποθήκης τροφίμων. Υπήρχαν επίσης χώροι υγιεινής συνήθως σε ξεχωριστό χώρο, καθώς και αρκετοί βοηθητικοί χώροι. Ο χώρος των μαγειρείων και οι τουαλέτες, συνήθως τοποθετούνταν κοντά στην είσοδο της κατασκευής, προκειμένου να ανανεώνεται πιο εύκολα ο αέρας.





**Εικόνα 6.30** Καταφύγιο ανάπαυσης οπλιτών (Πηγή: [www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org))

Η είσοδος σε κάθε υπόγειο σύστημα οχυρών, γινόταν με σκάλες ή με κεκλιμένες στοές, ενώ η κατακόρυφη επικοινωνία των υπόγειων στοών με τα επιφανειακά έργα γινόταν με κατακόρυφες και απότομες σκάλες (Εικόνα 6.31). Σε ορισμένες περιπτώσεις οι σκάλες από οπλισμένο σκυρόδεμα αντικαταστάθηκαν από ελικοειδείς μεταλλικές σκάλες μέσα σε φρεάτια,

ιδιαίτερα όταν αυτές οδηγούσαν σε παρατηρητήρια, τα οποία ήταν γενικά πολύ υπερυψωμένα σε σχέση με το υπόγειο σύστημα στοών (Εικόνα 6.32) (Kupka, 2001).



**Εικόνα 6.31** Απότομη σκάλα από οπλισμένο σκυρόδεμα που οδηγεί σε παρατηρητήριο (Πηγή: [www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org))

Ο προσανατολισμός του προσωπικού μέσα στον λαβύρινθο των υπόγειων χώρων υλοποιούνταν από μια μεταλλική βαμμένη γραμμή που φωσφόριζε πάνω στον δεξιό τοίχο των στοών (Εικόνα 6.33). Οι στρατιώτες γνώριζαν ότι αν η γραμμή βρισκόταν στα δεξιά τους, τότε κινούνταν προς το εσωτερικό, ενώ αν ήταν στα αριστερά τους κινούνταν προς την έξοδο. Κάθε επίπεδο κατασκευαζόταν ανεξάρτητο με δικές του εισόδους/εξόδους στην επιφάνεια.



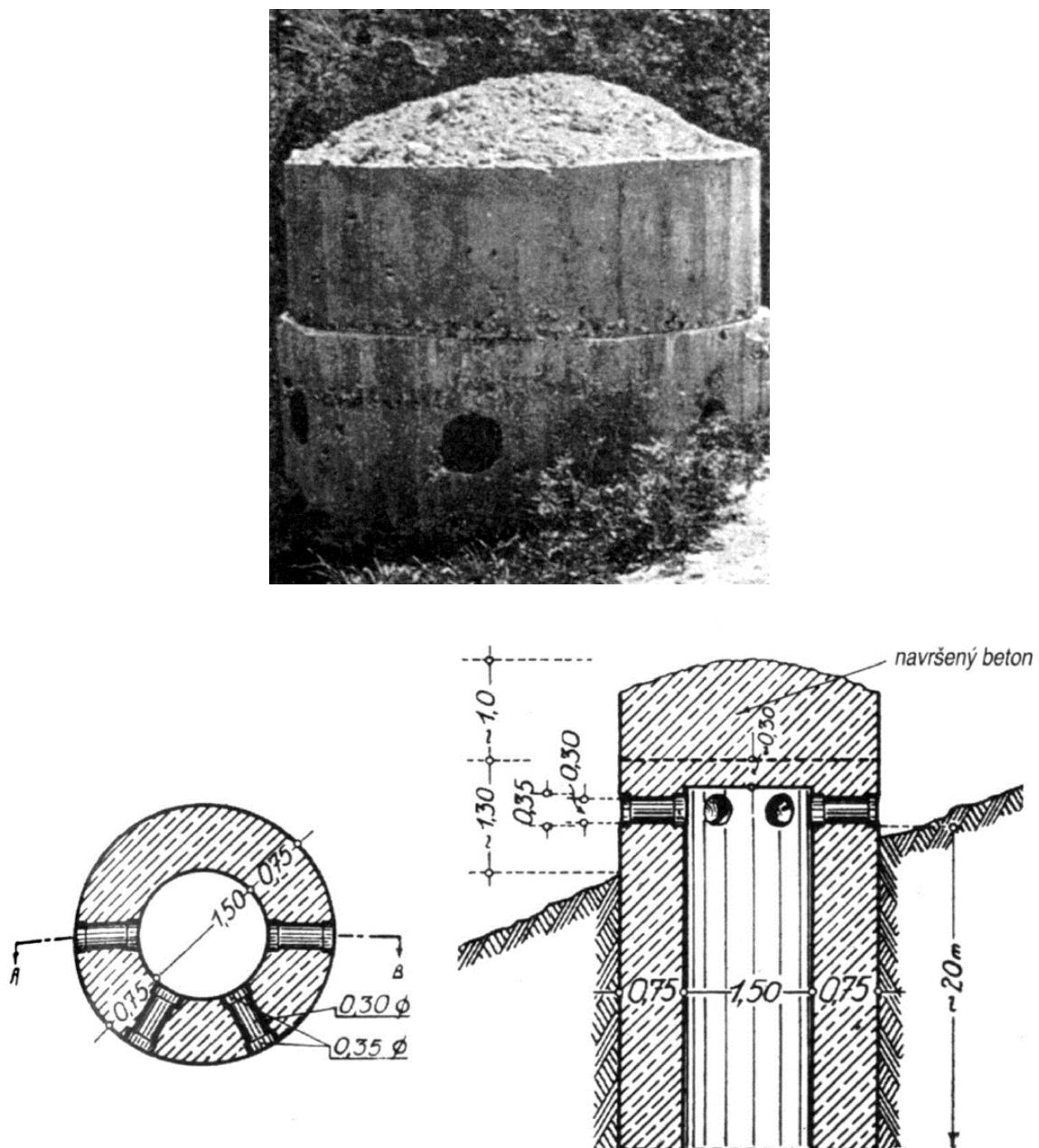
**Εικόνα 6.32** Ελικοειδής μεταλλική σκάλα σε φρεάτιο που οδηγεί σε παρατηρητήριο (Πηγή: [www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org))



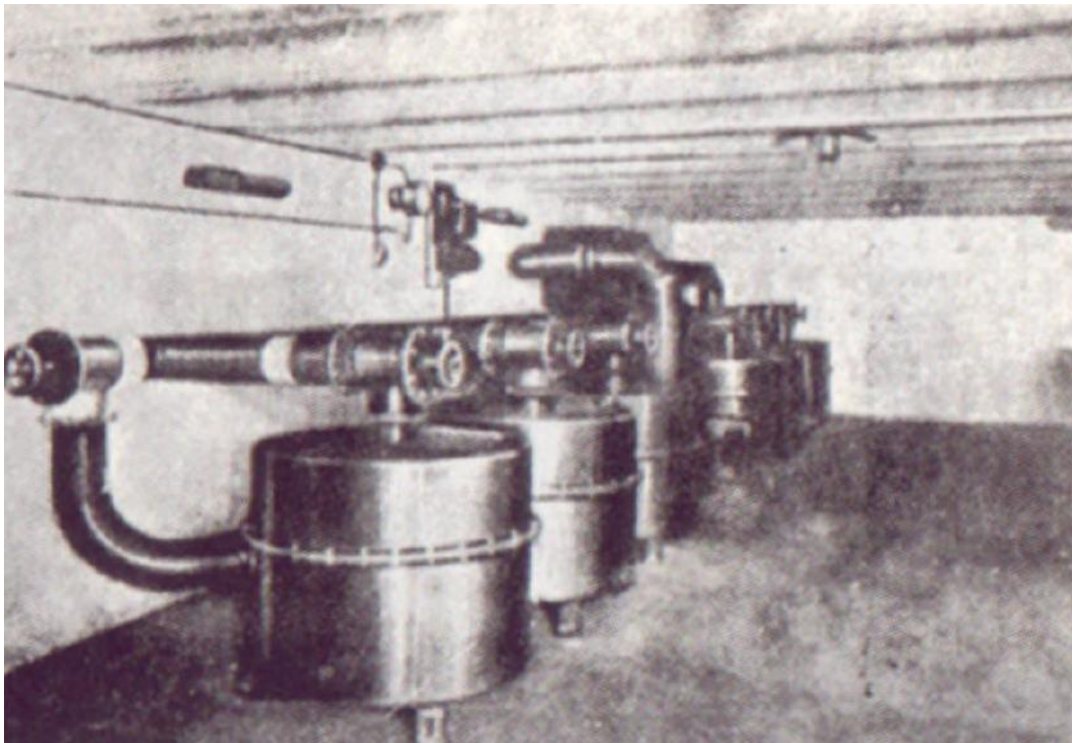
**Εικόνα 6.33** Σύστημα προσανατολισμού στις υπόγειες στοές (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Στα υπόγεια έργα χρησιμοποιήθηκε σύστημα τόσο φυσικού όσο και τεχνητού αερισμού. Η ανανέωση του αέρα γινόταν μέσα από μεταλλικούς μηχανισμούς καθαρισμού αέρα ([www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org)). Η απόληξη της κατασκευής του εξαερισμού κατέληγε στην επιφάνεια του εδάφους και διέθετε οπές (Εικόνα 6.34). Ξεχωριστό σωλήνα αερισμού διέθετε ο χώρος του μαγειρείου για να απομακρύνονται οι ατμοί και οι οσμές από την παρασκευή του φαγητού. Σε περίπτωση μόλυνσης με τοξικά αέρια ενεργοποιούνταν ο τεχνητός αερισμός, ο οποίος αφορά κυρίως σε χειροκίνητους αλλά και μηχανοκίνητους ανεμιστήρες, οι οποίοι προωθούσαν τον μολυσμένο αέρα σε ειδικά φίλτρα καθαρισμού (Εικόνα 6.35) (Kupka, 2001).

