

SCHOOL OF MINERAL RESOURCES ENGINEERING

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE



Geophysical survey design using the airborne full tensor gravimetry. Application in mining exploration.

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Mineral Resources Engineering

Athanasios P. Paraschos
Supervisor Professor: Vafeidis Antonios
Chania, October 2014



Σχεδιασμός από αέρα διασκόπησης με τη γεωφυσική μέθοδο πλήρους τανυστή βαθμίδας της έντασης του πεδίου της βαρύτητας της Γης. Εφαρμογή σε μεταλλευτική έρευνα.

Η παρούσα διατριβή αποτελεί μέρος των απαιτήσεων του διπλώματος μηχανικού.

Φοιτητής: Αθανάσιος Π. Παράσχος
Επιβλέπων Καθηγητής: Βαφείδης Αντώνιος
Χανιά, Οκτώβριος 2014

ABSTRACT

The following thesis is divided in two parts. Firstly, we develop the business plan of the innovative product Daedalus Project, which is a low-altitude flying platform, characterized as HaaS (Hardware-as-a-Service) and has a range of applications. It is the first product of the spin-off company Daedalus PC, whose purpose is to find investor, specifically referred to seek funds from seed-funding (early financing) or from business angels. In the second part, this thesis present and analyze a service of the platform that can support and be directly applicable to oil and mineral exploration. Particularly, The possibility of adaptation of gravimetric equipment to Daedalus Project is presented as well as the usefulness of full-tensor gravimetry method is examined. Finally, the applications as well as the advantages of this method are presented that include: mitigation of the exploration risk, better resolution, low noise interference quicker and less expensive data acquisition, real-time data acquisition and interpretation, robust integration for modelling with earthquake data.

Keywords

Business Plan, Seed-Funding, Geophysics, full tensor gravimetry, FTG, Mining Exploration, Petroleum Exploration

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική αποτελείται από δυο μέρη. Στο πρώτο μέρος, αναπτύσσεται ένα επιχειρηματικό σχέδιο (*Business Plan*) του καινοτόμου προϊόντος “*Daedalus Project*”, μιας ιπτάμενη πλατφόρμας χαμηλού υψομέτρου που χαρακτηρίζεται ως *HaaS* (*Hardware-as-a-Service*) και έχει ένα εύρος εφαρμογών. Αποτελεί το πρώτο προϊόν της spin-off εταιρείας “*Daedalus I.K.E.*” και έχει σκοπό την εύρεση επενδυτή, συγκεκριμένα, επιζητά κεφάλαια από *seed-funding* (πρώιμη χρηματοδότηση) ή από *business angels* (επιχειρηματικούς αγγέλους). Στο δεύτερο μέρος, παρουσιάζεται και αναλύεται μια υπηρεσία που μπορεί η πλατφόρμα να υποστηρίξει και να είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε διασκοπήσεις για έρευνα πετρελαίου ή μεταλλικών ορυκτών. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η δυνατότητα προσαρμογής του βαρυτομετρικού εξοπλισμού στο “*Daedalus Project*” και η χρησιμότητα της μεθόδου πλήρους ταυστή βαθμίδας της έντασης του πεδίου της βαρύτητας. Τέλος, παρουσιάζονται εφαρμογές και τα πλεονεκτήματα της μεθόδου που είναι: μείωση κινδύνου εξερεύνησης, καλύτερη ανάλυση, παρεμβολές πολύ χαμηλού θορύβου, ταχύτερη και φθηνότερη συλλογή δεδομένων, απόκτηση δεδομένων-ερμηνεία σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, αξιόπιστη ενσωμάτωση για μοντελοποίηση με σεισμικά δεδομένα.

Λέξεις - Κλειδιά

Επιχειρηματικό σχέδιο, Χρηματοδότηση, Γεωφυσική, Βαρυτομετρική Μέθοδος, FTG, Διασκόπηση Ορυκτών, Διασκόπηση Πετρελαίου

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η συμβολή κάποιων ατόμων ήταν καθοριστική, προκειμένου να καταφέρω να παρουσιάσω μία αξιόλογη διατριβή. Γι' αυτό το λόγο θέλω να τους ευχαριστήσω, γιατί χωρίς την συμβολή τους δεν θα μπορούσα να τα καταφέρω. Αρχικά, ένα μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στους καθηγητές μου **κ. Βαφείδη Αντώνιο** και **κ. Γρηγορούδη Ευάγγελο**, που με εμπιστεύτηκαν και συνεργάστηκαν μαζί μου. Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με στήριξαν και με βοήθησαν, σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
Πρόλογος - Ευχαριστίες.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	6
Πίνακας Εικόνων	8
1.Εισαγωγή Ά Μέρους.....	12
1.1 Στόχος της επιχείρησης.....	12
1.2 Περίληψη	13
2.Daedalus I.K.E.....	13
2.1 Περιγραφή της Daedalus I.K.E.....	13
2.2 Νομική Μορφή της Daedalus I.K.E.....	13
2.3 Εταιρικά Χαρακτηριστικά της Daedalus I.K.E.....	14
3.Daedalus Project	16
3.1 Σκοπός και αποστολή.....	16
3.2 Κατασκευή.....	16
3.2.1 Πλατφόρμα.....	17
3.2.2 Κατασκευή πρωτοτύπου	18
3.3 Βασικά Χαρακτηριστικά Λειτουργίας.....	23
4.Marketing plan	24
4.1 Η Αγορά.....	24
4.1.1 Ο στρατός.....	25
<i>Εικόνα 15:Παγκόσμια Δαπάνη για UAV με την πάροδο του χρόνου (Thermotron, 2013).</i>	26
4.1.2 Η κυβέρνηση.....	28
4.1.3 Το εμπόριο	29
4.1.4 Γεωφυσική Έρευνα	30
4.1.5 Οι προκλήσεις.....	34
4.1.6 Σήμερα	36
4.2 Ανταγωνισμός.....	37
4.2.1 Η διαφοροποίηση του Δαίδαλου από τον ανταγωνισμό	38
4.2.2 Η καινοτομία της ιδέας	38
4.3 Η λύση του Daedalus Project.....	38

4.4 Οι στόχοι.....	39
4.6 SWOT Analysis	40
5.Πλάνο Λειτουργίας.....	42
5.1 Ανάπτυξη Πλατφόρμας.....	42
5.2 Η Στρατηγική	43
5.3 Διευθυντική ομάδα.....	45
5.3.1 Τα στελέχη	45
5.3.2 Δυνατά σημεία της ομάδας εξέλιξης.....	45
5.3.3 Αδύναμα σημεία της ομάδας εξέλιξης.....	45
5.4 Συνεργάτες.....	45
5.5 Νομικό πλαίσιο	46
6.Σχέδιο χρηματοοικονομικών – Κίνδυνοι	48
6.1 Τιμολόγηση (pricing).....	48
6.2 Χρηματοοικονομικές προβλέψεις τριετίας	48
6.3 Προϋπολογισμός για την αναζήτηση 1ου γύρου χρηματοδότησης (seed-funding)	51
7.Εισαγωγή Β΄ Μέρους.....	52
7.1 Το κίνητρο	52
8.Θεωρητικές γνώσεις.....	55
8.1 Μαθηματικά.....	55
8.1.1 Θεώρημα (του) Gauss	55
8.1.2 Οι ταυτότητες του Green	55
8.1.3 Άμεσες συνέπειες των ταυτοτήτων Green	56
8.1.4 Το θεώρημα της ολοκληρωτικής αναπαράστασης αρμονικών συναρτήσεων	57
8.2 Πεδία.....	58
8.2.1 Κλίση Πεδίου	59
8.2.2 Δυναμική Κλίση.....	59
8.3 Βαρυτικό Πεδίο.....	60
8.3.1 Εισαγωγή.....	60
8.3.2 Βαρυτικό πεδίο	60
8.3.3 Περιστροφή της Γης.....	63
8.3.4 Πεδίο Βαρύτητας της Γης	64
8.3.5 Πεδίο Βαρύτητας γνωστών διαστάσεων	68
8.3.6 Τοπικό πεδίο βαρύτητας και διορθώσεις βαρύτητας	72

8.4 Τανυστής της Βαρύτητας (διαβάθμιση).....	73
9.Αερομεταφερόμενη μέτρηση της βαρύτητας.....	79
9.1 Ιστορικά δεδομένα	79
9.2 Αρχές της εναέριας μέτρησης της βαρύτητας.....	81
9.3 Μαθηματικά μοντέλα.....	84
9.3.1 Άμεσες μέθοδοι ερμηνείας ανωμαλιών βαρύτητας	84
9.3.2 Έμμεσες μέθοδοι ερμηνείας ανωμαλιών βαρύτητας.....	87
9.4 Εφαρμογές και ευκαιρίες	87
9.4.1 Γεωδαιτικές εφαρμογές.....	87
9.4.2 Γεωφυσικές εφαρμογές.....	88
9.5 Όργανα μέτρησης βαρύτητας από αέρα.....	97
9.5.1 Μέτρηση της βαρύτητας από αέρα (airborne gravity).....	97
9.5.2 Μέτρηση των διαβαθμίσεων βαρύτητας από αέρα (airborne gravity gradiometry)	98
10. Επεξεργασία Δεδομένων και επεξήγηση	102
10.1 Περιγραφή Εξοπλισμού	102
10.2 Χαρακτηριστικά Λειτουργίας.....	102
11.Συμπεράσματα	107
Βιβλιογραφία	108

Πίνακας Εικόνων

<i>Εικόνα 1: Λογότυπο της Daedalus I.K.E.</i>	15
<i>Εικόνα 2: Πρώιμα σχέδια της ιπτάμενης πλατφόρμας.</i>	17
<i>Εικόνα 3: Αρχικό σχέδιο του Daedalus Project.</i>	18
Εικόνα 4: Κατασκευή του σκελετού της πλατφόρμας Daedalus Project.	19
<i>Εικόνα 5: Λεπτομέρειες του σκελετού και δοκιμές αντοχής.</i>	19
<i>Εικόνα 6: Κατασκευή του πιάτου που εδράζει το μπαλόνι.</i>	19
<i>Εικόνα 7: Κατασκευή του ουριαίου τμήματος της πλατφόρμας.</i>	20
<i>Εικόνα 8: Το Μπαλόνι.</i>	21
<i>Εικόνα 9: Κατασκευή των προωθητήρων.</i>	21
<i>Εικόνα 10: Πειραματικός έλικας.</i>	21
<i>Εικόνα 11: Ο εξοπλισμός της τηλεκατεύθυνσης</i>	22

<i>Εικόνα 12: Αποτελέσματα από την δοκιμαστική λειτουργία του πειράματος.....</i>	<i>22</i>
<i>Εικόνα 13:Κατανομή της αγοράς με βάση των τύπο UAV, την περιοχή και τη χώρα (marketsandmarkets.com, 2014).</i>	<i>24</i>
<i>Εικόνα 14: Η διαμόρφωση της αγοράς (marketsandmarkets.com, 2014).</i>	<i>25</i>
<i>Εικόνα 15:Παγκόσμια Δαπάνη για UAV με την πάροδο του χρόνου (Thermotron, 2013).</i>	<i>26</i>
<i>Εικόνα 16: Χρονοδιάγραμμα παραγωγής και ανάπτυξης UAV (DeGarmo, 2004).</i>	<i>27</i>
<i>Εικόνα 17:Ένα πρότυπο σχέδιο πτήσης ενός UAV (Barnard, 2008).</i>	<i>33</i>
<i>Εικόνα 18:Διάγραμμα για το εύρος των UAV σε σχέση με το κόστος (Barnard, 2008).</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 19: Ένα EADS Drac Unmanned Aircraft με δύο κινητήρες για ερευνητική εργασία (Barnard, 2008).</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 20: Απώλειες σε UAV predator κατά την πτήση μέχρι τις 20/03/2007 (dronewars.net, 2011).</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 21: Εκτιμήσεις για την αγορά των drones (UAV) (businessinsider.com, 2013).</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 22: Σχηματική παράσταση της αμοιβαίας έλξης που υφίστανται δύο μάζες, m_1 και m_2. (Βαφείδης, 2001)</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 23: Η βαρυτική έλξη σε σημείο P, εξαιτίας της κατανομής πυκνότητας ρ (Blakely, 1995).</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 24: Σχηματική τομή του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής της γης με ισημερινή και πολική ακτίνα R_e και R_p αντίστοιχα (Robinson, 1988).</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 25: Τα διανύσματα παριστάνουν (α) τη βαρυτική έλξη στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς της γης, (b) την φυγόκεντρο επιτάχυνση στην επιφάνεια της γης, λόγω περιστροφής και (c) τη συνισταμένη βαρυτική έλξη σε ένα σημείο στην επιφάνεια της γης (Robinson, 1988).</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 26: Παγκόσμιο δίκτυο σταθμών μέτρησης του πεδίου βαρύτητας με εκκρεμή (Robinson, 1988).</i>	<i>66</i>
<i>Εικόνα 27: Ποσοτική ερμηνεία μιας ανωμαλίας. Η παρατηρούμενη ανωμαλία παριστάνεται με A και η ανωμαλία του μοντέλου με A_0. Οι παράμετροι $p_1, p_2, p_3...$ είναι χαρακτηριστικά της πηγής, όπως βάθος ταφής, πάχος, πυκνότητα κ.α (Blakely, 1995).</i>	<i>69</i>
<i>Εικόνα 28: Προσέγγιση ενός δισδιάστατου σώματος από πολύγωνο N- πλευρών. Ο άξονας y είναι παράλληλος στον άξονα ανάπτυξης του σώματος. Το σώμα εκτείνεται στο άπειρο στην διεύθυνση y (Blakely, 1995,Σταμπολίδης,1999).</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 29: Γεωμετρία πολυγωνικού πρισματικού σώματος 2.5 διαστάσεων (Cady, 1980, Σταμπολίδης, 1999).</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 30: Η ένταση του πεδίου βαρύτητας σε σημείο του καρτεσιανού επιπέδου $P(x,y,z)$ που προκαλείται από μια δομή όγκου V και πυκνότητας $\rho(X,Y,Z)$ (Αραμπέλος, 1991).</i>	<i>71</i>