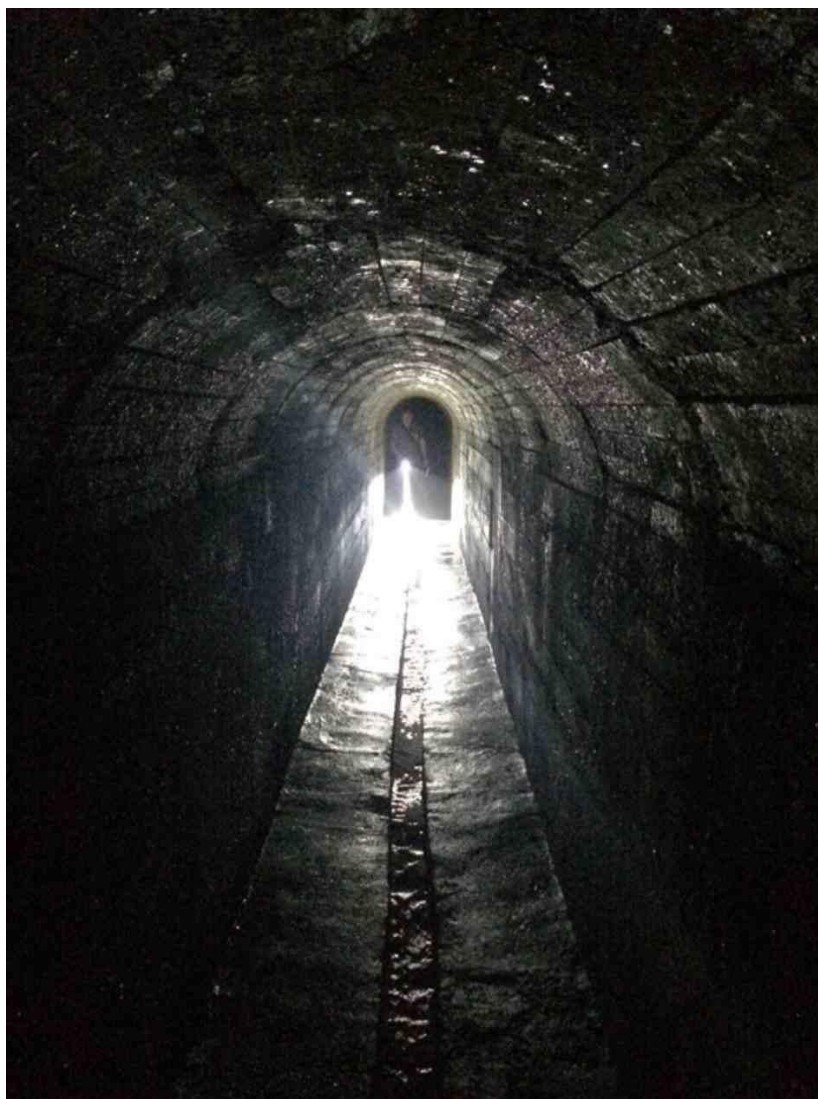


**Εικόνα 6.34** Απόληξη εξαερισμού στην επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: Kupka, 2001)



**Εικόνα 6.35** Φίλτρα καθαρισμού του αέρα (Πηγή: ΓΕΣ/ΔΙΣ, 1956)

Σε ολόκληρη τη Γραμμή Μεταξά κατασκευάστηκαν 15 συστήματα ύδρευσης, προκειμένου να εξασφαλιστούν οι απαραίτητες παροχές νερού, τόσο για το προσωπικό όσο και για τα όπλα ψύξης. Τα οχυρά υδροδοτούνταν από πηγές πλησίον των έργων. Τα επτά από τα δεκαπέντε συστήματα ύδρευσης λειτουργούσαν με τη βαρύτητα, ενώ στα υπόλοιπα εγκαταστάθηκε σύστημα αντλιοστασίου που επέτρεπαν άντληση νερού έως και 360μ. Οι δεξαμενές ήταν από οπλισμένο σκυρόδεμα χωρητικότητας 10μ<sup>3</sup> περίπου, ενώ ήταν επενδεδυμένες με γαλβανιζέ λαμαρίνα (Kurka, 2001). Είχαν επίσης κατασκευαστεί και εφοδιαστεί με νερό, σε καιρό ειρήνης, δεξαμενές αποθήκευσης νερού σε κάθε οχυρό, σε περίπτωση καταστροφής του συστήματος ύδρευσης. Στα οχυρά που δεν διέθεταν σύστημα ύδρευσης, το νερό προερχόταν από φυσικές πηγές και πηγάδια. Στην Εικόνα 6.36 φαίνεται μια συλλέκτρια στοά αντλιοστασίου στο οχυρό του Εχίνου, η οποία μετέφερε νερό στην υπόγεια δεξαμενή του αντλιοστασίου. Από κει με τη βοήθεια αντλίας, το νερό διοχετευόταν στις δεξαμενές των γειτονικών οχυρωματικών συγκροτημάτων ακόμα και σε απόσταση 3 χλμ. (Γκιρμπάτσης, 2018).



**Εικόνα 6.36** Αντλιοστάσιο στο οχυρό του Εχίνου (Πηγή: Γκιρμπάτσης, 2018)

Το εσωτερικό των κατασκευών φωτιζόταν κυρίως με λάμπες πετρελαίου, ενώ σε μερικά οχυρά είχαν εγκατασταθεί ηλεκτρογεννήτριες ([www.roupel.gr](http://www.roupel.gr)). Είχαν κατασκευαστεί υπόγεια μηχανοστάσια για μονάδες ντίζελ και αποθήκες καυσίμων και λιπαντικών για την ηλεκτροδότηση των οχυρών, ωστόσο μέχρι τον Απρίλιο του 1941, κανένα οχυρό δεν είχε ηλεκτροδοτηθεί.

Τέλος, τα υπόγεια καταφύγια διέθεταν αποθήκες πυρομαχικών, μέγιστου πλάτους 2,00μ. Οι αποθήκες πυρομαχικών έπρεπε να βρίσκονται σε ασφαλή απόσταση από τους κοιτώνες, ενώ οι χώροι αποθήκευσης πυροδοτικών μηχανισμών βομβίδων και οι χώροι όπλισης των βομβίδων έπρεπε να απέχουν πέντε μέτρα από τις αποθήκες πυρομαχικών. Η χωρητικότητα των αποθηκευτικών χώρων των πυρομαχικών ήταν ανάλογη των αναγκών του κάθε οχυρωματικού συγκροτήματος και θα έπρεπε να επαρκούν για 4 – 6 μέρες (Γκιρμπάτσης, 2018).

## 6.5 Οχυρό Ρούπελ

Το οχυρό Ρούπελ, θεωρείται η ναυαρχίδα της οχυρωματικής Γραμμής Μεταξά, καθώς είναι το μεγαλύτερο από τα 21 οχυρωματικά έργα, λόγω της στρατηγικής του θέσης. Βρίσκεται στο όρος Άγκιστρο, ανατολικά του ποταμού Στρυμόνα. Στη στενωπό του Ρούπελ, μπορούσε να αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός εχθρικών δυνάμεων, κάτι που δεν μπορούσε εύκολα να συμβεί στην υπόλοιπη συνοριακή γραμμή, εξαιτίας των δύσβατων ορεινών όγκων που παρεμβάλλονται ([www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org)).