<i>Εικόνα 31: Διαίρεση με ομόκεντρους κύκλους και ακτίνες (Αραμπέλος, 1991).</i>	72
<i>Εικόνα 32: Απλουστευμένη άποψη της βαρύτητας και της Βαρυτικής Κλισιμετρίας.</i>	73
<i>Εικόνα 33: Κατακόρυφη συνιστώσα επιτάχυνσης βαρύτητας και πρώτη παράγωγος της σε ένα σημείου βάθους 1km. (Jackson, 2013).</i>	74
<i>Εικόνα 34: Η συμβατική βαρύτητα μετρά μόνο μια συνιστώσα του βαρυτικού πεδίου της κάθετης κατεύθυνσης G_z (LHS), ο πλήρης τανυστής της βαρυτικής κλισιμετρίας συνυπολογίζει όλες τις συνιστώσες του βαρυτικού πεδίου (RHS) (Jackson, 2013).</i>	75
<i>Εικόνα 35: Σταθερή πλατφόρμα μέτρησης βαρύτητας (LaCoste, 1967).</i>	79
<i>Εικόνα 36: Σύστημα πλατφόρμας δύο αξόνων (after Schwarz and Li, 1997).</i>	83
<i>Εικόνα 37: Σύστημα πλατφόρμας συντονισμένη κατά Schuler (after Schwarz and Li, 1997).</i>	83
<i>Εικόνα 38: SINS (after Schwarz and Li, 1997).</i>	83
<i>Εικόνα 39: Σκαρίφημα της βαρυτομετρικής ανωμαλίας όπου φαίνεται ο τρόπος προσδιορισμού της απόστασης $X_{-}(1/2)$, που αντιστοιχεί στο ήμισυ της μέγιστης τιμής Δg_{max} της ανωμαλίας (Λούης, 2004).</i>	85
<i>Εικόνα 40: Σκαρίφημα της βαρυτομετρικής ανωμαλίας όπου φαίνεται ο τρόπος προσδιορισμού της μέγιστης κλίσης b_m της καμπύλης μεταβολής της ανωμαλίας (Λούης, 2004).</i>	86
<i>Εικόνα 41: Χαρτογράφηση μιας Φλέβας χρυσού στη κοιλάδα Latrobe με τη αερομεταφερόμενη βαρυτική κλισιμετρία (Fugro Presentation, 2007).</i>	89
<i>Εικόνα 42: Κοντινή ανταπόκριση μεταξύ του σχηματισμού των ορυκτών χαρτογραφημένη από γεωτρήσεις και την βαρύτητα (Fugro Presentation 2007).</i>	90
<i>Εικόνα 43: Η κάθετη κλίση της βαρύτητας από ένα Falcon Bathurst, σε μια έρευνα το 1999 (Fugro Presentation, 2007).</i>	91
<i>Εικόνα 44 : Η βαρυτικά χαρτογραφημένη περιοχή του Βόρειου Perth. Η τεχνική γεωλογία (λευκές γραμμές) και το περίγραμμα της περιοχής του Cliffs (μπλε γραμμές). Η περιοχή που βρίσκεται το πετρέλαιο φαίνεται καθαρά λόγω του μεγάλου μεγέθους της βαρύτητας (Fugro Presentation, 2007).</i>	92
<i>Εικόνα 45: Η συμβατική μέτρηση της Βαρύτητας, όπου η μαύρη γραμμή είναι η σεισμική γραμμή, η διακεκομμένη μαύρη γραμμή είναι η τάση σφάλματος, και η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή είναι η λανθασμένη ερμηνεία, που βασίζεται μόνο σε σεισμικά δεδομένα (Fugro Presentation, 2007).</i>	93
<i>Εικόνα 46: Τα FTG δεδομένα έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη μια καλής χαρτογράφησης άλατος σε μια περιοχή όπου τα σεισμικά δεδομένα είναι αραιά και χαμηλής ποιότητας. Η ακρίβεια του FTG προερχόμενου μοντέλου, μαζί με τα σεισμικά δεδομένα, οδήγησε στη δημιουργία μιας ακριβούς ταχύτητας/πυκνότητας διάταξη (Arkex, 2013).</i>	94
<i>Εικόνα 47: Οι κάθετες αποκρίσεις της βαρύτητας με το μήκος κύματος του σήματος των επιλεγμένων κοιτασμάτων σε mgal (Van Kann, 2004).</i>	95

<i>Εικόνα 48: Οι κάθετες αποκρίσεις της βαρύτητας με το μήκος κύματος του σήματος των επιλεγμένων κοιτασμάτων σε Εδνös (Van Kann, 2004).</i>	96
<i>Εικόνα 49: Zeppelin LZ N07 και Eurocopter AS350-B3 (BHP Billiton, 2009).</i>	99
<i>Εικόνα 50: Σύγκριση πλατφόρμων (Murphy,2007).</i>	100

Α' Μέρος: Επιχειρηματικό Πλάνο της Daedalus I.K.E.

1.Εισαγωγή Α Μέρους

Σκοπός του Α Μέρους είναι η ανάπτυξη του Business Plan (BP) της Daedalus I.K.E., το οποίο παρέχει μια σαφή εικόνα των επιχειρηματικών σκοπών της εταιρείας και καθορίζει τους επιδιωκόμενους στόχους σχετικά με την ανάπτυξη του προϊόντος, "Daedalus Project". Επίσης, παρουσιάζονται τα πιθανά πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του προϊόντος, παρέχοντας στους υποψήφιους επενδυτές τα μέσα για να διαπιστώσουν, αν η εταιρεία αποτελεί κατάλληλη επένδυση. Σκοπός του συγκεκριμένου BP είναι η εύρεση κεφαλαίων από seed-funding ή από business angels. Το BP, που παρουσιάζεται, αποτελείται από πέντε βασικές κατηγορίες. Αυτές είναι:

1. Περιγραφή της επιχείρησης.
2. Προϊόν.
3. Marketing plan.
4. Σχέδιο Λειτουργίας.
5. Σχέδιο χρηματοοικονομικών – Κίνδυνοι.

1.1 Στόχος της επιχείρησης

Η επιχείρηση, Daedalus I.K.E., δραστηριοποιείται στο χώρο των νέων, καινοτόμων και πρωτότυπων προϊόντων, που αναπτύσσονται συνεχώς σήμερα σε έναν κλάδο όπως αυτός της αερομεταφερόμενης τεχνολογίας. Συγκεκριμένα, η Daedalus I.K.E. σκοπεύει, αρχικά, στην ανάπτυξη ενός προϊόντος, μιας ιπτάμενης πλατφόρμας. Το προϊόν αυτό ονομάζεται Daedalus Project και έχει την δυνατότητά να ίπταται ή να αιωρείται σε σταθερό σημείο φέροντας εξοπλισμό ανάλογο με τις ανάγκες του πελάτη.

Τα βασικά στοιχεία, που διαφοροποιούν το Daedalus Project σε σχέση με τα υπόλοιπα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, είναι τα καινοτόμα χαρακτηριστικά του. Αυτά είναι, η προσαρμοστικότητα του Daedalus Project στις εκάστοτε ανάγκες των πελατών, η ικανότητα της πλατφόρμας να ίπταται (πλοηγούμενη ή μη) σε σταθερό σημείο και σε χαμηλό υψόμετρο για μεγάλο χρονικό διάστημα, ο καινοτόμος σχεδιασμός που διαθέτει λόγω των πρωτότυπων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του σκελετού της πλατφόρμας, καθώς και το χαμηλό κόστος, που απαιτείται για την ανάπτυξη και την υλοποίηση του. Όλα αυτά προσδίδουν ακόμη μεγαλύτερη αξία (value proposition) στο προϊόν.

Επομένως, κύριος στόχος της επιχείρησης να μπει δυναμικά σε μια διεθνή αγορά, αυτή των UAVs, η οποία καλύπτει ένα αρκετά μεγάλο εύρος πελατών, όπως τα σώματα ασφαλείας, ο στρατός, αρκετοί ερευνητικοί φορείς, τα τουριστικά γραφεία αλλά και κάθε ιδιώτης, γεωργός, ψαράς, τοπογράφος, ο οποίος με τον κατάλληλο εξοπλισμό θα προσαρμόζει το Daedalus Project στις ανάγκες του. Σκοπός της Daedalus I.K.E. είναι η ανάπτυξη προϊόντων βασισμένα σε υψηλά πρότυπα, με σκοπό να δίδεται η καλύτερη λύση με ειλικρίνεια, εμπιστοσύνη αλλά και με πραγματική συνεργασία μεταξύ επιχείρησης-πελατών.

1.2 Περίληψη

Στις παρακάτω σελίδες αναπτύσσεται το Business Plan (BP) της Daedalus I.K.E., το οποίο παρέχει μια σαφή εικόνα των επιχειρηματικών σκοπών της εταιρείας και καθορίζει τους επιδιωκόμενους στόχους σχετικά με την ανάπτυξη του προϊόντος, Daedalus Project. Επίσης, παρουσιάζονται τα πιθανά πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του προϊόντος, παρέχοντας στους υποψήφιους επενδυτές τα μέσα για να διαπιστώσουν, αν η εταιρεία αποτελεί κατάλληλη επένδυση. Σκοπός του συγκεκριμένου BP είναι η εύρεση κεφαλαίων από seed-funding ή από business angels. Το BP, που παρουσιάζεται, αποτελείται από πέντε βασικές κατηγορίες. Αυτές είναι:

6. Περιγραφή της επιχείρησης.
7. Προϊόν.
8. Marketing plan.
9. Σχέδιο Λειτουργίας.
10. Σχέδιο χρηματοοικονομικών – Κίνδυνοι.

2.Daedalus I.K.E

2.1 Περιγραφή της Daedalus I.K.E

Η Daedalus I.K.E. αποτελεί μια καινοτόμο εταιρεία που έχει στόχο τη δραστηριοποίηση στο χώρο των UAVs, η εταιρία αρχικά επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας εναέριας πλατφόρμας μεταφοράς εξοπλισμού για γενική ή εξειδικευμένη χρήση, το Daedalus Project.

Απευθύνεται σε εταιρίες, οργανισμούς και ιδιώτες, που απαιτούν μια μη επανδρωμένη αυτόνομη πλατφόρμα (UAV) με δυνατότητα παραμονής στον αέρα σε περιοχή περιορισμένου χώρου και σε εύρος υψομέτρου κίνησης από χαμηλά έως μεσαία ύψη. Το Daedalus Project μπορεί να ίπταται για πολύ περισσότερο χρόνο από οποιαδήποτε άλλη υπάρχουσα πλατφόρμα (π.χ. drones), διότι η παραμονή του εν πτήση εξασφαλίζεται κυρίως από το μετεωρολογικό μπαλόνι και όχι από μηχανισμούς πτήσης, όπως στις υπόλοιπες υλοποιήσεις.

Οι λύσεις, που προσφέρονται στους πελάτες, επικεντρώνονται στην αξιοποίηση της τεχνολογίας, με σκοπό την δημιουργία μια πλήρως αυτόνομης πλατφόρμας που θα κινείται ανεξάρτητα των καιρικών συνθηκών για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε χαμηλά (κάτω από 100 μέτρα) και μεσαία υψόμετρα. Σκοπός είναι να προσαρμόζεται άμεσα στην απαιτήσεως της εκάστοτε αποστολής, αλλάζοντας απλά τα φορτία του εξοπλισμού, που μεταφέρει.

Συνοπτικά, οι παραπάνω κατηγορίες εφαρμογών της πλατφόρμας βασίζονται σε τεχνολογίες αιχμής, διεθνή πρότυπα (best practice) και χαρακτηρίζονται από μία διαρκή προσπάθεια να μετατρέπουν το Daedalus Project για τους πελάτες σε ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.

2.2 Νομική Μορφή της Daedalus I.K.E

Η Daedalus I.K.E αποτελεί μια spin – off επιχείρηση (τεχνοβλαστός). Η νομική μορφή της εταιρίας είναι Ιδιωτική Κεφαλαιουχική Εταιρία - I.K.E. Η δραστηριότητα της Daedalus I.K.E. επικεντρώνεται στην εφαρμογή καινοτόμων επιχειρηματικών σχεδίων, στην εμπορική εκμετάλλευση γνώσεων, οι οποίες παράγονται σε ερευνητικά εργαστήρια και τεχνολογικούς φορείς. Η Daedalus I.K.E. ορίζει την

ουσιαστική σύνδεση της ερευνητικής δραστηριότητας με την παραγωγική διαδικασία, μέσω της αξιοποίησης και εκμετάλλευσης των ερευνητικών αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, η Daedalus I.K.E. στοχεύει την ανάπτυξή της στον εναέριο χώρο, μια αγορά που βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη. Η έδρα της εταιρίας βρίσκεται στο τεχνολογικό πάρκο, που έχει δημιουργηθεί από τη συνεργασία του Πολυτεχνείου Κρήτης και σύμπραξη φορέων της Κρήτης.

2.3 Εταιρικά Χαρακτηριστικά της Daedalus I.K.E.

Προκειμένου να πετύχουμε τους στόχους, που έχουμε βάλει και να συνεχίσουμε να πραγματοποιούμε τις ενέργειες, που έχουμε σχεδιάσει, μένουμε πιστοί στο όραμά μας. Το κάνουμε πυξίδα μας και δουλεύουμε συστηματικά για την υλοποίηση του. Επίσης, καταλυτικό ρόλο για την επιχείρηση αποτελεί η συνεχής εκπαίδευση του προσωπικού της και η δημιουργία ενός περιβάλλοντος, το οποίο θα δίνει την ελευθέρια στους εργαζομένους να είναι και να αισθάνονται δημιουργικοί. Ωστόσο, κάθε φορά που θέλουμε να πετύχουμε κάτι μεγάλο, λειτουργούμε με γνώμονα πάντα τα εξής:

Όραμα

Να είμαστε σημαντικοί για τους πελάτες μας, χτίζοντας μακροχρόνιες και αμοιβαία επωφελείς σχέσεις εμπιστοσύνης.

Να αναγνωρίζει ο πελάτης μας στην εταιρία, τα στελέχη της.

Να προμηθεύσουμε καινοτόμα προϊόντα στην αγορά, με συνέπεια την αποτελεσματικότητα και τον επαγγελματισμό.

Να συμμετέχουμε ενεργά στη ανάπτυξη της εναέριας τεχνολογίας, που αφορά τους τομείς δραστηριοποίησής μας.

Αποστολή

Να προσφέρουμε καινοτόμα προϊόντα, που χαρακτηρίζονται από τεχνολογία αιχμής, με σεβασμό στον καταναλωτή και το περιβάλλον και με γνώμονα την ικανοποίηση τόσο του ανθρώπινου δυναμικού της εταιρείας, όσο και των καταναλωτών στην παγκόσμια αγορά.

Μέτρο επιτυχίας μας και ακρογωνιαίο λίθο της ανάπτυξης μας θεωρούμε την ικανοποίηση του πελάτη, που πρέπει να κερδίζει αποτέλεσμα, ποιοτικό και ποσοτικό.

Αξίες

Όλες οι ενέργειες των στελεχών της Daedalus I.K.E. αντανακλούν τις αξίες μας.

Στο επίκεντρο του εταιρικού DNA μας είναι η ικανοποίηση των αναγκών των πελατών μας.