Η αποστολή του οχυρού Ρούπελ ήταν να εμποδίσει τον εχθρό να εισχωρήσει μέσω της κοιλάδας του Στρυμόνα, στην πεδιάδα των Σερρών και από κει στο κύριο διοικητικό κέντρο που ήταν η Θεσσαλονίκη. Αυτό θα σήμαινε απώλεια της Ανατολικής Μακεδονίας και της Δυτικής Θράκης. Επομένως, το μέγεθος και η επιχειρησιακή αποστολή των έργων που κατασκευάστηκαν στην εν λόγω περιοχή, αντιστοιχεί στη στρατηγική σημασία της διατήρησης αυτού του περάσματος στα ελληνικά χέρια, το οποίο δεν περιοριζόταν μόνο στην ίδια την κοιλάδα του ποταμού Στρυμόνα, αλλά εκτεινόταν και κατά μήκος των κορυφογραμμών των οροσειρών τόσο προς τα δυτικά όσο και ανατολικά με συνολικό μήκος 25 χιλιόμετρα (Kurka, 2001).

Το τοπικό δίκτυο συγκοινωνίας της περιοχής, με κάποιες ελάχιστες εξαιρέσεις, ήταν ακατάλληλο για στρατιωτική χρήση και ως εκ τούτου, αποφασίστηκε να κατασκευαστεί νέο οδικό δίκτυο, προκειμένου αφενός να διευκολυνθεί η μεταφορά των οικοδομικών υλικών, αφετέρου να δημιουργηθεί σύνδεση μεταξύ των ενδιάμεσων θέσεων πυροβολικού.

Το οχυρό Ρούπελ αποτελούνταν από πέντε μεγάλα υπόγεια συγκροτήματα, δύο μικρότερα και εννέα μεμονωμένα πολυβολεία. Τα τρία από αυτά επικοινωνούσαν μεταξύ τους με υπόγειες στοές. Σε αυτά στεγάζονταν πέντε λόχοι πεζικού, μια διμοιρία όλμων, το πυροβολικό πλαγιοφύλαξης, μια διμοιρία αντιαεροπορικών και ο λόχος διοικήσεως. Οι οχυρώσεις έχουν κατασκευαστεί σε τρία διαφορετικά επίπεδα, ενώ σε κάποια επιφανειακά σημεία, το πάχος του οπλισμένου σκυροδέματος αγγίζει τα 2,5μ. Συνολικά διέθετε 123 επιφανειακά έργα (Εικόνα 6.37), τα οποία ανατινάχθηκαν από τους βουλγαρικές δυνάμεις κατοχής την περίοδο 1941-1944 (χωρίς ωστόσο να καταστραφούν εντελώς), 1.849 μέτρα καταφυγίων και 4.251 μέτρα στοών συγκοινωνίας. Η αντοχή των επιφανειακών έργων σε μεμονωμένες βολές ήταν για πολυβόλο 220mm. Ήταν επανδρωμένο από 44 αξιωματικούς και 1.353 οπλίτες (Γκιρμπάτσης, 2018). Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται η χαρτογράφηση όλων των κατασκευών του οχυρού, τόσο των

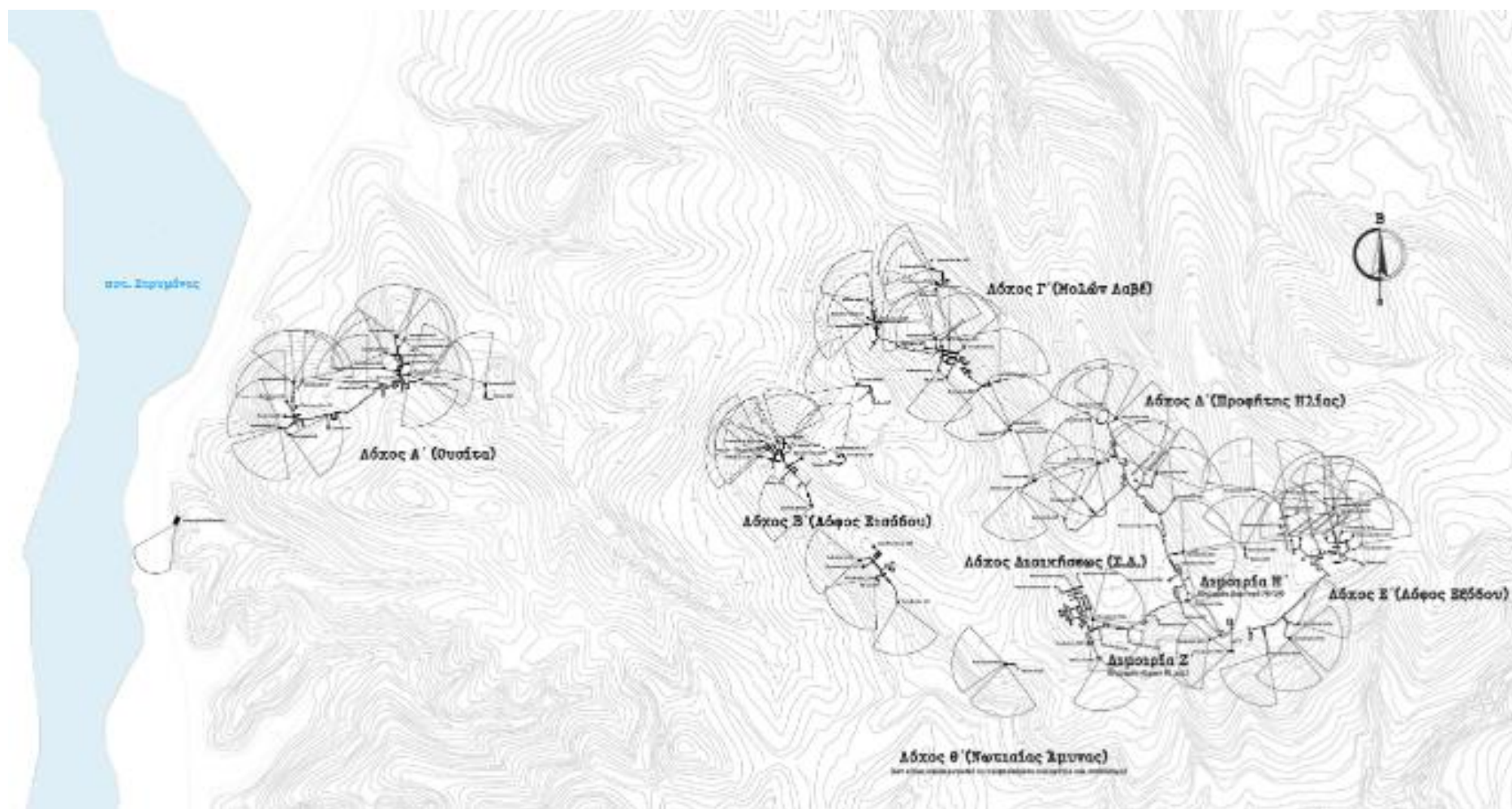
επιφανειακών όσο και των υπόγειων), που ολοκληρώθηκε το 2017 από την Εταιρεία Μελέτης Οχυρωματικής Γραμμής Μεταξά «Γοργύρα».



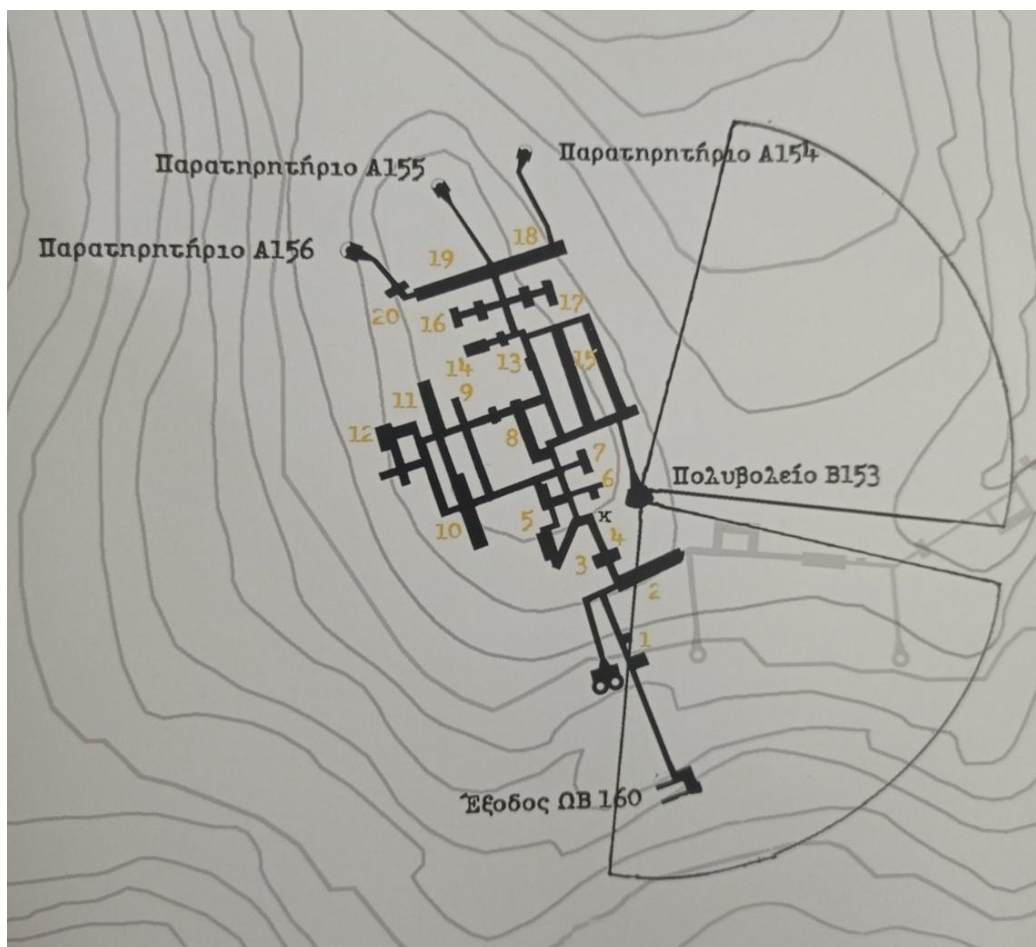
**Εικόνα 6.37** Αεροφωτογραφία με την τοποθεσία των 123 επιφανειακών έργων του οχυρού Ρούπελ που ανατινάχθηκαν από τις βουλγαρικές δυνάμεις κατοχής (Πηγή: [www.metaxaline.org](http://www.metaxaline.org))

Η καρδιά του οχυρού και ένα από τα 5 υπόγεια συγκροτήματα, ήταν ο Σταθμός Διοικήσεως, η κάτοψη του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Η είσοδος της κεντρικής στοάς, η οποία ήταν μικτή (για προσωπικό και για οχήματα), θεωρούνταν και αυτή επιφανειακό έργο και διέθετε μια θέση πολυβολείου και ένα σκέπαστρο μήκους 7 μέτρων και ύψους 3 μέτρων, που χρησιμοποιούνταν για την ασφαλή φορτοεκφόρτωση οχημάτων (Εικόνα 6.38) ([www.metaxasline.org](http://www.metaxasline.org)). Από την είσοδο, μια κεκλιμένη κεντρική στοά, η οποία κατέληγε στα τρία κεντρικά παρατηρητήρια του οχυρού, οδηγούσε στους υπόγειους χώρους του έργου. Από αυτή τη στοά, διακλαδίζονταν δευτερεύουσες στοές που οδηγούσαν στους υπόλοιπους χώρους.





Σχήμα 6.5 Χαρτογράφηση οχυρού Ρούπελ (Πηγή: [www.metaxaline.org](http://www.metaxaline.org))



**Σχήμα 6.6** Κάτοψη του Σταθμού Διοικήσεως του οχυρού Ρούπελ (Πηγή: [www.metaxaline.org](http://www.metaxaline.org))



**Εικόνα 6.38** Είσοδος κεντρικής στοάς του οχυρού Ρούπελ (Πηγή: Κυρκα, 2001)

Αρχικά, συναντά κανείς τους χώρους υγιεινής και κάποια καταφύγια ανάπαυσης. Στη συνέχεια το γραφείο του λοχαγού και το τηλεφωνικό κέντρο, ενώ παρακάτω είχαν τοποθετηθεί οι αποθήκες πυρομαχικών. Συνεχίζοντας στην κεντρική στοά, δεξιά υπάρχει η δεξαμενή νερού ενώ αριστερά ο σταθμός πρώτων βοηθειών, ο οποίος περιλάμβανε θαλάμους τραυματιών και ασθενών, χειρουργεία με θάλαμο αποστείρωσης, φαρμακείο και θάλαμο ιατρών. Στο ύψος του ιατρείου ήταν και το μαγειρείο του οχυρού με τις αντίστοιχες αποθήκες τροφίμων. Ακολουθούν καταφύγια ανάπαυσης οπλιτών και στη συνέχεια τα γραφεία των Αξιωματικών, το τηλεφωνικό κέντρο και ακολουθούν και άλλοι θάλαμοι ανάπαυσης για το υπόλοιπο προσωπικό. Στο τέλος των διαδρόμων συναντά κανείς τις σκάλες που οδηγούσαν στα παρατηρητήρια. Τέλος υπήρχε ο θάλαμος ασυρμάτου και ο χώρος όπου ήταν εγκαταστημένη η γεννήτρια παραγωγής ρεύματος. Αυτοί οι δύο χώροι βρίσκονταν κάτω από παρατηρητήριο, ώστε το μήκος της καθόδου της κεραίας να έχει το μικρότερο δυνατό μήκος.

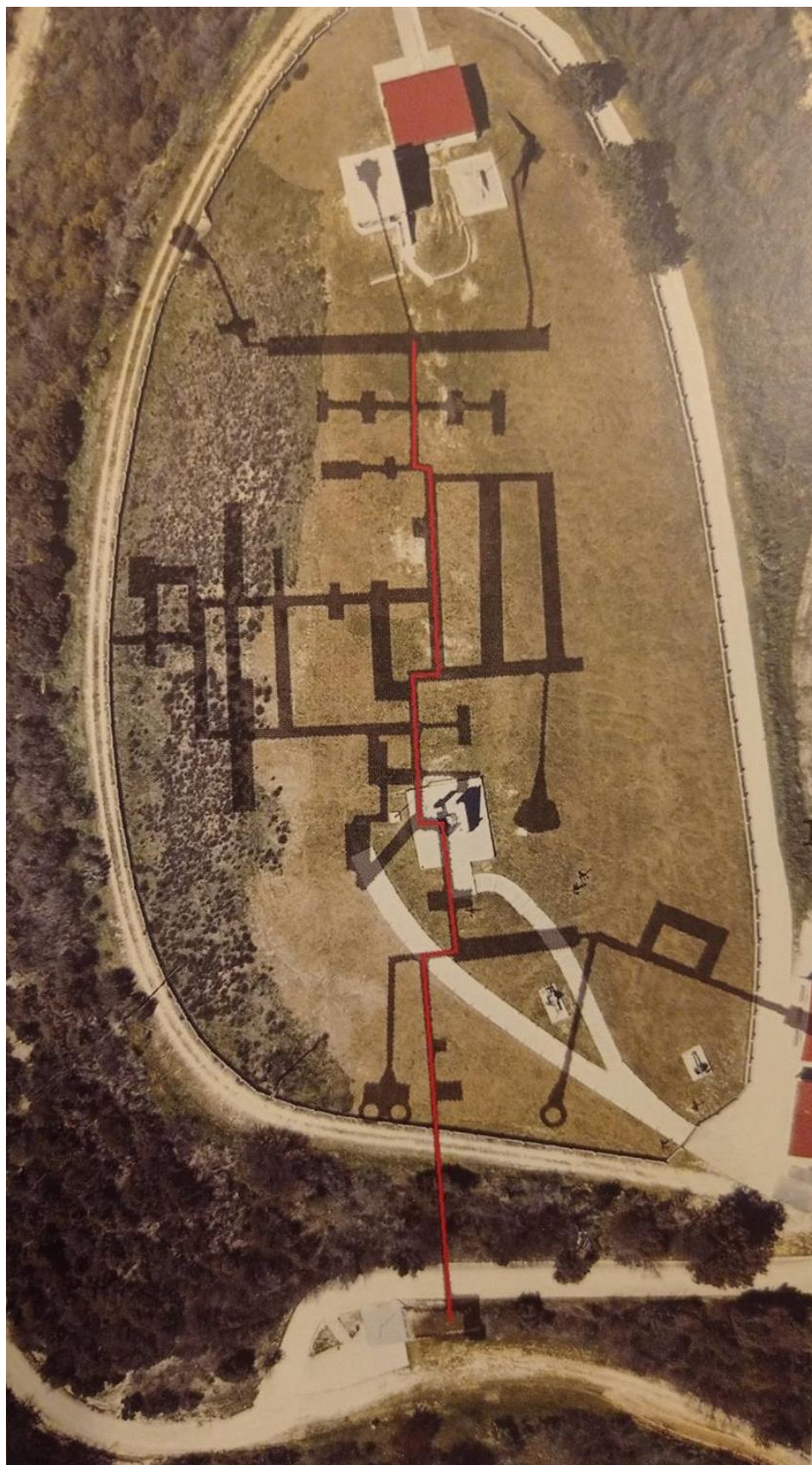
Την περίοδο 1941-1944 καταστράφηκε ένα πολύ μεγάλο μέρος των υπόγειων κατασκευών και σχεδόν το σύνολο των επιφανειακών έργων. Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1960 και 1970 ανακατασκευάστηκε μεγάλο μέρος των οχυρωματικών έργων του Ρούπελ και χρησιμοποιήθηκε εκ νέου στον αμυντικό σχεδιασμό της χώρας ([www.roupel.gr](http://www.roupel.gr)).