Τα στελέχη μας επιδιώκουν συστηματικά να εργάζονται ομαδικά με στόχο τη μεγιστοποίηση του αποτελέσματος.

Όλα τα στελέχη μας έχουν αξία και αξίζουν τον σεβασμό.

Προκαλούμε πάντα τον εαυτό μας, θέτοντας πάντα υψηλότερους στόχους.

Το επιχειρηματικό μας μοντέλο αναφέρεται στον πελάτη, και όχι στη μάζα.



Εικόνα 1: Λογότυπο της Daedalus I.K.E.

3.Daedalus Project

3.1 Σκοπός και αποστολή

Το Daedalus Project αφορά μια αερομεταφερόμενη αυτόνομη πλατφόρμα, η οποία φέρει εξοπλισμό για γενική ή εξειδικευμένη χρήση. Αποτελείται από ένα ειδικά τροποποιημένο μετεωρολογικό μπαλόνι με τις κατάλληλες προσθήκες, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα να ελέγχεται η κατεύθυνση του κατά βούληση είτε χειροκίνητα (με τηλεκατεύθυνση) είτε με αυτόματο (αυτόνομο) τρόπο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για αιώρηση σε συγκεκριμένο ύψος ή την δυναμική επιλογή του δρομολογίου του.

Συγκεκριμένα, η ιδέα στην οποία βασίζεται το Daedalus Project είναι η παροχή υλικού ως υπηρεσία (Hardware as a Service – HAAS). Η λογική αυτών των υλοποιήσεων είναι η δυνατότητα προσαρμογής της εναέριας πλατφόρμας να καλύψει τις ανάγκες πολλών διαφορετικών χρηστών με απλές αλλαγές των μεταφερόμενων φορτίων. Για παράδειγμα, ενώ ένας χρήστης θα μπορούσε να τη χρησιμοποιήσει για την από αέρα μαγνητοσκόπηση ή ακόμα και ζωντανή αναμετάδοση εικόνας, ένας άλλος θα μπορούσε να την χρησιμοποιήσει για τη λήψη εξειδικευμένων μετρήσεων (π.χ. υψηλής ευκρίνειας χαρτογράφηση) χωρίς την ανάγκη τροποποίησης της ίδιας της πλατφόρμας.

Ειδικότερα, το Daedalus Project, πέρα από ένα ειδικά τροποποιημένο μετεωρολογικό μπαλόνι φέρει ένα ηλεκτρονικό εξοπλισμό, ο οποίος δίνει την δυνατότητα στο χειριστή να ελέγχει την κατεύθυνση του είτε χειροκίνητα (με τηλεκατεύθυνση) είτε με αυτόματο (αυτόνομο) τρόπο. Συνεπώς, η πλατφόρμα έχει τη δυνατότητα για αιώρηση σε συγκεκριμένο ύψος ή την δυναμική επιλογή του δρομολογίου της.

3.2 Κατασκευή

Το Daedalus Project αποτελείται από το μετεωρολογικό μπαλόνι και το σκελετό, ο οποίος φέρει τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του (συστήματα ελέγχου και ηλεκτρικοί κινητήρες με έλικες), και τα σημεία ανάρτησης ωφέλιμου φορτίου. Οι διαστάσεις του είναι 4m*4m*4m.

Το μπαλόνι γεμίζει με ήλιο, η ακτίνα του δεν αναμένεται να μειωθεί σημαντικά στο στάδιο της βελτιστοποίησης της κατασκευής. Διότι το συγκεκριμένο μπαλόνι μπορεί να σηκώσει μεγαλύτερα βάρη με μικρή αύξηση του όγκου του. Το ήλιο έχει την τάση να διαφεύγει, για αυτό το λόγο στις μελλοντικές δοκιμές εξέλιξης αναμένεται να εξακριβωθεί ο ρυθμός διαφυγής (επίσης και η χρήση υλικών που θα ελαχιστοποιούν ή θα μηδενίζουν τις απώλειες) καθώς και τα ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων επιχειρησιακών σεναρίων, που ενδέχεται να αντιμετωπίσει η πλατφόρμα και σχετίζονται με τον αριθμό των απογειώσεων, τα ύψη και τα χαρακτηριστικά της πτήσης, και τις συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, πίεση, άνεμοι κτλ.).

Ο σκελετός είναι αρθρωτός για μεγαλύτερη ευελιξία κατά τη μεταφορά και τη παρούσα στιγμή είναι κατασκευασμένος από πλαστικούς σωλήνες. Στο μέλλον μπορεί να αντικατασταθεί από carbon σωλήνες για ακόμα μεγαλύτερη αντοχή και περαιτέρω μείωση του βάρους, ενώ ο ίδιος ο σκελετός μπορεί να επανασχεδιαστεί για γρήγορη ανάπτυξη, ώστε να μειωθεί ο χρόνος προετοιμασίας.

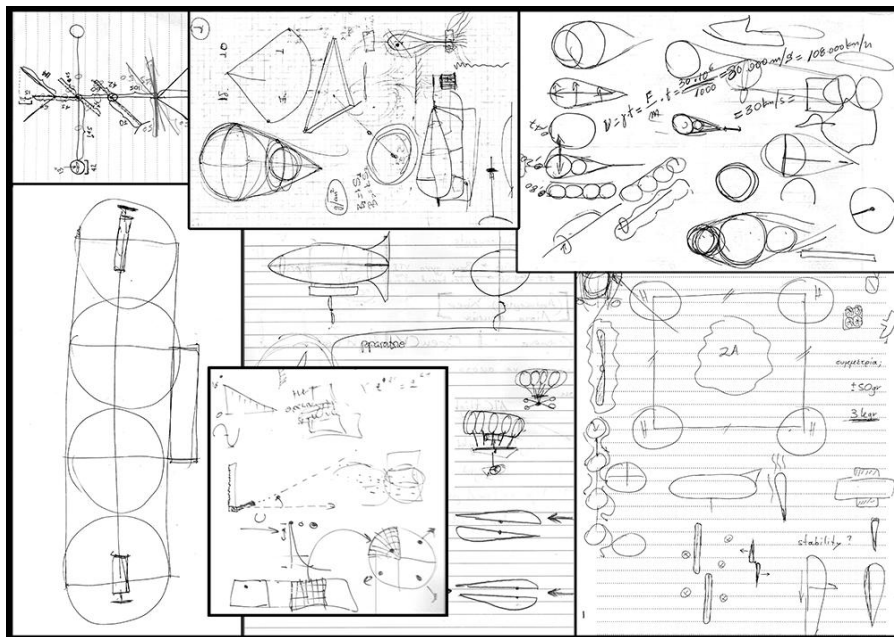
Το σύστημα ελέγχου της πτήσης υλοποιήθηκε με τεχνολογίες ανοικτού λογισμικού, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα επέμβασης και να εξατομικεύσης της λειτουργίας του σε πολύ μεγάλο βαθμό προσαρμόζοντας το στις ανάγκες και τα προφίλ των αποστολών, τις οποίες θα αναλάβει το Daedalus

Project. Οι ρυθμίσεις των διαφορετικών προφίλ θα αθροίζονται συσσωρευτικά κατά τις δοκιμές, ολοκληρώνοντας ένα ενιαίο λογισμικό ελέγχου για όλες τις πιθανές συνθήκες.

Στις υπάρχουσες δοκιμές έχουν αναπτυχθεί πειραματικές διατάξεις ραντάρ, ενώ δοκιμάζονται διάφοροι αισθητήρες και η δημιουργία ασύρματου ελεγχόμενου βραχίονα για τον χειρισμό συσκευών (π.χ. κάμερα, ή ακόμα και μετρητές Geiger για μετρήσεις ραδιενέργειας). Δοκιμάζεται επίσης η μετάδοση εικόνας σε πραγματικό χρόνο, μέσω ασύρματου μεταγωγέα βίντεο χαμηλού κόστους. Παράλληλα, υλοποιείται σύστημα με μικροελεγκτή που με κατάλληλο προγραμματισμό του firmware, θα είναι δυνατός ο έλεγχος των λειτουργιών της μέσω τηλεχειρισμού, από τα ελεύθερα κανάλια τηλεκατεύθυνσης.

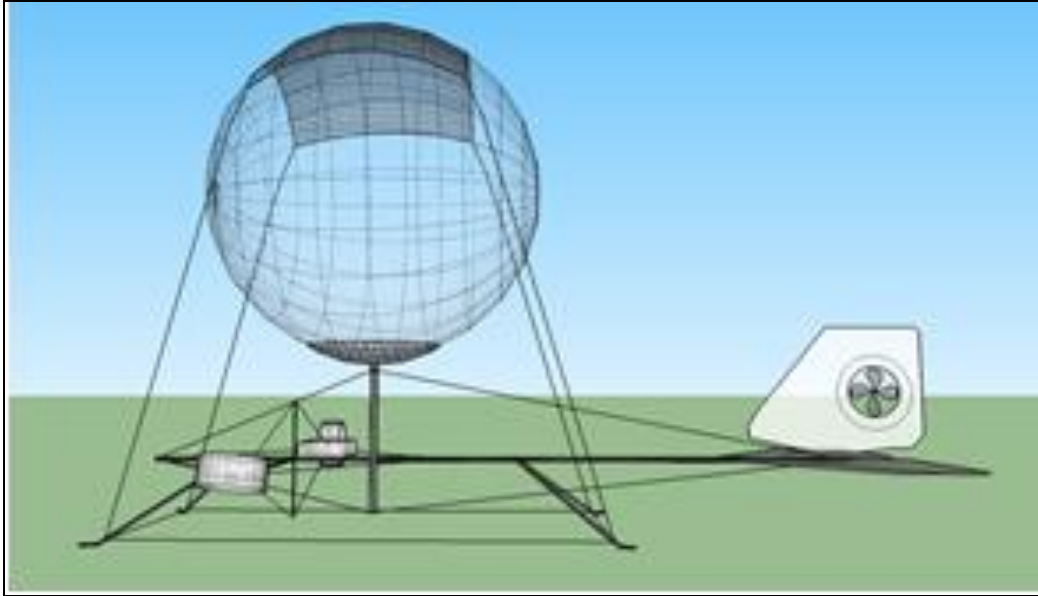
3.2.1 Πλατφόρμα

Σε πρώτη φάση, έμφαση δόθηκε σε αεροδυναμικά σχήματα, τα οποία ελαχιστοποιούν την τριβή της κατασκευής, όπως αυτό του πουλιού, του ψαριού και της σταγόνας, και σε δεύτερη φάση συνυπολογίστηκαν παράγοντες, όπως το βάρος της κατασκευής, το κόστος και ο χρόνος κατασκευής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται διάφορες σχεδιαστικές προσεγγίσεις που εξετάστηκαν.



Εικόνα 2: Πρώιμα σχέδια της ιπτάμενης πλατφόρμας.

Τελικά, επιλέχθηκε το σχέδιο της πλατφόρμας, που φαίνεται κάτωθι, το οποίο περιλαμβάνει τη χρήση ενός σφαιρικού μπαλονιού, το μέγεθος του οποίου προσδιορίστηκε ώστε η πλατφόρμα να φέρει ωφέλιμο φορτίο έως 9 κιλά.



Εικόνα 3: Αρχικό σχέδιο του Daedalus Project.

3.2.2 Κατασκευή πρωτοτύπου

Μετά το σχεδιασμό του πρωτοτύπου, ακολούθησε η σταδιακή κατασκευή του σκελετού και των προωθητηρίων, δηλαδή του μηχανολογικού τμήματος της πλατφόρμας, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αντοχής στα επιμέρους κομμάτια.

Για την κατασκευή της πλατφόρμας, δοκιμάστηκαν διάφορα υλικά και εξετάστηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους ως προς τη σκληρότητα, το βάρος, την ανθεκτικότητα και τη γήρανση, που αυτά παρουσιάζουν. Βεβαίως, συνυπολογίστηκε η διαθεσιμότητα και το κόστος των υλικών.

Τελικά, επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι υλικά:

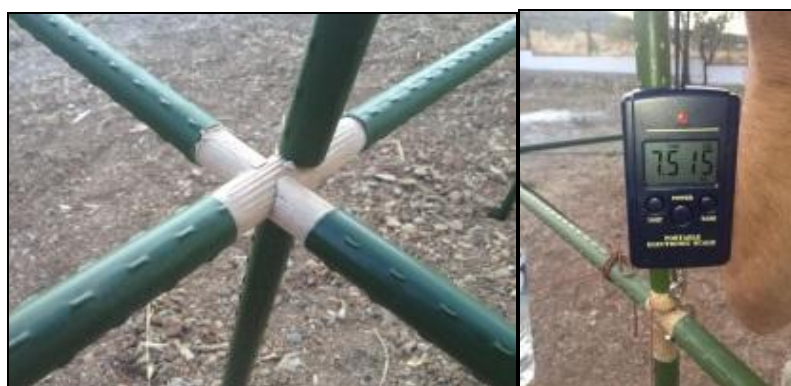
- Αλουμίνιο.
- Ξύλο.
- Teflon.
- Χαλκοσωλήνες.
- Βινύλιο.
- PVC.
- Πολυεστέρας.

Οι επιμέρους εργασίες κατασκευής της πλατφόρμας, όπως φαίνονται και στις φωτογραφίες, ήταν οι εξής:

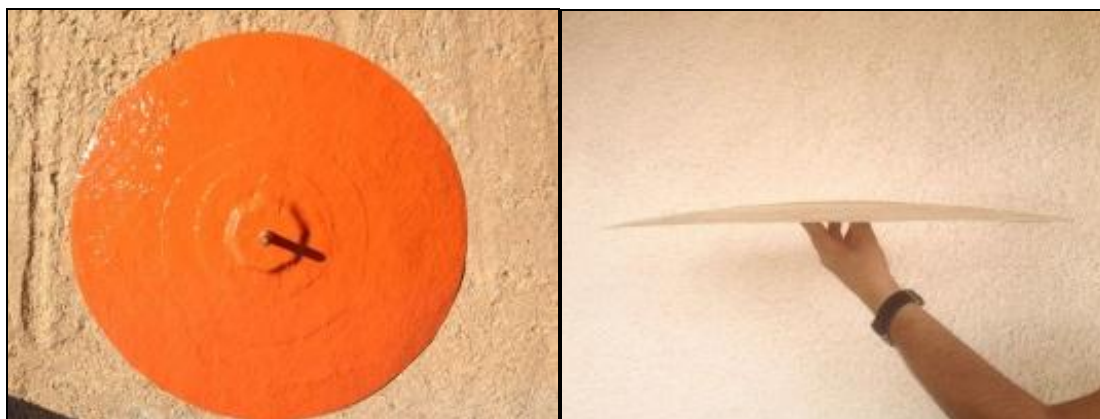
- Κατασκευή του σκελετού.
- Κατασκευή του πιάτου έδρασης του μπαλονιού.
- Κατασκευή του ουριαίου τμήματος.
- Κατασκευή των κιβωτίων στήριξης των προωθητήρων (όπου διερευνήθηκαν διάφορες εκδοχές).
- Συναρμολόγηση των επί μέρους τμημάτων.