Σήμερα το οχυρό Ρούπελ, θεωρείται ενεργή στρατιωτική μονάδα. Στο ψηλότερο σημείο του λόφου δεσπόζει το μνημείο που κατασκευάστηκε προς τιμή των πεσόντων της «Μάχης των Οχυρών του 1941», ενώ λειτουργεί και μουσείο όπου εκτίθενται στολές, οπλισμός, σημαίες του Ελληνικού και Γερμανικού Στρατού κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, καθώς και μια μακέτα του οχυρού (Εικόνα 6.39). Επισκέψιμη για το κοινό είναι η κεντρική στοά που στέγαζε τον Σταθμό Διοικήσεως και λειτουργεί ως μουσειακός χώρος (Εικόνα 6.40).



**Εικόνα 6.39** Μακέτα του οχυρού Ρούπελ, που βρίσκεται στο Μουσείο του οχυρού (Πηγή: <https://roupelserron.blogspot.com/>)





**Εικόνα 6.40** Αεροφωτογραφία στην οποία είναι αποτυπωμένη η επισκέψιμη στοά του οχυρού Ρούπελ (Πηγή: Γκιρμπάτσης, 2018)

## 6.6 Οχυρό Λίσσε

Στο ΝΑ τμήμα του οροπεδίου του Κάτω Νευροκοπίου, στο μοναδικό βραχώδες (από γρανίτη) ύψωμα, βρίσκεται σε υψόμετρο 771μ, το δαιδαλώδες οχυρωματικό συγκρότημα Λίσσε. Το οχυρό Λίσσε, ήταν το δεύτερο, μετά το Ρούπελ, σε δύναμη οχυρό της Γραμμής Μεταξά. Η στρατηγική σημασία του λόφου και η οπτική επαφή που έχει με όλα τα σημεία στρατηγικού ενδιαφέροντος, τον κατέστησαν ιδανική περιοχή για την κατασκευή της οχύρωσης, ενώ βρίσκεται κοντά στην κύρια οδική αρτηρία Βουλγαρίας-Ελλάδας (Εικόνα 6.41).

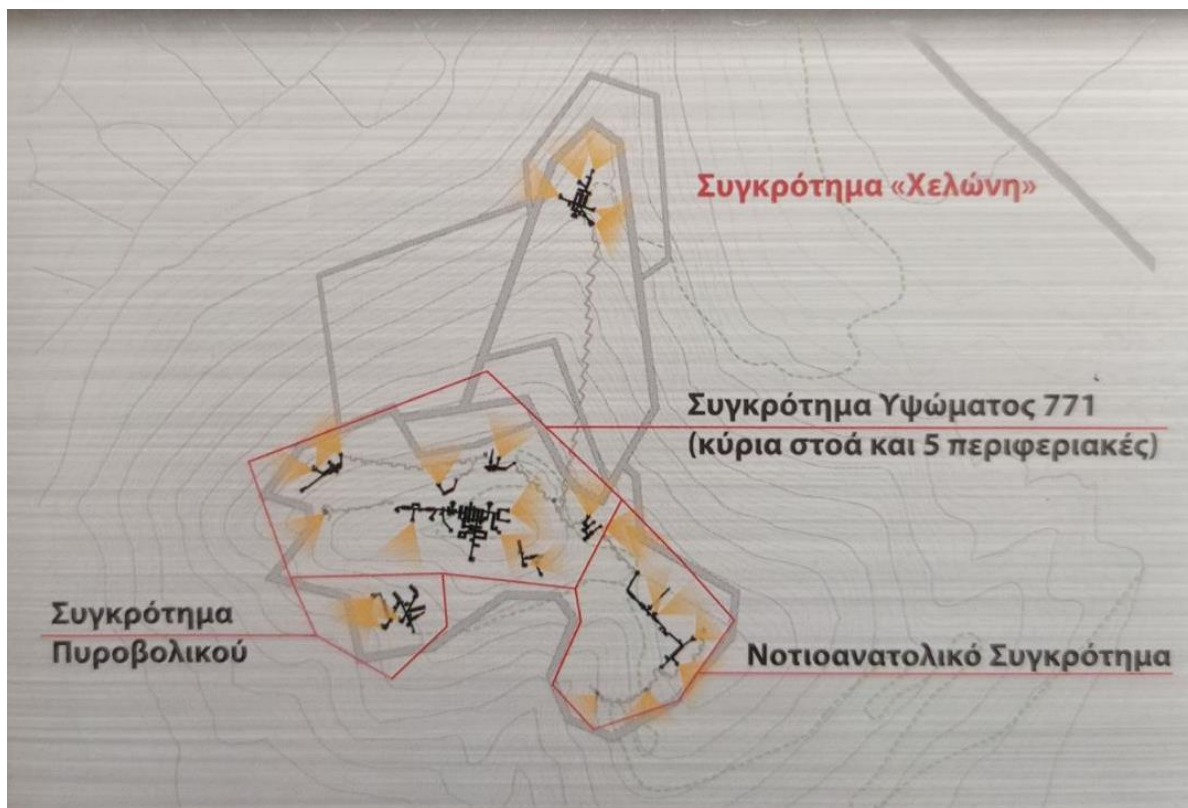


**Εικόνα 6.41** Θέση οχυρού Λίσσε (Πηγή: [www.slideplayer.gr](http://www.slideplayer.gr))

Το οχυρό Λίσσε αποτελούνταν από έναν σημαντικό αριθμό οχυρωματικών έργων, τα οποία συνδέονταν με ένα κεντρικό υπόγειο σύστημα καταφυγίων και στοών μέγιστου βάθους από την επιφάνεια του εδάφους 25 μέτρων. Σκάφτηκε εξολοκλήρου σε συμπαγή βράχο. Διέθετε 26 επιφανειακά έργα, μεταξύ αυτών 21 πολυβολεία και πυροβολεία (μονά και σύνθετα), 8 παρατηρητήρια, 3 βομβιδοβολεία και 7 έξοδοι. Η αντοχή τους σε μεμονωμένες βολές ήταν για πολυβόλο 220mm. Το συνολικό μήκος των στοών συγκοινωνίας ανέρχεται στα 950 μέτρα και των καταφυγίων στα 790 μέτρα. Ήταν επανδρωμένο με 12 αξιωματικούς και 457 υπαξιωματικούς και οπλίτες ([www.lisse.gr](http://www.lisse.gr)). Το οχυρό στο σύνολό του, αποτελούνταν από εννέα συγκροτήματα -5 μεγάλα και 4 μικρά-, τα οποία βρίσκονταν σε διαφορετικά επίπεδα, και δεν επικοινωνούσαν μεταξύ τους κατακόρυφα (Σχήμα 6.7). Η μεταξύ τους σύνδεση εξασφαλιζόταν από ένα σύστημα επιφανειακών τάφρων, το οποίο είχε δημιουργηθεί στον



βράχο με εκρηκτικά και χρησιμοποιούνταν επιπλέον και για την ανάπτυξη δυνάμεων σε πιθανή σύρραξη (Kupka, 2001).



**Σχήμα 6.7** Σχεδιάγραμμα υπόγειων συγκροτημάτων οχυρού Λίσσε (Πηγή: Δήμος Κάτω Νευροκοπίου, 2013)

Τα υπόγεια συγκροτήματα περιλάμβαναν θαλάμους αξιωματικών και οπλιτών, γραφεία διοίκησης, χώρους υγιεινής, μαγειρεία, αποθήκες πυρομαχικών κ.α., επικοινωνούσαν μεταξύ τους με στοές και κατέληγαν σε παρατηρητήρια, πολυβολεία, ολμοβολεία αντιαρματικά και άλλα επιφανειακά έργα. Το βορειότερο υπόγειο συγκρότημα ονομάζεται «Χελώνη» και αποτελεί το επισκέψιμο τμήμα του οχυρού (Σχήμα 6.8). Η αποστολή του ήταν να εμποδίζει τη διέλευση τεθωρακισμένων στις διαβάσεις που προστάτευε το Λίσσε (Δήμος Κάτω Νευροκοπίου, 2013). Οι υπόγειες στοές του καταλήγουν σε τέσσερα επιφανειακά πολυβολεία. Το βάθος των υπόγειων τμημάτων του κυμαίνεται ανάλογα με την κλίση του εδάφους από 11-15 μέτρα.



**Σχήμα 6.8** Σχεδιάγραμμα των χώρων της «Χελώνης» του οχυρού Λίσσε με τα αντίστοιχα υπομνήματα (Πηγή: Δήμος Κάτω Νευροκοπίου, 2013)

Το οχυρό Λίσσε λειτουργεί σήμερα ως θεματικό πάρκο με πρωτοβουλία του Δήμου Κάτω Νευροκοπίου, ενώ λειτουργεί μουσείο με ψηφιακές εφαρμογές. Επισκέψιμο είναι το συγκρότημα «Χελώνη» που λειτουργεί ως μουσειακός χώρος (Εικόνα 6.42).





**Εικόνα 6.42** Καταφύγιο του συγκροτήματος «Χελώνη» που λειτουργεί ως μουσειακός χώρος  
(Πηγή: [www. : www.metaxaline.org](http://www.metaxaline.org))

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνική των στρατιωτικών οχυρώσεων του εδάφους άλλαξε μέσα στο πέρασμα του χρόνου, καθώς λόγω της συνεχούς εξέλιξης της στρατιωτικής τεχνολογίας και της βελτίωσης των οπλικών συστημάτων, προέκυψε η ανάγκη κατασκευής σύγχρονων οχυρωματικών έργων και ενίσχυσης των ήδη υφιστάμενων. Αυτό που προέχει σε κάθε στρατιωτική επιχείρηση είναι πρωτίστως η επιβίωση του προσωπικού και ακολουθεί η προστασία του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων, που εξυπηρετούν την αποστολή του έργου.

Βασικό κανόνα κατά τις αμυντικές επιχειρήσεις, αποτελεί η κατάλληλη επιλογή εδάφους και η πλήρης εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών του. Η εφαρμογή της τεχνικής γεωλογίας είναι πλέον αναγκαία σε στρατιωτικά επιχειρησιακά θέματα και η εκπόνηση τεχνικογεωλογικών μελετών στο πεδίο είναι ιδιαίτερα καθοριστική για την εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων και την ερμηνεία των γεωλογικών συνθηκών μιας περιοχής, κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή στρατιωτικών έργων. Τα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία είναι αυτά που καθορίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διάδοση του ωστικού κύματος και της εδαφικής δόνησης μετά από έκρηξη, ενώ η εκμετάλλευση του τοπικού ανάγλυφου συμβάλλει στην κάλυψη και απόκρυψη μιας στρατιωτικής κατασκευής. Γενικά, η κατασκευή ενός οχυρωματικού έργου σε καλής ποιότητας βραχώμαζα, μειώνει κατά πολύ την πιθανότητα προσβολής του από άμεσο πλήγμα.

Ο σχεδιασμός των νέων οχυρωματικών έργων, αλλά και η ενίσχυση των υφιστάμενων, απαιτεί συνδυασμό γεωτεχνικών, δομοστατικών και επιχειρησιακών παραμέτρων. Κατά τον σχεδιασμό μιας οχυρωματικής κατασκευής πρέπει οπωσδήποτε να εξετάζονται, ο επιχειρησιακός της ρόλος, το κόστος και η συμπεριφορά που καλείται να αναπτύξει σε ενδεχόμενο πλήγμα. Επιπλέον, ο σχεδιασμός καθορίζεται από το όπλο σχεδιασμού, την τοποθεσία, την σωστή διαρρύθμιση των εσωτερικών χώρων, καθώς και από τα μέτρα απόκρυψης της κατασκευής. Το όπλο σχεδιασμού με τη σειρά του καθορίζεται από το είδος του έργου και το επίπεδο ασφαλείας, προκειμένου να εκτιμηθεί η απειλή που θα δεχτεί η κατασκευή.

Η κατασκευή υπόγειων έργων είναι μια συνήθης τακτική στα στρατιωτικά έργα, καθώς οι υπόγειες κατασκευές παρέχουν υψηλό βαθμό προστασίας, δεν κινδυνεύουν από άμεσο πλήγμα και προσφέρουν υψηλή κάλυψη, ώστε η κατασκευή να είναι πρακτικά μη ανιχνεύσιμη. Ωστόσο, η μορφή της κατασκευής, δηλ. αν πρόκειται για υπέργειο ή υπόγειο έργο, καθώς και

ο τρόπος κατασκευής του, καθορίζεται από το επίπεδο ασφαλείας του έργου, το όπλο σχεδιασμού, το τοπογραφικό ανάγλυφο, στρατηγικά και οικονομοτεχνικά κριτήρια. Για αυξημένες απαιτήσεις προστασίας, επιλέγεται η κατασκευή των έργων με τη μορφή σιράγγων σε βραχώδεις όγκους, για μέση προστασία η κατασκευή με μεθόδους cut-and-cover, ενώ για χαμηλή έως μέση προστασία η κατασκευή πάνω ή πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι βλάβες που προκαλούν τα συμβατικά όπλα στα οχυρωματικά έργα, οφείλονται στη διείσδυση του βλήματος σε κάποιο δομικό στοιχείο, στο ωστικό κύμα και στα θραύσματα, που δημιουργούνται λόγω πυροδότησης ενός βλήματος στον αέρα και στην εδαφική δόνηση, που προκαλείται από πυροδότηση βλήματος εντός του εδάφους. Οι δράσεις αυτές θα πρέπει να αναλαμβάνονται με ασφάλεια από την κατασκευή, ώστε να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη λειτουργία της.

Η πρόσκρουση ενός βλήματος σε ένα δομικό στοιχείο μιας κατασκευής, μπορεί να προκαλέσει από ελάχιστη ζημιά, μέχρι ολοκληρωτική διάτρηση του δομικού στοιχείου. Επιπλέον, λόγω της διείσδυσης, μπορεί να σχηματιστεί κρατήρας στην επιφάνεια της πρόσκρουσης και να προκληθεί αποφλοίωση στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Η συμπεριφορά του στόχου από οπλισμένο σκυρόδεμα σε ενδεχόμενη διείσδυση, εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του σκυροδέματος, την κοκκομετρία των αδρανών και σε μικρότερο βαθμό από τον οπλισμό. Για να προστατευθούν τα υπόγεια οχυρωματικά έργα έναντι διείσδυσης, κατασκευάζονται σε ικανοποιητικό βάθος και ιδανικά κάτω από επίχωση αμμοχάλικου κατάλληλου πάχους. Πάνω από την επίχωση κατασκευάζεται μια πλάκα σκυροδέματος, η πλάκα προανατίναξης, ώστε να εκτραπεί η πορεία του βλήματος και η έκρηξή του να γίνει σε ασφαλή απόσταση από την κατασκευή.

Για τις βλάβες που προκαλούνται από ωστικό κύμα και εδαφική δόνηση, θα πρέπει οι κατασκευές να σχεδιάζονται έναντι μεγάλων κραδασμών, καθώς τα φορτία που παράγονται σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ υψηλής έντασης και δημιουργούν μεγάλες πιέσεις στην κατασκευή. Οι πιέσεις αυτές εξαρτώνται από το μέσο διάδοσης του κύματος. Για κοντινές στην κατασκευή εκρήξεις, το φορτίο του ωστικού κύματος είναι πιο ισχυρό. Ειδικά στο έδαφος, η δόνηση εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους (είδος, κοκκομετρία, σχετική πυκνότητα και βαθμός κορεσμού), ενώ ένα κορεσμένο έδαφος αυξάνει τις πιθανότητες αστοχίας και για τον λόγο αυτό δεν συνιστάται η κατασκευή έργων σε εδάφη με υψηλούς υδροφόρους ορίζοντες.