Εικόνα 4: Κατασκευή του σκελετού της πλατφόρμας Daedalus Project.



Εικόνα 5: Λεπτομέρειες του σκελετού και δοκιμές αντοχής.



Εικόνα 6: Κατασκευή του πιάτου που εδράζει το μπαλόνι.



Εικόνα 7: Κατασκευή του ουριαίου τμήματος της πλατφόρμας.

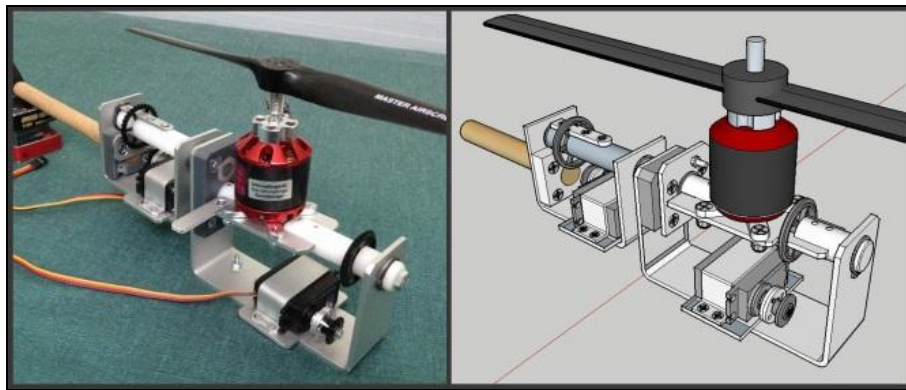
Σύμφωνα με τα πειράματα, που έχουν πραγματοποιηθεί, διαπιστώθηκε ότι οι υπολογισμοί στη φάση του σχεδιασμού ήταν ικανοποιητικά ακριβείς με αποκλίσεις, μικρότερες του 5%. Όσον αφορά το ηλεκτρολογικό τμήμα, αποτελείται από έτοιμα υλικά, τα οποία συναρμολογήθηκαν κατάλληλα.

Στο ηλεκτρονικό και προγραμματιστικό μέρος, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις απαιτούμενες διατάξεις για τον έλεγχο του αυτόματου πιλότου σε σχέση με τα ερεθίσματα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες. Στο κομμάτι αυτό προβλέπονται συνεχείς βελτιώσεις, όσο προκύπτουν νέα δεδομένα από τις δοκιμαστικές πτήσεις που πραγματοποιούνται, μέχρι την οριστικοποίηση της πλατφόρμας.

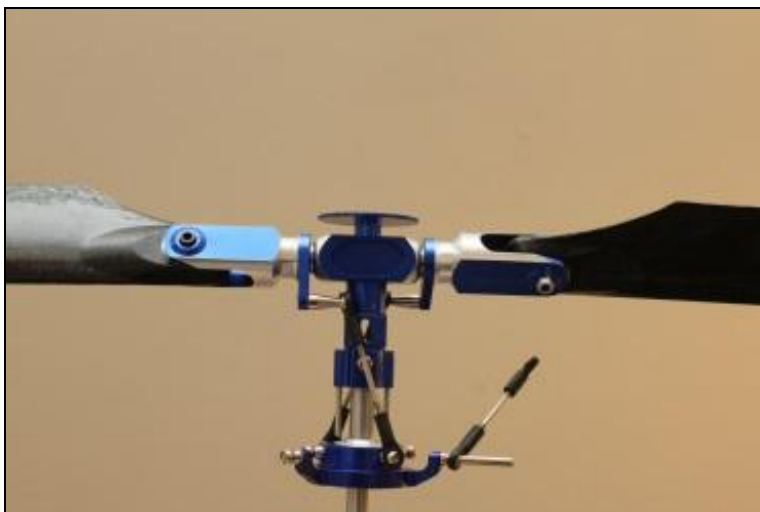
Το μπαλόνι είναι κατασκευασμένο υπό αυστηρές προδιαγραφές για να μην μπορεί να διατηρηθεί εύκολα. Οι αυστηρές αυτές προδιαγραφές ανέβασαν το κόστος του μπαλονιού που αντιστοιχεί περί το 1/3 της συνολικού κόστους της πλατφόρμας. Στο μέλλον, θα εξεταστεί η πιθανότητα χαλάρωσης των προδιαγραφών αυτών, με απώτερο στόχο την μείωση της συνολικής τιμής της πλατφόρμας.



Εικόνα 8: Το Μπαλόνι.



Εικόνα 9: Κατασκευή των προωθητήρων.



Εικόνα 10: Πειραματικός έλικας.

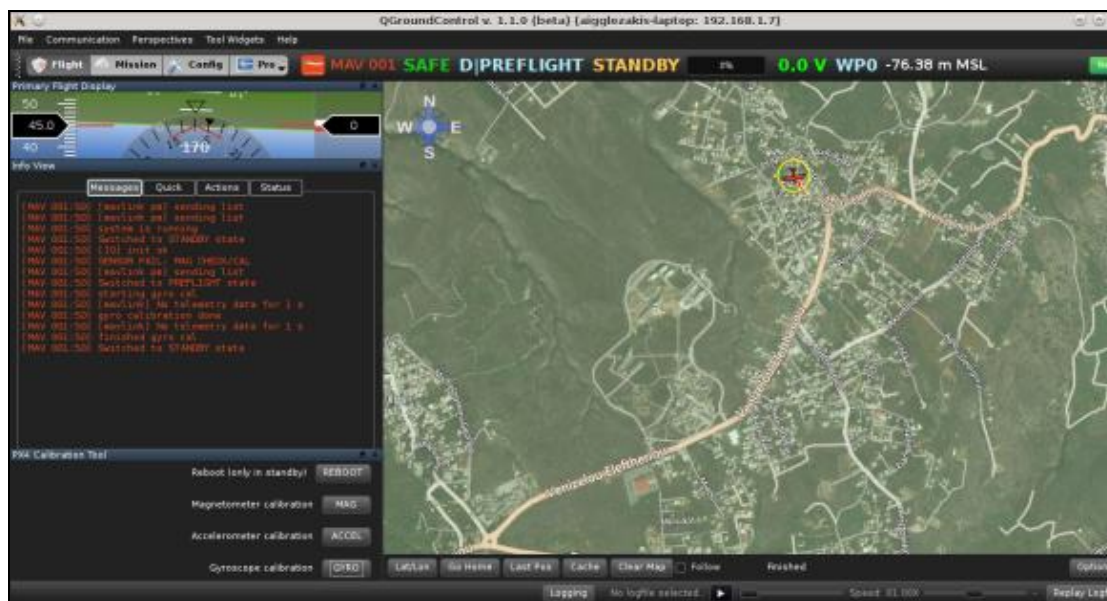
Ηλεκτρονικός εξοπλισμός - Συστήματα Επικοινωνίας

Η επικοινωνία με την πλατφόρμα γίνεται μέσω τηλεχειρισμού και τηλεμετρίας. Ο τηλεχειρισμός αφορά τις εντολές προς εκτέλεση, που εκπέμπονται από τον επίγειο σταθμό βάσης και λαμβάνονται από το δέκτη, τον οποίο φέρει πάνω της η πλατφόρμα.

Η τηλεμετρία αναφέρεται σε δεδομένα, που εκπέμπει η πλατφόρμα και αποστέλλονται στον επίγειο σταθμό βάσης. Τα δεδομένα της τηλεμετρίας μπορεί να αφορούν σε πληροφορίες κατάστασης των υποσυστημάτων της πλατφόρμας ή δεδομένα που προέρχονται από τους αισθητήρες (sensors) που έχουν τοποθετηθεί επάνω της. Το λογισμικό ελέγχου της θέσης της πλατφόρμας είναι ανοιχτού κώδικα.



Εικόνα 11: Ο εξοπλισμός της τηλεκατεύθυνσης.



Εικόνα 12: Αποτελέσματα από την δοκιμαστική λειτουργία του πειράματος.

Στην Εικόνα 12, διακρίνεται μια χαρακτηριστική οθόνη της εφαρμογής κατά την δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος.

Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας είναι:

- Διαστάσεις μπαλονιού: 3 μέτρα διάμετρος.
- Συνολικό βάρος: 11-16 κιλά.
- Ωφέλιμο φορτίο: περίπου 4-9 κιλά.
- Ταχύτητα: 5 έως 10 km/h (ιδανικά σε νηνεμία).
- Αυτονομία : 4 ώρες για σταθερό άνεμο 1.5 beaufort για το πρωτότυπο.
- Αυτόματος πιλότος με λειτουργικό ανοιχτού κώδικα.

Η κίνηση της πλατφόρμας γίνεται μέσω κινητήρων, οι οποίοι στηρίζονται πάνω στο ειδικά σχεδιασμένο σκελετό της πλατφόρμας. Στο σκελετό της πλατφόρμας προσαρτώνται επίσης το σύστημα τηλεχειρισμού, το σύστημα του αυτόματου πιλότου, ποικίλοι αισθητήρες δεδομένων, οι οποίοι αναφέρουν πληροφορίες σχετικά με την πτήση και την κατάσταση των ηλεκτρονικών της πλατφόρμας, και οι μπαταρίες για την τροφοδοσία του Daedalus Project.

Σύμφωνα με το σχεδιασμό, σε συνθήκες απόλυτης νηνεμίας και εφόσον το Daedalus Project κινείται με ταχύτητα 5km/h, μπορεί να λειτουργεί για περίπου 3.6 ώρες ή αλλιώς να διανύσει 18 χιλιόμετρα απόσταση. Ωστόσο επειδή η απόλυτη νηνεμία είναι μια πολύ ειδική περίπτωση, έπειτα από προσομοιώσεις που έγιναν εκτιμάται ότι το Daedalus Project θα μπορεί να καλύπτει αποστάσεις έως και 7 χιλιόμετρα. Ο σκελετός της πλατφόρμας είναι αρθρωτός, ελαφρύς, αλλά στιβαρός και κατασκευάστηκε από χαμηλού κόστους πρώτες ύλες, ευρέως διαθέσιμες στην Ελληνική αγορά.

Αρχικά, το Daedalus Project προβλέπεται να φέρει μικροκάμερα χαμηλής ανάλυσης και σύστημα μετάδοσης δεδομένων σε επίγειο σταθμό (τηλεμετρία) μέσω τυποποιημένου πρωτοκόλλου επικοινωνίας (πχ. WiFi, Bluetooth) ή ραδιοσυχνότητας ελεύθερης προς ερασιτεχνική χρήση.

3.3 Βασικά Χαρακτηριστικά Λειτουργίας

Προκειμένου να βελτιωθεί το Daedalus Project, έχουν υιοθετηθεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά λειτουργίας:

1. η συνεχής βελτίωση της αυτονομίας της πλατφόρμας και του μέγιστου βάρους φορτίου,
2. η ρύθμιση μιας ομάδας υποστήριξης για την πώληση των υπηρεσιών, όχι μόνο πλατφόρμες,
3. η δημιουργία μιας αποτελεσματικής εφοδιαστικής αλυσίδας για να μειωθεί το κόστος και ο χρόνος,
4. η εταιρεία να προσφέρει αρκετές επιλογές αποστολής ανάλογα με την επιθυμία του πελάτη,
5. η επικοινωνία με τον πελάτη θα είναι συνεχής και θα διαμορφώνεται ανάλογα με τις επιλογές του αγοραστή.

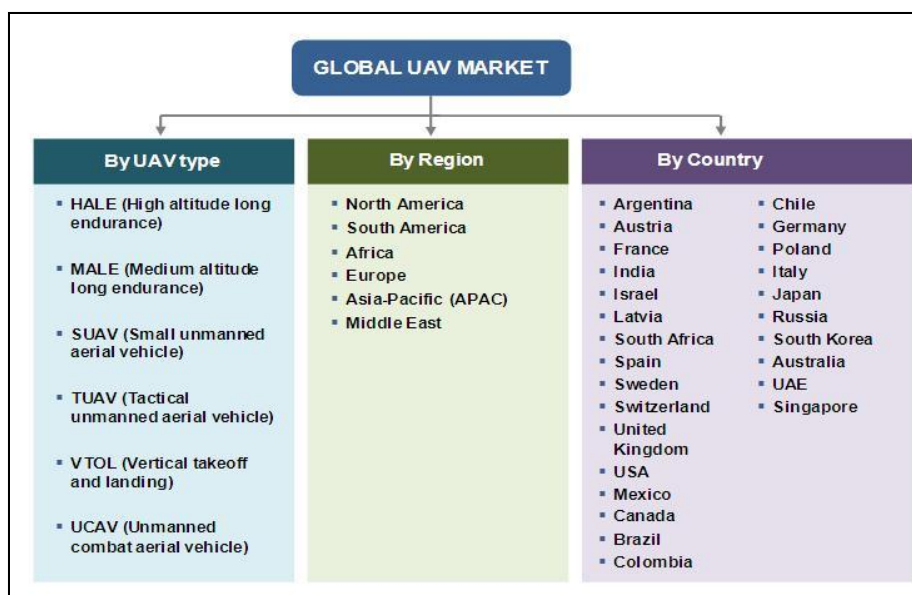
4. Marketing plan

4.1 Η Αγορά

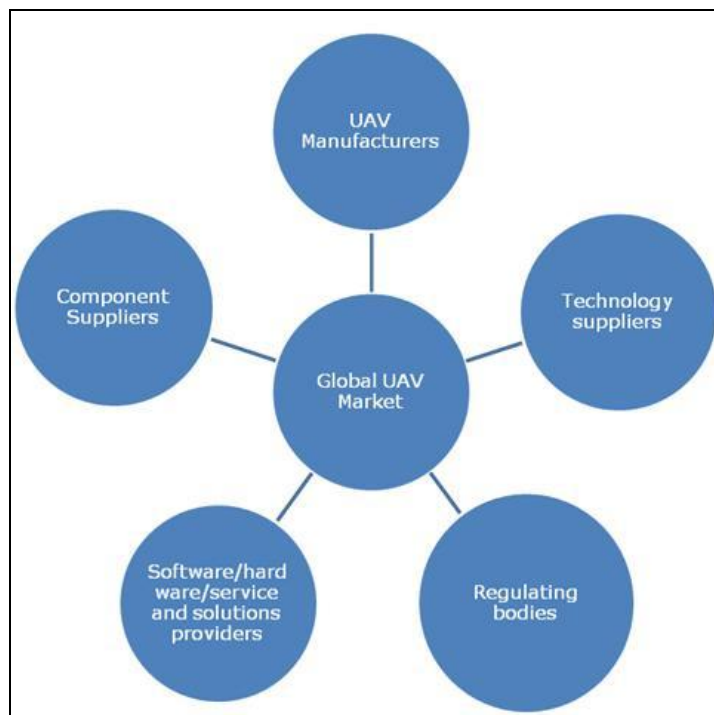
Πολλοί ακόμα θεωρούν ότι η αγορά των UAVs βρίσκεται σε εμβρυικό στάδιο, παρά τις προόδους που πραγματοποιήθηκαν στον προηγούμενο αιώνα. Οι προβλέψεις για το μέλλον της βιομηχανίας παραμένουν συγκρατημένες. Διάφορα στοιχεία, όπως η εξέλιξη της τεχνολογίας, η συγκράτηση δαπανών, οι ρυθμιστικοί έλεγχοι, και η δημόσια αποδοχή θα καθορίσουν τελικά την κατεύθυνση και τη δύναμη της αγοράς των UAV. (DeGarmo, 2004)

Ωστόσο, σήμερα οι προοπτικές για την ανάπτυξη των UAV φαίνονται ελπιδοφόρες. Σε ευρύτερο πλαίσιο, υπάρχουν τρεις σημαντικοί τομείς στην αγορά των UAV: ο στρατιωτικός, ο κυβερνητικός, και ο εμπορικός. Βέβαια, η δυναμική κάθε μιας αγοράς από αυτές διαφέρει σημαντικά, αλλά και οι 3 μοιράζονται έναν κοινό στόχο: να παρέχουν μια υπηρεσία που δεν μπορεί να ολοκληρωθεί με τα επανδρωμένα αεροσκάφη. Η ανάπτυξη της UAV αγοράς, επομένως εξαρτάται από τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους και το κόστος των UAVs σε σύγκριση με τις επανδρωμένες υλοποιήσεις.

Ένα UAV, θα διαφέρει ανάλογα με τις υπηρεσίες, τα έξοδα απόκτησης, τη λειτουργία των συστημάτων πλοήγησης, το επίπεδο ανταγωνισμού, τους ρυθμιστικούς ελέγχους, την ασφαλιστική ευθύνη, κ.λπ. Αν και τα UAVs δεν είναι μια νέα τεχνολογία, εμπεριέχουν πολλά στοιχεία, τα οποία σηματοδοτούν μια νέα αναδυόμενη αγορά. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία δεν είναι εντελώς ώριμη, οι λειτουργικοί μηχανισμοί ακόμα διαμορφώνονται. Αναμένεται ότι η παγκόσμια αγορά των UAV για την περίοδο 2013-2018 θα αυξηθεί από 7.098,6 εκατομμύρια δολάρια το 2013 σε 8351,1 εκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2018. Στα παρακάτω γραφήματα, φαίνονται τομείς της αγοράς, που θα αναπτυχθούν.



Εικόνα 13: Κατανομή της αγοράς με βάση των τύπο UAV, την περιοχή και τη χώρα (marketsandmarkets.com, 2014).



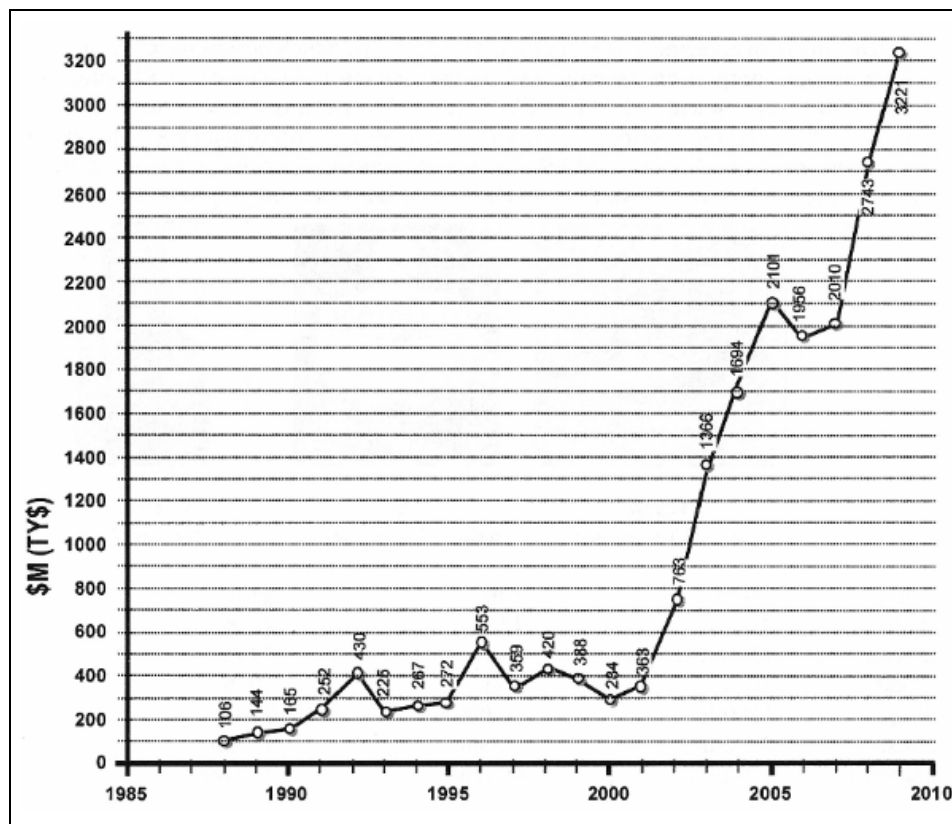
Εικόνα 14: Η διαμόρφωση της αγοράς (marketsandmarkets.com, 2014).

4.1.1 Ο στρατός

Από τις αρχές της δεκαετίας του 50', ο στρατός των Η.Π.Α. έχει ξοδέψει περισσότερα από 25 δισεκατομμύρια δολάρια για την ανάπτυξη των UAV, αλλά λόγω δυσκολιών, στον καθορισμό των προτεραιοτήτων, στην οργάνωση των αποστολών και στην ανάπτυξη προτύπων UAV, είχαν ως αποτέλεσμα τα σχέδια του αμερικάνικου στρατού, που είναι βασισμένα πάνω στα UAVs, να τροποποιούνται, να αντικαθίστανται, ή να απορρίπτονται αρκετά συχνά. Στις μέρες μας, το αμερικάνικο υπουργείο άμυνας και άλλοι ξένοι στρατιωτικοί έχουν προσηλωθεί στην ανάπτυξη UAVs , διότι πιστεύουν ότι τα UAVs αποτελούν ύψιστης σημασίας για το στρατιωτικό οπλοστάσιο τους.

Ο στρατός θέτει το ρυθμό για τη χρηματοδότηση, την έρευνα, και τις εφαρμογές των UAV. Συνεπώς, αποτελούν το μεγαλύτερο κομμάτι της αγοράς των UAVs σήμερα. Σύμφωνα με έναν απολογισμό, το 90% της παγκόσμιας χρηματοδότησης των UAV απευθύνεται σε στρατιωτικά και αμυντικά προγράμματα¹. Στις αρχές του 2000, η αμερικάνικη στρατιωτική δαπάνη για UAVs έφτασε από τα 350 εκατομμύρια δολάρια ετησίως σε πάνω από 1 δισεκατομμύριο δολάρια, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

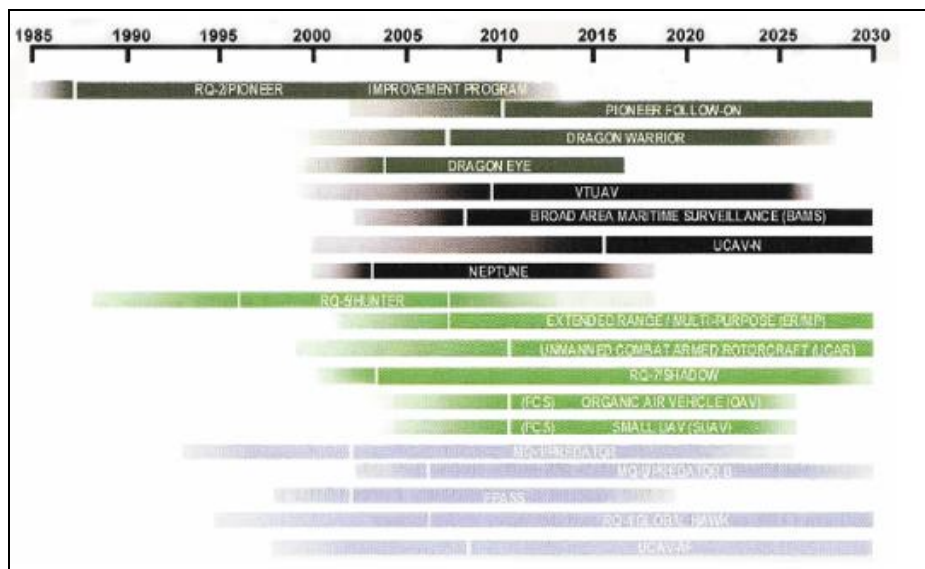
¹Kuke, Dr. Reimund, "Unmanned Aerial Vehicle Safety Issues for Civil Operations (USICO), " Ομιλία στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 26 Ιανουάριος 2004.



Εικόνα 15: Παγκόσμια Δαπάνη για UAV με την πάροδο του χρόνου (Thermotron, 2013).

Με το ποσό των 16 δισεκατομμυρίων δολαρίων, τα οποία επένδυσε το Αμερικανικό Υπουργείο Άμυνας μέχρι το 2010, τοποθέτησε τα αυτόνομα συστήματα στις πρώτες προτεραιότητες του. Σύμφωνα με μια μελέτη του 2004 από τη Teal Group, η αμερικάνικη αγορά για στρατιωτικά UAVs είναι ο δυναμικότερος τομέας της αεροδιαστημικής βιομηχανίας και υπολογίζεται ότι η αγορά θα διπλασιαστεί στην επόμενη δεκαετία. Το 2003, το OSD Roadmap παρείχε το ετήσιο σχεδιάγραμμα χρηματοδότησης για UAVs, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα. Στο παρακάτω γράφημα, παρατηρείται ότι ένα αυξημένο μερίδιο των στρατιωτικών UAVs χρησιμοποιείται σε στρατιωτικά οχήματα (UCAV²s).

² UCAV: Unmanned Combat Aerial Vehicle



Εικόνα 16: Χρονοδιάγραμμα παραγωγής και ανάπτυξης UAV (DeGarmo, 2004).

Αν και οι Η.Π.Α. καταλαμβάνουν την μερίδα του λέοντος στην στρατιωτική αγορά των UAV, υπάρχουν χώρες, οι οποίες έχουν μπει δυναμικά στο αγορά των UAV. Συνοπτικά, παρουσιάζουμε μια περιγραφή των χωρών:

- Η Γαλλία μελετά την αντικατάσταση των μαχητικών της αεροσκαφών με UCAVs. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα πρόγραμμα, ύψους 350 εκατομμυρίων. Σκοπός του προγράμματος είναι η παραγωγή ενός UCAV μέχρι το 2015, το οποίο θα είναι σε θέση να μεταφέρει βόμβες, βάρους ίσου με 500 λίβρες. Επίσης, η Γαλλία ενδιαφέρεται για την ανάπτυξη και την απόκτηση συστημάτων UAV.
- Η βρετανική βασιλική αεροπορία έχει θέσει ως στόχο να αποκτήσει MALE³ και UAV τηλεκατευθυνόμενα εναέρια συστήματα οχημάτων (TUAV) στο πλαίσιο του προγράμματος παρακολούθησης με χρηματοδότηση ύψους 1.3 δισεκατομμύρια δολάρια.
- Η ιταλική πολεμική αεροπορία ανέπτυξε ένα σύστημα UCAV, το οποίο είναι ικανό να κάνει μια πολύωρη πτήση με υψηλή ακρίβεια.
- Η Σουηδία έχει αναπτύξει και έχει πετάξει ένα μικρής κλίμακας UCAV, αλλά θα συμβάλλει στο γαλλικό πρόγραμμα για τα UCAV, επενδύοντας περίπου 80 εκατομμύρια.
- Η Γερμανία επενδύει συνεχώς σε UAVs αναπτύσσοντας και εξελίσσοντας το EADS Barracuda
- Οι ισραηλινές βιομηχανίες αναπτύσσουν διάφορα MALE συστήματα για τη συλλογή πληροφοριών ενώ στην χώρα αναπτύσσονται διάφορα συστήματα TUAV για ξένους πελάτες.
- Ο ρώσικος στρατός χρησιμοποιεί διάφορα TUAVs από τους ρώσους κατασκευαστές. Η Yakolev μελετά την ανάπτυξη UCAVs. Η Tupolev προγραμματίζει την λειτουργία ενός MALE και το Sukhoi συνεργάζεται με τη Γαλλική Dassault στην ανάπτυξη άλλων UAVs.
- Η Αυστραλία έχει εκφράσει ενδιαφέρον για χρήση των UCAV. Ο στρατός της Αυστραλίας έχει χρησιμοποιήσει UAV για την επιτήρηση και την επικοινωνία κατά τη διάρκεια των στρατιωτικών διαδικασιών στο Νότιο Ειρηνικό.

³ MALE: Medium altitude long endurance

- Η Σιγκαπούρη παρουσίασε το MALE UAV ως αντικατάσταση ενός επανδρωμένου αεροσκάφους επιτήρησης. Εξετάζουν επίσης την κατασκευή ενός σκάφους – βασισμένο σε VTOL UAV.
- Η νοτιοκορεατική κυβέρνηση επιδιώκει να αναπτύξει ένα έξυπνο (VTOL) UAV και συζητά την ανάπτυξη μιας βελτιωμένης έκδοσης της αμερικάνικης Eagle Eye tiltrotor UAV.

Σύμφωνα με μια εκτίμηση, οι συνολικές δαπάνες για στρατιωτικά UAVs την περίοδο 2003-2012 ήταν 25 δισεκατομμύρια ευρώ (περίπου 30 δισεκατομμύρια δολάρια), με 84 % των εξόδων να αναφέρονται σε MALE, HALE⁴ και εφαρμογές των UCAV. Εκτός από χρήσεις για συλλογή πληροφοριών, επιτήρησης, και αναγνώρισης, αυτά τα μελλοντικά οχήματα θα χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές, όπως ανίχνευση ορυχείων, μάχες, αεροπορική άμυνα, και ηλεκτρονική εχθροπραξία.