Κατόπιν σύγκρισης των σχεδιαστικών παραμέτρων των πολιτικών έργων με τα στρατιωτικά οχυρωματικά έργα, συμπεραίνονται τα εξής:

1. Τα γεωλογικά, γεωτεχνικά, κλιματολογικά και τοπογραφικά στοιχεία που συλλέγονται και μελετώνται για τον σχεδιασμό ενός οχυρωματικού έργου, είναι αντίστοιχα με τα στοιχεία που απαιτούνται και για ένα πολιτικό έργο αντίστοιχου μεγέθους. Η βασικότερη διαφορά είναι η επίδραση των γεωλογικών παραγόντων, αφενός στη διάδοση του ωστικού κύματος και της εδαφικής δόνησης που θα παραχθεί σε ενδεχόμενη έκρηξη, αφετέρου στις συνθήκες κάλυψης και απόκρυψης του έργου.
2. Τα φορτία κρούσης, έκρηξης και διείσδυσης, με τα οποία μελετώνται τα οχυρωματικά έργα, συγκριτικά με τα φορτία, βάσει των οποίων σχεδιάζονται οι συμβατικές πολιτικές κατασκευές, είναι φορτία τα οποία προκαλούν πολύ μεγάλες πιέσεις για πολύ λίγο χρόνο, έχουν συνήθως τοπικό χαρακτήρα και μεγάλες αυξομειώσεις, ενώ η διέγερση που προκαλούν στην κατασκευή μεταδίδεται με την ταχύτητα του ωστικού κύματος και όχι ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία της.
3. Η απόκριση μιας κατασκευής σε σεισμό είναι πολύ διαφορετική συγκριτικά με την απόκριση της ίδιας κατασκευής σε έκρηξη. Αν και τα φορτία και στις δύο περιπτώσεις θεωρούνται δυναμικά, η διάρκεια ενός σεισμού είναι αρκετών δευτερολέπτων ή και περισσότερο, ενώ μια έκρηξη διαρκεί κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου. Επιπλέον, ενώ η εδαφική επιτάχυνση κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, παρουσιάζει πολλές αυξομειώσεις, σε μία έκρηξη υπάρχει μόνο μία στιγμιαία υπερπίεση.

Ολοένα αυξανόμενη είναι η χρησιμοποίηση νέων υλικών και τεχνολογίας στην κατασκευή νέων οχυρωματικών έργων αλλά και στην ενίσχυση των υφιστάμενων. Υλικά όπως σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ), ινοπλισμένα σκυροδέματα με ίνες κυρίως χάλυβα και πολυπροπυλενίου ή σκυροδέματα υψηλής και υπερ-υψηλής αντοχής, με την προσθήκη ειδικών προσμίκτων, έχει αποδειχτεί ότι αυξάνουν την αντοχή των κατασκευών, με αποτέλεσμα τα δομικά τους στοιχεία να αποκρίνονται επιτυχώς στη δράση του όπλου σχεδιασμού. Γενικά, η προσθήκη νέων υλικών ενισχύει τις κατασκευές έναντι κρουστικών και εκρηκτικών φορτίων, ενώ μειώνει το βάθος διείσδυσης ενός βλήματος σχεδιασμού κατά περίπου 30%.

Η οχυρωματική Γραμμή Μεταξά κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων, αποτέλεσε ένα τεράστιο τεχνικό έργο για την εποχή του, αν λάβει κανείς υπόψη, εκτός από τα εκατοντάδες επιφανειακά έργα και τα χιλιάδες μέτρα υπόγειων στοών και καταφυγίων, τους απροσπέλαστους ορεινούς όγκους, τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες και την οικονομική

κατάσταση της χώρας εκείνη την περίοδο. Κι όμως αυτό το έργο ολοκληρώθηκε σε μόλις τέσσερα χρόνια και με πολύ λίγα χρήματα για εκείνη την εποχή. Το συνολικό έργο συνδύαζε έργα οδοποιίας, σηράγγων, επιφανειακών έργων, ύδρευσης, αποχέτευσης, εξαερισμού, φωτισμού και τάφρων χαρακωμάτων.

Βασικό στοιχείο του σχεδιασμού, αποτέλεσε η πλήρης εκμετάλλευση του ορεινού ανάγλυφου και όλων των φυσικών εμποδίων, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη κάλυψη και προστασία των κατασκευών και να μειωθούν τα τεχνητά κωλύματα. Επιπλέον, ο τύπος του εδάφους και το πάχος του πάνω από τις υπόγειες κατασκευές, έπαιξε σημαντικό ρόλο στην προστασία τους και στον περιορισμό των εδαφικών δονήσεων από έκρηξη βλήματος. Ειδικά σε βραχώδες έδαφος, το πάχος μειωνόταν σημαντικά συγκριτικά με τα κοινά ή τα συνεκτικά εδάφη.

Τα μόνιμα έργα της Γραμμής Μεταξά κατασκευάστηκαν από οπλισμένο σκυρόδεμα. Καθιερώθηκαν τρία επίπεδα αντίστασης των κατασκευών, με βάση την αντίσταση σε πυροβόλο διαμετρήματος 105mm, 155mm και 220mm, κατ' αντιστοιχία με το όπλο σχεδιασμού των σημερινών κανονισμών. Για την κατασκευή των επιφανειακών έργων των δύο μεγαλύτερων οχυρών, του οχυρού Ρούπελ και του οχυρού Λίσσε, ο σχεδιασμός έγινε για αντίσταση σε πυροβόλο 220mm.

Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην πλαστιμότητα του σκυροδέματος, χωρίς ωστόσο να υπάρξουν παρεκκλίσεις από την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα νερού, στην αφαίρεση των ξυλοτύπων στις 12 ημέρες, καθώς και στην τέλεια σκλήρυνση του σκυροδέματος. Γενικά, όλοι οι έλεγχοι των δοκιμίων που έγιναν στο Μετσόβιο Πολυτεχνείο έδωσαν εξαιρετικά αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη και αποδείχτηκε ότι τα μέτρα που πάρθηκαν για την παρασκευή ενός ποιοτικά άριστου σκυροδέματος και η σχολαστική επίβλεψη των μηχανικών αξιωματικών, είχε ως αποτέλεσμα την κατασκευή έργων με εξαιρετική αντοχή.

Η μελέτη του συνολικού έργου, που συντάχθηκε από τους Καθηγητές του Πολυτεχνείου σε συνεργασία με Αξιωματικούς του Στρατού, εισήγαγε αρκετές τεχνικές καινοτομίες για τα ελληνικά δεδομένα εκείνης της εποχής:

- Αναλύθηκε το πρόβλημα της συμπεριφοράς του οπλισμένου σκυροδέματος σε εκρηκτικά φορτία, το οποίο αποτελεί ακόμα και σήμερα αμφιλεγόμενο θέμα και περιεγράφηκε ο μηχανισμός αυτής της συμπεριφοράς (κρούση, διείδυση και έκρηξη), με βάση την οποία έγινε η όπλιση των δομικών στοιχείων των επιφανειακών έργων.

- Εκπονήθηκε ειδική μελέτη για τη διαμόρφωση των φατνωμάτων βολής, προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενος εξοστρακισμός βλήματος, η οποία προέβλεπε την ενίσχυση των φατνωμάτων με τον ξυλότυπο που είχε χρησιμοποιηθεί κατά τη σκυροδέτηση καθώς και με χαλύβδινη ενίσχυση.
- Εκπονήθηκε ειδική μελέτη ενίσχυσης των δομικών στοιχείων των επιφανειακών κατασκευών για την αποφυγή εκτόξευσης θραυσμάτων σκυροδέματος στο εσωτερικό τους σε περίπτωση πλήγματος, η οποία προέβλεπε την τοποθέτηση ειδικού μεταλλικού πλέγματος ακριβώς κάτω από το ανώτερο στρώμα σοβά.
- Η απαίτηση για υψηλή αντοχή σκυροδέματος της τάξης των  $300-400\text{kg/cm}^2$ , οδήγησε σε περιεκτικότητα ειδικού τσιμέντου υψηλής αντοχής από  $400\text{kg/m}^3$  έως και  $800\text{kg/m}^3$  (στην εξωτερική πλευρά των πλακών οροφής των επιφανειακών έργων), ενώ η συνήθης πρακτική μέχρι τότε προέβλεπε  $250\text{kg/m}^3$ .
- Προσθήκη θηραϊκής γης σε αναλογία  $50\text{kg/m}^3$ , σε όλες τις επενδύσεις των τόξων των σηράγγων, ιδιαίτερα σε υγρά εδάφη, για αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και πιο αποτελεσματική στεγανοποίηση.
- Η μεγαλύτερη όμως καινοτομία, ήταν η κατά κάποιον τρόπο εφεύρεση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, αφού η μελέτη προέβλεπε όπλιση του σκυροδέματος των επιφανειακών κατασκευών με ράβδους χάλυβα λεπτές, διαταγμένες πυκνά στις τρεις διαστάσεις και ασύνδετες μεταξύ τους.