4.1.2 Η κυβέρνηση

Ο στρατός έχει δημιουργήσει ένα περιβάλλον πρόσφορο για την εκμετάλλευση των UAVs από την κυβέρνηση, την έρευνα, και το εμπόριο. Η μετάβαση, όμως, από την αγορά του στρατού στη μαζική αγορά συνεπάγεται κάποιας δυσκολίας. Τα περισσότερα UAV, που παράγονται σήμερα είναι κατασκευασμένα για στρατιωτική χρήση. Το κόστος, η αποτελεσματικότητα, η αξιοπιστία, και η ευκολία κάθε εγχειρήματος, το οποίο αποσκοπεί σε εμπορική χρήση, συχνά διαμορφώνεται μέσα από στρατιωτικούς ελέγχους και στην συνέχεια εισάγεται στην αγορά.

Ο τομέας της ασφάλειας

Σύμφωνα με τους Sullivan και Frost (2003), τα κύρια προγράμματα για την μαζική αγορά της εσωτερικής ασφάλειας μιας χώρας αφορούν:

- Θαλάσσια επιτήρηση.
- Επιτήρηση και αναγνώριση αναγκών (ανά περιοχή).

Στην αγορά βέβαια έχουν τεθεί αρκετοί περιορισμοί. Οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι η αρχική δαπάνη της υλοποίησης της εφαρμογής, η έλλειψη κανονισμών του εναέριου χώρου και της πλεύσης και η πολιτική αποδοχή.

Η εσωτερική ασφάλεια μιας χώρας αποτελεί τον κύριο τομέα της αγοράς για την πολιτική χρήση των UAVs. Στις Η.Π.Α., το τμήμα της εσωτερικής ασφάλειας (Department of Homeland Security, DHS) επένδυσε 10 εκατομμύρια δολάρια για να δοκιμάσει UAVs. Στη συνέχεια, η ακτοφυλακή USNavy χρησιμοποίησε 69 Eagle Eye UAVs, με σκοπό την χρήση τους στο πρόγραμμα Deep Water. Οι κύριες εφαρμογές της εσωτερικής ασφάλειας περιλαμβάνουν:

- Περίπολος συνόρων.
- Παρακολούθηση ευαίσθητων χώρων.
- Παρακολούθηση διακίνησης ναρκωτικών.
- Παρακολούθηση της κυκλοφορίας.
- Αγωγοί μετάδοσης πληροφοριών.

⁴ HALE: High altitude, long endurance

- Ασφάλεια λιμένων.

Άλλες εφαρμογές της κυβέρνησης

Άλλες εφαρμογές της κυβέρνησης αντιμετωπίζονται με μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή και δυνητικά χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Επίσης, εκτελούνται αποστολές σε επικίνδυνες περιοχές, όπως διαρροές χημικών ουσιών ή ακτινοβολίας.

Τέτοιες εφαρμογές μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.
- Παρακολούθηση επιβολής του νόμου.
- Έρευνα και διάσωση.
- Παρακολούθηση των δασικών πυρκαγιών.
- Αναμετάδοση επικοινωνίας.
- Χαρτογράφηση των πλημμυρών.
- Απεικόνιση μεγάλου υψόμετρου.
- Ανίχνευση / Παρακολούθηση Πυρηνικών, βιολογικών, και χημικών συντριβών.
- Παρακολούθηση της κυκλοφορίας.
- Ανθρωπιστική βοήθεια.
- Γεωγραφική αναπαράσταση της γης.
- Παρακολούθηση διαρροής χημικών και πετρελαίου.

Επιστημονικές Εφαρμογές

Επιστημονικές αποστολές, κυρίως για την απεικόνιση και συλλογή δεδομένων. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- Έρευνα και παρακολούθηση των φυσικών κινδύνων.
- Περιβαλλοντική παρακολούθηση και χαρτογράφηση.
- Παρακολούθηση της ατμόσφαιρας.
- Υπερφασματική απεικόνιση.
- Παρατήρηση της ροής πάγου στη θάλασσα.
- Απεικόνιση της υγρασίας του εδάφους.
- Γεωφυσικές διασκοπήσεις (radar, magnetics, gravimetry).

4.1.3 Το εμπόριο

Βασικοί παράγοντες για το εμπόριο των UAV είναι η αύξηση της ευαισθητοποίησης των πελατών για τα UAVs, το χαμηλό κόστος, οι ευέλικτες λύσεις, το επιχειρηματικό μοντέλο βασισμένο στον πελάτη, η λειτουργική απλότητα, ο σύντομος χρόνος αποπληρωμής και η παροχή νέων υπηρεσιών.

Τα βασικά εμπόδια της αγοράς είναι η έλλειψη των μελετών κόστους - οφέλους, το αρχικό κόστος εφαρμογής, η έλλειψη κανονισμών εναέριου χώρου, οι ανύπαρκτοι νόμοι πλεύσης για τα UAV, η ασφάλεια και η διαθεσιμότητα των αισθητήρων.

Η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζει η εμπορική ανάπτυξη παραμένει η δημιουργία των προτύπων και του κανονιστικού πλαισίου που ισχύει για τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Η απουσία των προτύπων και των κανονιστικών ρυθμίσεων καθιστούν δύσκολο για τους επενδυτές να δικαιολογούν τη χρηματοδότηση της ανάπτυξης UAV, και για τους ασφαλιστές να καθορίσουν ένα εύλογο κόστος ευθύνης για τις πράξεις τους.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις που επιβάλλονται για τα UAV, οι δαπάνες, που συνδέονται με την ανάπτυξη ενός συστήματος με καθορισμένα πρότυπα, μπορούν να κάνουν το μοναδιαίο κόστος των UAVs μη-ανταγωνιστικό σε σύγκριση με τα επανδρωμένα αεροσκάφη. Παραδείγματος χάριν, οι προσδοκίες για υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και ασφάλειας θα μπορούσαν να οδηγήσουν την ανάπτυξη, τη δοκιμή, και τις δαπάνες παραγωγής πολύ υψηλότερα από εκείνα ενός συγκρίσιμου επανδρωμένου οχήματος.

Εμπορικές Εφαρμογές

Πολλές από τις εμπορικές εφαρμογές που αναπτύσσονται αυτήν την περίοδο για αστική χρήση περιλαμβάνουν μεγάλα UAVs που είναι σε θέση να αντικαταστήσουν το πλήρωμα των επανδρωμένων αεροσκαφών. Μεγάλο ενδιαφέρον όπως δείχνουν οι τάσεις θα προκύψει για τα μικρά αεροσκάφη. Το ενδιαφέρον για μικρά UAVs έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια εν μέρει λόγω των βελτιώσεων στη μικροηλεκτρονική, τους αισθητήρες, τη διάδοση συστημάτων παγκόσμιας πλοήγησης (GPS), και την ανάπτυξη των κατάλληλων ασύρματων επικοινωνιών. Ένας κατάλογος πιθανών εμπορικών εφαρμογών και για μεγάλα και μικρά UAVs περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Έλεγχος συγκομιδών.
- Γεωργικές εφαρμογές.
- Μαγνητοσκόπηση κινηματογραφικών ταινιών.
- Επιθεώρηση έργων.
- Υποστήριξη ειδήσεων και μέσων μαζικής ενημέρωσης.
- Εναέρια διαφήμιση.
- Έρευνα και χαρτογράφηση.
- Εμπορική απεικόνιση.
- Μεταφορά Φορτίου.
- Εμπορική ασφάλεια.

4.1.4 Γεωφυσική Έρευνα

Το μικρό φυσικό μέγεθος των UAV και η χαμηλή περιεκτικότητα του σε μέταλλα σε σχέση με εκείνη ενός επανδρωμένου αεροσκάφους, καθιστούν τα UAV απαραίτητα για τη γεωφυσική έρευνα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετρήσεις από UAV εξασφαλίζουν λιγότερες διαταραχές για μαγνητικά και βαρυτικά πεδία που μετρούνται, επιτρέποντας πιο ακριβείς μετρήσεις στους παρακάτω τομείς:

- Ένταση και διαβάθμιση πεδίου:
 - ο του μαγνητικού πεδίου (αερομαγνητικές),
 - ο του διαφορικού πεδίου βαρύτητας (gradiometry).
- ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις:
 - ο της ηλεκτρομαγνητικής φάσης πάνω από ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων,

- με Γεωραντάρ ανίχνευσης του εδάφους και των πετρωμάτων.
- άλλες μετρήσεις:
 - φασματόμετρο ακτίνων γάμμα και νετρονίων εκφρασμένες σε μετρήσεις στάθμης,
 - χρησιμοποιώντας ανιχνευτή με φωτο-ιονισμό για να μετρηθούν τα επίπεδα αιθανίου στον αέρα,
 - υψηλής ανάλυσης πολυφασματική απεικόνιση, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής απεικόνισης.

Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα της χρήσης UAV, στη γεωφυσική έρευνα (Barnard, 2008) είναι:

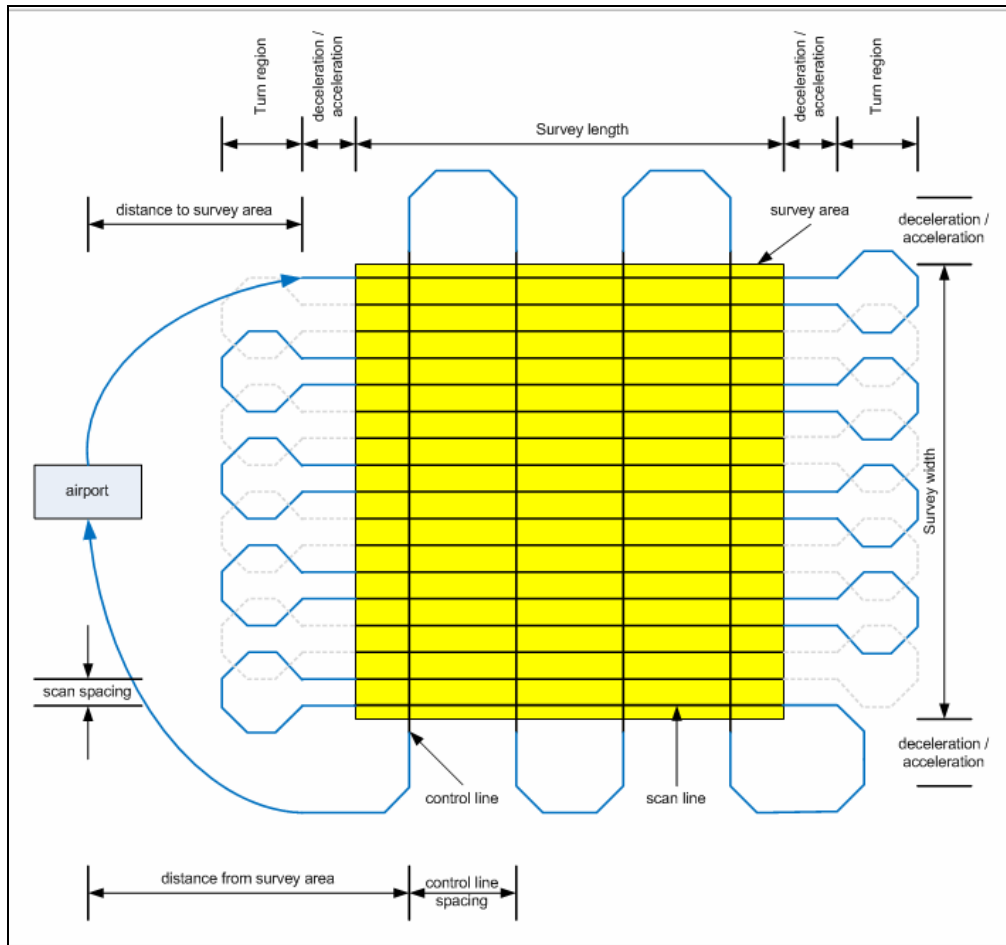
- Ένα UAV μπορεί να παραμείνει στον αέρα για 30 ώρες. Αυτή η διάρκεια είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη διάρκεια ενός επανδρωμένου αεροσκάφους, όπου η διάρκεια για ένα πιλοτικό θεωρείται ότι είναι το πολύ περίπου πέντε ώρες.
- Τα UAV μπορούν να πετάξουν σε περιοχές, όπου υπάρχει πραγματικός κίνδυνος για τη ζωή ενός πιλότου:
 - πάνω από την περιοχή της Αρκτικής,
 - σε περιοχή ακραίων καιρικών συνθηκών,
 - σε περιοχές που αντιμετωπίζουν εμφύλιες διαμάχες.
 - σε περιοχές πυρηνικών εκπομπών
- Τα UAV πετάνε πάντα με τη χρήση προηγμένων συστημάτων πλοήγησης, όπως το GPS και ενός υψομετρητή με λέιζερ, σε συνδυασμό με τον ακριβή έλεγχο του υπολογιστή και μπορούν να:
 - εκτελέσουν μια πολύ ακριβή σάρωση μιας περιοχής,
 - πετούν τη νύχτα, για να επωφεληθούν από τις παρεμβολές τόσο του ήλιου, όσο και του πολιτιστικού θορύβου (όπως τα σήματα κινητών τηλεφώνων, τα ραδιοσήματα),
 - πετούν σε πολύ χαμηλά επίπεδα (όπως 20 m πάνω από το επίπεδο του εδάφους) για αύξηση της ανάλυσης δεδομένων,
 - προσδιορίζουν με ακρίβεια τη στάση των αεροσκαφών, που χρησιμοποιούν για την ερμηνεία.
- Ένα UAV δημιουργεί λιγότερο θόρυβο στα δεδομένα που μετρούνται, όπως το μαγνητικό, ή, το βαρυτικό του πεδίο, δεδομένου ότι είναι φυσικά μικρότερο από ένα επανδρωμένο ομόλογό του.
 - Τα UAV κοστίζουν λιγότερο να λειτουργούν ανά γραμμή km, δεδομένου ότι:
 - Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη με ένα τυπικό φορτίο των 9 kg είναι λιγότερο ακριβά να αγοραστούν από επανδρωμένα αεροσκάφη.
- Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν χαμηλότερο κόστος λειτουργίας:
 - ένας χειριστής για μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορεί να διαχειριστεί αρκετά UAV ταυτόχρονα.
 - τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη χρησιμοποιούν λιγότερο από το 20% του καυσίμου, που χρησιμοποιούν τα επανδρωμένα αεροσκάφη.
 - ένα μικρό μη επανδρωμένο αεροσκάφος μπορεί συχνά να απογειωθεί από ένα επίπεδο πεδίο, παρά από ένα αεροδρόμιο.
- Λόγω του χαμηλότερου λειτουργικού κόστους ενός UAV, σε σχέση με ένα επανδρωμένο αεροσκάφος, μπορεί κανείς να εκτελεί επαναλαμβανόμενες έρευνες στην ίδια περιοχή, να εντοπίσει τις αλλαγές που επέρχονται με τον χρόνο, για παράδειγμα, σε εξάντληση του

αποθέματος πετρελαίου, ή σε διαρροή αγωγού. Κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα από εκτεταμένες μετρήσεις είτε στο μαγνητικό ή βαρυτικό πεδίο, για να παράγει με κατάλληλο λογισμικό την τρισδιάστατη (3D) γεωλογία του υποκείμενου εδάφους. Εάν μετρήσεις γίνονται σε τακτική βάση, μπορεί κανείς να απεικονίσει τις αλλαγές, που λαμβάνονται σε τρισδιάστατη δομή του εδάφους (όπως την εξάντληση του πετρελαίου από ένα κοίτασμα πετρελαίου) στην πάροδο του χρόνου. Αυτή η αναπαράσταση των αλλαγών στη γεωλογία σε 3D κατά την πάροδο του χρόνου T συχνά αναφέρεται ως 4D (δηλαδή 3D + χρόνος) αναπαράσταση.

- Τα μικρά μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον, δεδομένου ότι:
 - ο απαιτούν λιγότερα υλικά για την κατασκευή,
 - ο χρησιμοποιούν λιγότερα καύσιμα ανά χιλιόμετρο,
 - ο δημιουργούν λιγότερη ρύπανση ανά km,
 - ο κάνουν λιγότερο θόρυβο κατά την πτήση.
- Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορούν να πετούν σε απόλυτο σκοτάδι τη νύχτα, ή σε οποιαδήποτε άλλη στιγμή, όταν η δραστηριότητα των ηλιακών κηλίδων και το πολιτιστικό επίπεδο του θορύβου είναι στο χαμηλότερο επίπεδο, επιτρέποντας μετρήσεις να λαμβάνονται με ελάχιστο θόρυβο.
- Τα UAV μπορούν να πετούν πολύ κοντά στο έδαφος με πλοήγηση ακριβείας και με έλεγχο από ένα υπολογιστή πτήσης. Αυτό το χαμηλό επίπεδο πτήσης επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια των δεδομένων που πρέπει να συγκεντρωθούν.
- Η χρήση πολλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών:
 - ο δεν διακόπτει η έρευνα αν ένα UAV αντιμετωπίσει πρόβλημα.
 - ο για να καλυφτεί η ίδια περιοχή επιτρέπει μια βελτίωση στην ακρίβεια των δεδομένων, μέσω της εφαρμογής του μέσου όρου των δεδομένων. Χρησιμοποιώντας διάφορα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, τα αποτελέσματα από διάφορα συστήματα μέτρησης μπορούν να συσχετίζονται, έτσι ώστε τα σφάλματα και οι παρεμβολές σε οποιοδήποτε μέτρηση να μπορούν να αναγνωριστούν άμεσα.

Ένα ιδανικό UAV για γεωφυσική έρευνα :

- Ζυγίζει λιγότερο από 10 κιλά, περιέχοντας:
 - ο Κάμερα και οπτικοακουστικό εξοπλισμό με σκοπό την οπτική, θερμική και IR απεικόνιση.
 - ο Πολλαπλές, υψηλής ανάλυσης CCD, με βάση απεικόνισης για τη συλλογή δεδομένων για 3D τοπογραφία.
 - ο Υπέρφασματικό σύστημα απεικόνισης.
 - ο Μονάδα σάρωσης LIDAR για την ψηφιακή χαρτογράφηση.
 - ο Quantum καταρράκτη με λέιζερ για την ανίχνευση αιθάνιου.
 - ο Μικρογραφία SAR (όπως το ImSAR, NanoSAR).
 - ο Βαρυτόμετρο (συμβατική μέτρηση ή διαβάθμιση - νέος σένσορας περίπου 2kg).

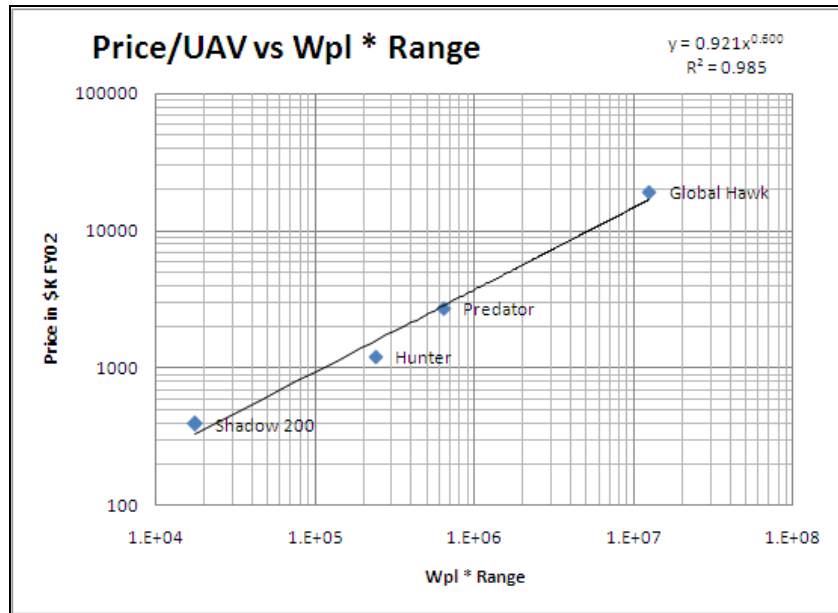


Εικόνα 17: Ένα πρότυπο σχέδιο πτήσης ενός UAV (Barnard, 2008).

Μια έρευνα ανάπτυξης καλύπτει συνήθως έκταση 400 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Για τυπική έρευνα ανάπτυξης 400 τετραγωνικών χιλιομέτρων, υπολογίζουμε ότι χρειάζονται 2 πτήσεις, κάθε πτήση θα καλύπτει 1.569 γραμμή χιλιομέτρων σε μόλις 15,7 ώρες, για ένα UAV κινούμενο στα 100 kph.

Για τυπική έρευνα εξερεύνησης μιας περιοχής 10.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων, απαιτούνται 24 πτήσεις. Κάθε πτήση μπορεί να καλύπτει 1.560km και θα διαρκεί 15,7 ώρες, με ταχύτητα πλεύσης 100 kph.

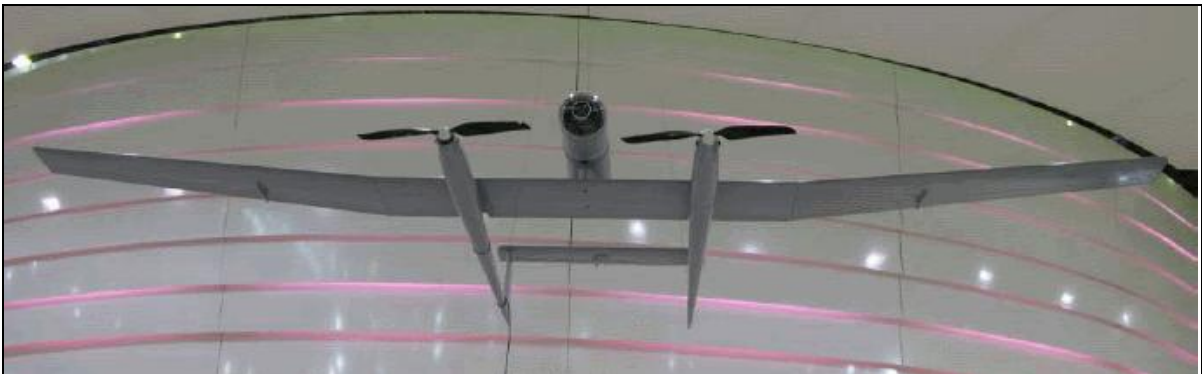
Σύμφωνα με τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ένα UAV, θα είναι κατάλληλο για γεωφυσική έρευνα.



Εικόνα 18: Διάγραμμα για το εύρος των UAV σε σχέση με το κόστος (Barnard, 2008).

Οι προδιαγραφές για ιδανική γεωφυσική έρευνα με μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι:

- Φορτίο : 9 κιλά
- Εύρος : 1.800 χιλιομέτρων
- Take-off βάρος υπολογίζεται να είναι 100 kg
- Ταχύτητα πλεύσης= 100 kph
- Εξοπλισμός : δύο έλικες, χαμηλής δόνησης με τέσσερις κινητήρες καθένας χωρητικότητας περίπου 80cc
- Τιμή: λιγότερο από 310.000 δολάρια

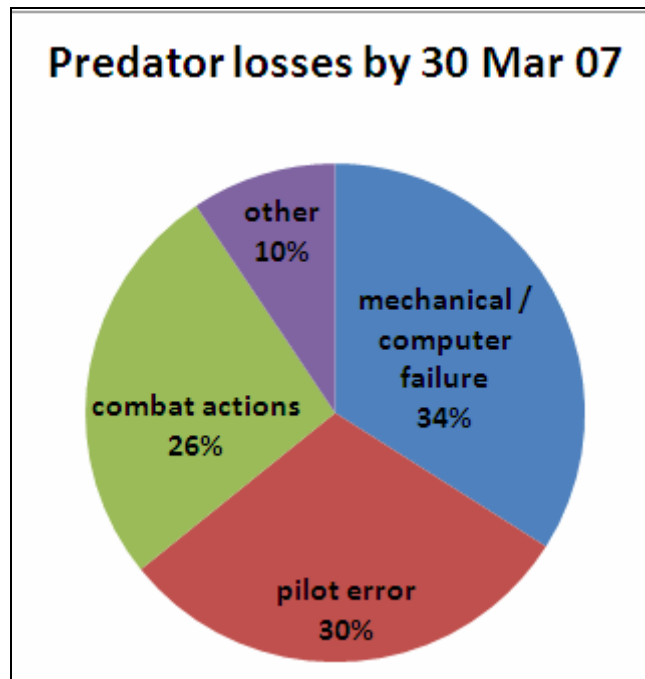


Εικόνα 19: Ένα EADS Drac Unmanned Aircraft με δύο κινητήρες για ερευνητική εργασία (Barnard, 2008).

4.1.5 Οι προκλήσεις

Αξιοπιστία

Πολλά από τα σημερινά μη επανδρωμένα αεροσκάφη προορίζονται για χρήση σε στρατιωτικές εφαρμογές. Όμως, τα περισσότερα από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη απαιτούν βελτιώσεις. Θα περίμενε κανείς βελτιωμένη αξιοπιστία, με τη χρήση δύο κινητήρων χαμηλών κραδασμών, με τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη να είναι σε θέση να πετάζουν με ένα από τους δύο κινητήρες.



Εικόνα 20: Απώλειες σε UAV predator κατά την πτήση μέχρι τις 20/03/2007 (dronewars.net, 2011).

Πτήση σε εναέριο χώρο

Για να πετάξει ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος στον πολιτικό εναέριο χώρο, θα πρέπει να:

- πληροί τα εθνικά κριτήρια πτήσης στον αέρα, αν το βάρος απογείωσης είναι μικρότερο από 150 kg, ή διεθνή κριτήρια, εάν είναι μεγαλύτερο,
- είναι σε θέση να ανταποκριθεί στις φωνητικές επικοινωνίες ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Για μεγάλες αποστάσεις με μη επανδρωμένα αεροσκάφη, χρειάζεται αξιόπιστη, και δορυφορική επικοινωνία,
- υποστηρίζει μια 'sense and avoid' ικανότητα σε σχέση με άλλα αεροσκάφη, ισοδύναμη με εκείνη ενός πιλοτικού αεροπλάνου. Τα συστήματα αυτά βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο της ανάπτυξής τους.

Απώλεια της ζωής, υλικές ζημιές και δυσφήμιση που προκύπτουν από ατυχήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Μια σημαντική ανησυχία είναι η πιθανή απώλεια της ζωής, οι υλικές ζημιές και η αρνητική φήμη ενός ερευνητικού οργανισμού που προκλήθηκε από τη συντριβή ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους. Αυτή η δυσφήμιση μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια της άδειας της εταιρείας, που συνδέεται με τη χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Η βλάβη που προκαλείται από ένα ιπτάμενο όχημα σχετίζεται με την κινητική ενέργεια του οχήματος.

Στις 3 Οκτώβρη του 2006, ένα IAI / Belgian Hunter συνετρίβη στην Κινσάσα, σκοτώνοντας δύο άτομα και τραυματίζοντας άλλα δύο. Η αιτία του ατύχηματος αποδίδεται σε λάθος του χειριστή. Αυτή είναι η πρώτη φορά που κάποιος σκοτώνεται από ένα UAV. Το περιστατικό αυτό προκάλεσε μεγάλη συζήτηση στο ευρωπαϊκό κοινοβούλιο, όσον αφορά το ποιος θα πληρώσει την αποζημίωση.

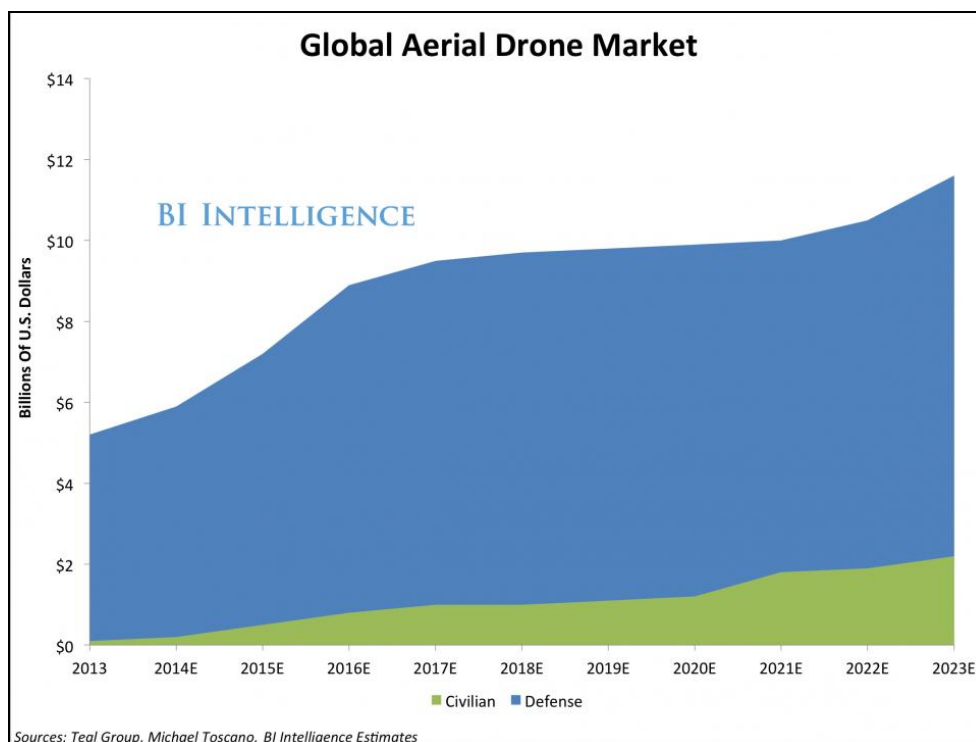
Συνοψίζοντας, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν να προσφέρουν αρκετά στους τομείς του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και των μεταλλευτικών ερευνών. Ωστόσο, η αξιοπιστία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών πρέπει να βελτιωθεί, καθώς μη επανδρωμένα αεροσκάφη οφείλουν να πετούν σε μη-διαχωριζόμενο εναέριο χώρο, ώστε να μπορεί να γίνει μεγάλη χρήση κλίμακας αυτής της τεχνολογίας.