Κάποια από αυτά τα οχυρά παραμένουν ακόμα και σήμερα ανέπαφα στο πέρασμα του χρόνου. Οι κατασκευές ήταν ιδιαίτερα ανθεκτικές, ενώ κάποιες από αυτές χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα. Τα δύο μεγαλύτερα οχυρά εκείνης της εποχής, το οχυρό Ρούπελ στις Σέρρες και το οχυρό Λίσσε στη Δράμα, είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα της τεράστιας προσπάθειας που καταβλήθηκε από τον αρχικό σχεδιασμό μέχρι την παράδοση προς λειτουργία των έργων. Μερικά τμήματά τους είναι επισκέψιμα για το κοινό, ενώ λειτουργούν μουσεία και πραγματοποιούνται κάθε χρόνο επετειακές εκδηλώσεις για τη "Μάχη των οχυρών" στις 6 Απριλίου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Anas, M., Alam, M. & Umair, M. (2020). Performance of One-way Composite Reinforced Concrete Slabs under Explosive-induced Blast Loading. *1st International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering, Tashkent, 14-16 October 2020*, Uzbekistan.
- Anas, M., Alam, M. & Umair, M. (2021). Experimental and numerical investigations on performance of reinforced concrete slabs under explosive-induced air-blast loading: A state-of-the-art review. *Structures*, Vol. 31, 428-461. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.102>.
- Anas, M., Alam, M. & Umair, M. (2022). Air-blast and ground shockwave parameters, shallow underground blasting, on the ground and buried shallow underground blast-resistant shelters: A review. *International Journal of Protective Structures*, Vol. 13, (No 1), 99-139. <https://doi.org/10.1177/20414196211048910>
- Bondesan, A. & Ehlen, J. (2022). Military Geoscience: A Multifaceted Discipline. In: Bondesan, A., Ehlen, J. (Eds), *Military Geoscience: A Multifaceted Approach to the Study of Warfare. Advances in Military Geosciences* (pp 1–15). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79260-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79260-2_1)
- Das, N. & Nanthagopalan, P. (2022). State-of-the-art review on ultra high performance concrete - Ballistic and blast perspective. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 127, 104383. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104383>
- Galgano, F. A., & Rose, E. P. (2021). Military geoscience. In: Alderton, D., Scott, A. (Eds), *Encyclopedia of Geology (Second Edition)* (pp 648-659). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09141-7>
- Germany. (1942). *Denkschrift über die Griechische Landesbefestigung*. Berlin.
- Goey, C., Pei, C. & Wu, C. (2012). DEM Modelling of Subsidence of a Solid Particle in Granular Media. In: Wu, C. (Eds), *Discrete Element Modelling of Particulate Media*. RSC Publications. <https://doi.org/10.1039/9781849735032>
- Hambling, D. (2021). US army to 3D print concrete bridges in disaster areas. *New Scientist*.

- Ipek, M. & Aksu, M. (2019). The effect of different types of fiber on flexure strength and fracture toughness in SIFCON. *Construction and Building Materials*, Vol. 214, 207-218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.055>
- Jagoda, J., Diggs-McGee, B., Kreiger, M. & Schuldt, S. (2020). The Viability and Simplicity of 3D-Printed Construction: A Military Case Study. *Infrastructures*, Vol. 5, (No 4), 35, <https://doi.org/10.3390/infrastructures5040035>
- Kennedy, R. (1976). A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 37, (No 2), 183-203, [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(76\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(76)90015-7)
- Kupka, V. (2001). *Metaxasova Linie. PEVNOSTI*. Vol. 19. Fortprint.
- Onal, M. (2009). Reinforcement of beams by using carbon fiber reinforced polimer in concrete buildings. *Scientific Research and Essay*, Vol. 4, (No 10), 1136-1145. <http://www.academicjournals.org/sre>
- Rosenberg, Z., Vayig, Y. & Malka-Markovitz, A. (2020). The scaling issue in the penetration of concrete targets by rigid projectiles – Revisited. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 140. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103561>.
- Tai, Y. (2009). Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 51, (No 2), 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2009.04.005>
- Tang, T. & Saadatmanesh, H. (2003). Behavior of Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Laminates under Impact Loading. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, (No 3), 17-33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:3\(209\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:3(209))
- TM5-1300, (1990). *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. The Departments of Army, Air Force and Navy, USA.
- TM5-855-1, (1997). *Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects*. The Departments of Army, Air Force and Navy and the Defense Special Weapons Agency, USA.



- Twisdale, L. & Saadatmanesh, H. (2003). Reliability-based design methods for protective structures. *Structural Safety*, Vol. 15, (No 1-2), 17-33. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0167-4730(94)90050-7)
- Vairagade, V. & Dhale, S. (2023). Hybrid fibre reinforced concrete – A state of the art review. *Hybrid Advances*, Vol. 3. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100035>
- Wu, Z., Shi, C., He, W. & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 103, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>
- Yoo, D. & Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 73, 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>
- ΓΕΣ/Διεύθυνση Ιστορίας Στρατού (ΓΕΣ/ΔΙΣ), (1956). *Η οχύρωση της παραμεθόριας ζώνης 1936-1940*. Αθήνα.
- ΓΕΣ/Διεύθυνση Ιστορίας Στρατού (ΓΕΣ/ΔΙΣ), (1987). *Η τεχνική πλευρά της οχύρωσης της Παραμεθόριας Ζώνης 1936 – 1940*. Αθήνα.
- Γ.Ε.Σ. (2007). *Δόγμα Οργάνωσης – Οχύρωσης Σ.Ξ*. Αθήνα.
- Γκιρμπάτσης, Ν. (2018). *Οχυρό Ρούπελ 1936 – 1941*. Σέρρες: Εκδόσεις Γοργύρα.
- Γκιρμπάτσης, Ν. (2024). *Η μάχη των οχυρών στην ιστοριογραφία, τη μνήμη και τη δημόσια ιστορία*. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης. Ε.Α.Π, Πάτρα.
- Δήμος Κάτω Νευροκοπίου. (2018). *Μουσείο Πάρκο Λίσσε. Εγχειρίδιο Επισκέπτη*. Κάτω Νευροκόπι.
- Κομνηνού, Ε. & Οικονόμου, Π. (2015). *Συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών χαρακτηριστικών και μηχανικής συμπεριφοράς σκυροδέματος, ινοπλισμένου με μεταλλικές και συνθετικές ίνες*. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης. Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Κούκης, Γ. & Κυνηγαλάκη, Μ. (1983). Εφαρμογές της Τεχνικής Γεωλογίας στα στρατιωτικά τεχνικά έργα και σχεδιασμούς. Οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες στον ελληνικό χώρο. *Στρατιωτική Επιθεώρηση*, Vol.10, 1193-1204.
- Κούκης, Γ. (1985). Η Τεχνική Γεωλογία στα Στρατιωτικά Έργα. *1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Γεωλογικό Διήμερο*, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, XVIII, 45,50, Αθήνα.

- Μπουκοβάλας, Γ., Γαντές, Χ., Ζέρης, Χ., Καζάκος, Λ. & Κουρετζής, Γ. (2008). *Οδηγίες Μελέτης Οχυρωματικών Έργων*. Ε.Μ.Π. Αθήνα.
- Σπυράκος, Κ. (2004). *Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος. Αθήνα.
- Σ.ΤΕ.Α.ΜΧ. (2008). *Τεχνικές Οδηγίες Ενίσχυσης Οχυρωματικών Έργων*. Αθήνα.
- Τάσιος, Θ. (2002). Η οχύρωση των Βορείων Συνόρων μας 1936-1940. Ελληνικά χέρια, Ελληνικά λεφτά κι Ελληνική τεχνογνωσία κατασκεύασαν ένα μέγιστο τεχνικό έργο. *Ενημερωτικό Δελτίο Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Vol. 2189*.