4.1.6 Σήμερα

Οι τεχνολογίες, που υιοθετούνται σήμερα στα συστήματα UAV, εξελίσσονται ραγδαία και είναι πολλά υποσχόμενες. Τα αυτόνομα συστήματα γίνονται πιο περίπλοκα και πιο αξιόπιστα. Τα UAVs, έχοντας τη δυνατότητα να πάρουν μέρος σε υψηλού κινδύνου αποστολές και το πλεονέκτημα τους για χαμηλού κόστους διαδικασίες σχετικά με τα επανδρωμένα αεροσκάφη, τα καθιστά έναν ιδανικό κλάδο για ανάπτυξη στην επιστήμη της αεροπορίας. Έρευνες σε τομείς όπως υλικών καυσίμων και προσαρμοστικότητας του λογισμικού, θα μπορούσαν να αναδιαμορφώσουν την αγορά και να δημιουργήσουν νέες προκλήσεις.

Εντούτοις, για την UAV αγορά σημαντικό ενδιαφέρον δίνεται στη διαμόρφωση της νομοθεσίας για τον εναέριο χώρο και η ένταξή στο σύστημα εναέριας κυκλοφορίας. Συνεπώς, τα UAVs θα απαιτήσουν ρυθμιστικούς και τεχνικούς μηχανισμούς ώστε να φτάσουν σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο ασφαλείας με απώτερο στόχο να εξασφαλίσουν κοινή αποδοχή. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί, να αναλυθεί, και να επιλυθεί μια λίστα από ζητήματα. Πολλά από αυτά τα ζητήματα ποικίλλουν στην πολυπλοκότητα, στα προγράμματα, στις δαπάνες, και στους κινδύνους. Η εξής διπλωματική εργασία επιδιώκει να εξετάσει την ανάπτυξη μιας καινοτόμου, χαμηλού υψομέτρου ιπτάμενης πλατφόρμας και τη εφαρμογή της στη διασκόπηση για έρευνα ορυκτών και πετρελαίου με τη βαρομετρική μέθοδο.

Η αγορά των ιπτάμενων πλατφόρμων παγκόσμια είναι σε φάση πλήρης ανάπτυξης. Μέχρι πρόσφατα οι κύριες υλοποιήσεις αφορούσαν μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (UAV) κυρίως με τη μορφή μικρών ελαφρών αεροσκαφών, τα οποία συνήθως ελέγχονταν από επίγειο χειριστή μέσω τηλεχειρισμού. Αυτού του είδους οι πλατφόρμες χρησιμοποιούνται συνήθως για στρατιωτικούς σκοπούς, όπως η επιτήρηση περιοχών και στόχων μέσω μεταφοράς συστημάτων καμερών και τηλεπικοινωνιών ενώ επιχειρούν από μεγάλα σχετικά ύψη για να διατηρήσουν την ασφάλεια τους και να αποκρύπτονται από τον εχθρό.



Εικόνα 21: Εκτιμήσεις για την αγορά των drones (UAV) (businessinsider.com, 2013).

Αυτή τη στιγμή η αγορά των ιπτάμενων πλατφόρμων (drones, loons, UAV κλπ) επεκτείνεται ταχύτατα και σε εμπορικές εφαρμογές, με χαρακτηριστικές αυτές για τη κάλυψη τηλεοπτικών γεγονότων (συνήθως μικρές υλοποιήσεις σε χαμηλό ύψος που ίπτανται με έλικες) είτε για το διαμοιρασμό τηλεπικοινωνιών σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, μέσω ηλεκτροκινούμενων αεροσκαφών, ή και ειδικών μπαλονιών που κινούνται σε στρατοσφαιρικά ύψη (περίπου 60.000 πόδια).

Οι δύο τελευταίες εφαρμογές είναι σε πειραματικό στάδιο από εταιρίες, όπως η Google και η Facebook, ενώ ακόμα πιο πρόσφατα η Amazon ανακοίνωσε τη πρόθεση της να ερευνήσει τη δυνατότητα παράδοσης μικρών δεμάτων μέσω drones. Η εταιρία Business Insider εκτιμά ότι μέσα στην επόμενη δεκαετία ο τζίρος των εναέριων drones θα φτάσει τα \$98 δισεκατομμύρια δολάρια με το 12% αυτής της αγορά να αποτελούν οι εμπορικές εφαρμογές ενώ και για τα UAV οι προβλέψεις μιλάνε για επενδύσεις \$80 δισεκατομμυρίων δολαρίων στην επόμενη δεκαετία σύμφωνα με το Bloomberg.

4.2 Ανταγωνισμός

Στη παρούσα φάση, η αγορά βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο που το 'Daedalus Project' στην κατηγορία του δεν έχει συγκεκριμένο άμεσο ανταγωνισμό. Οι υλοποιήσεις ανταγωνιστικών εταιριών, όπως αυτές της Google, Facebook, Lockheed Martin, αφορούν πολύ μεγάλα projects που προσανατολίζονται να επιχειρούν σε πολύ μεγάλα ύψη και κύριο σχεδόν σκοπό το διαμοιρασμό υπηρεσιών δεδομένων internet. Εξαιρεση αποτελεί η LM όπου αναπτύξει ένα μεγάλου μεγέθους αερόστατο τύπου ζέπελιν με σκοπό την αγορά φορτίων, σε αρχικό στάδιο 25 τόνων ωφέλιμου με προοπτική να αυξηθούν πολύ παραπάνω.

Στη κατηγορία των μικρών φορτίων με μεγάλη χρονική διάρκεια πτήσης σε σχετικά περιορισμένη περιοχή δεν υπάρχει αντίστοιχος ανταγωνιστής, καθώς τα μικρά αεροσκάφη ή τα μικρά

drones δεν έχουν αυτές τις δυνατότητες. Επιπλέον, τα μικρά αεροσκάφη λόγω του γεγονότος ότι έχουν υψηλή ελάχιστη ταχύτητα πτήσης εμφανίζουν πολλές δυσκολίες στον αυτόνομο έλεγχο τους σε μικρή περιοχή.

Μέχρι τώρα δεν υπάρχει αντίστοιχη υλοποίηση του 'Daedalus Project' στο μέγεθος του, που διασφαλίζει μεγάλο χρόνο παραμονής σε μια περιοχή ή ακόμα και αιώρηση δίνοντας του ένα πολύ σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη υλοποίηση.

Ειδικά για την κατηγορία των υπηρεσιών ασφαλείας που απευθύνεται σε αστυνομία, πυροσβεστική και αντίστοιχου τύπου υπηρεσίες, δεν υπάρχει πλατφόρμα που να ξεπερνά τις δυνατότητες του 'Daedalus Project' αφού εκτός των χαρακτηριστικών που έχουν προαναφερθεί το 'Daedalus Project' έχει τη δυνατότητα κάθετης από-προσγείωσης.

4.2.1 Η διαφοροποίηση του Δαίδαλου από τον ανταγωνισμό

Η διαφοροποίηση του 'Daedalus Project' είναι η δυνατότητα παραμονής στον αέρα σε περιορισμένου χώρου περιοχή και σε εύρος υψομέτρου κίνησης από χαμηλά έως μεσαία ύψη, για πολύ περισσότερο χρόνο από οποιαδήποτε άλλη πλατφόρμα (των γνωστών drones ή άλλων UAVs) λόγω του γεγονότος ότι τη παραμονή του εν πτήση εξασφαλίζεται κυρίως από το μετεωρολογικό μπαλόνι και όχι από μηχανισμούς πτήσης όπως οι υπόλοιπες υλοποιήσεις.

Στην περίπτωση του 'Daedalus Project' τα μηχανικά στοιχεία χρησιμοποιούνται μόνο για την επίτευξη της επιλογής πορείας και υψομέτρου, καταναλώνοντας πολύ λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τον ανταγωνισμό του. Επιπλέον, ακόμα και σε περίπτωση αστοχίας, η πλατφόρμα μας δεν διατρέχει άμεσα το κίνδυνο να πέσει επάνω σε πλήθος, καθώς η απώλεια των κινητών μερών θα οδηγήσει στην απώλεια ελέγχου της κίνησης και όχι της πτήσης αυξάνοντας τα περιθώρια ασφαλείας για χρήση σε πολυπληθείς ή πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα επίσης αποτελεί το ωφέλιμο βάρος μεταφοράς, το οποίο μπορεί να κινηθεί από περίπου 4 κιλά και μπορεί να φτάσει πιθανόν έως τα 9 κιλά ύστερα και από τη βελτιστοποίηση των υλικών κατασκευής του πλαισίου ανάρτησης και της συνολικής αεροδυναμικής συμπεριφοράς του μπαλονιού.

4.2.2 Η καινοτομία της ιδέας

Το 'Daedalus Project' προσδοκά στην τελική υλοποίηση του, ώστε να αποτελεί μια πλήρως αυτόνομη πλατφόρμα, η οποία θα κινείται ανεξάρτητα των καιρικών συνθηκών για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε χαμηλά (κάτω από 100 μέτρα) και μεσαία υψόμετρα, παρέχοντας τη δυνατότητα προσαρμογής άμεσα στις απαιτήσεις της εκάστοτε αποστολής, αλλάζοντας απλά τα φορτία του εξοπλισμού, που θα μεταφέρει. Σήμερα, δεν υπάρχουν υλοποιήσεις με αυτές τις προδιαγραφές στην αγορά.

4.3 Η λύση του Daedalus Project

Η ιδιαιτερότητα του “Daedalus Project” είναι η χρήση του μπαλονιού ως ενεργητικού συστήματος διατήρησης σε πτήση της πλατφόρμας. Οι περισσότερες πλατφόρμες που απευθύνονται για κάλυψη

μικρών περιοχών είτε έχουν σημαντικούς περιορισμούς χρόνου παραμονής σε πτήση, είτε έχουν περιορισμένες δυνατότητες μεταφοράς φορτίων.

Στη περίπτωση δε υλοποιήσεων με τη μορφή αεροσκάφους η παραμονή σε σχετικά περιορισμένη περιοχή αυξάνει τη δυσκολία αξιοποίησης της πλατφόρμας, διότι απαιτεί να κινείται με κάποια ελάχιστη ταχύτητα, ώστε να παραμένει εν πτήση. Συνήθως, οι μικρές πλατφόρμες δεν είναι ικανές για τη μεταφορά φορτίων πάνω από 1 με 1,5 κιλά, ενώ δεν υποστηρίζουν εξειδικευμένο “ad hoc” εξοπλισμό, ο οποίος εναλλάσσεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του πελάτη. Συχνά αποτελούν αερομοντέλα κάποιου είδους, που μπορούν να αγοραστούν από τον ενδιαφερόμενο ή σε μεγαλύτερες υλοποιήσεις να ενοικιαστεί η λειτουργία τους.

Το “Daedalus Project” καλύπτει το συγκεκριμένο κενό, προσφέροντας ευέλικτη κίνηση σε χαμηλά υψόμετρα, μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στο σημείο ενδιαφέροντος και ευελιξία στη μεταφορά βαρύτερων και διαφορετικών κατά περίπτωση φορτίων με ελεγχόμενο και αυτόνομο (στη τελική του έκδοση) τρόπο.

4.4 Οι στόχοι

Η πλατφόρμα του “Daedalus Project” απευθύνεται σε εφαρμογές τόσο εμπορικές, όσο και σε στρατιωτικές. Χαρακτηριστικές πιθανές υλοποιήσεις των δυνατοτήτων, όπως έχουν αναφερθεί, είναι για παράδειγμα η πραγματοποίηση εξειδικευμένων μετρήσεων του εδάφους (χαρτογράφηση) ή του υπεδάφους για αναζήτηση ορυκτών πόρων με βαρυτομετρικές ή μαγνητικές μεθόδους.

Επίσης, η χρήση του ως κινητού τηλεπικοινωνιακού κόμβου για το διαμοιρασμό υπηρεσιών φωνής ή δεδομένων (internet, airnetworking) σε συγκεκριμένες επιλεγμένες περιοχές, είτε για εμπορικούς – διαφημιστικούς σκοπούς ή και για στρατιωτικούς, είτε ακόμα και για ανθρωπιστικούς σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, όπου η σταθερή υποδομή έχει υποστεί σοβαρές ζημιές ή η περιοχή είναι εξαιρετικά δύσβατη, είναι εφικτή καθώς και η κάλυψη τηλεοπτικών γεγονότων σε πραγματικό χρόνο.

Επιπροσθέτως, πραγματοποιήσιμη είναι η επίβλεψη περιοχών για θέματα ασφάλειας (π.χ. αστυνομία) με την πλατφόρμα να ταξιδεύει μέσα στη πόλη παρέχοντας εικόνα και δεδομένα για την πρόληψη της εγκληματικότητας ή τη ρύθμιση της κυκλοφορίας, ακόμα και τη μέτρηση από αέρα με κατάλληλους αισθητήρες πιθανές εκπομπές ραδιενέργειας. Ειδικά στην περίπτωση της χρήσης της από υπηρεσίες ασφαλείας σε συνδυασμό με προγράμματα αναγνώρισης προσώπου, το “Daedalus Project” θα είναι σε θέση να παρέχει πρωτόγνωρες δυνατότητες επίβλεψης. Τελευταίο αλλά όχι ασήμαντο, όλα τα παραπάνω θα γίνουν πραγματικότητα λόγω του μεγάλου ωφέλιμου φορτίου σε συνδυασμό με του μεγάλο χρόνο παραμονής της πλατφόρμας στη περιοχή ενδιαφέροντος.

Δυναμικές Εφαρμογές

Η αγορά των Unmanned Aerial Vehicles (UAV) είναι από τις πλέον ταχέως αναπτυσσόμενες με προβλέψεις για επενδύσεις δεκάδων δισεκατομμυρίων δολαρίων στην επόμενη δεκαετία. Η έρευνά της ομάδας έδειξε ότι γενικά υπάρχει ενδιαφέρον για εφαρμογές στον αέρα, τόσο από την ερευνητική κοινότητα, όσο και από τον εμπορικό κόσμο.

Οι τέσσερις κύριοι τομείς ενδιαφέροντος, σύμφωνα με την έρευνας της ομάδας, είναι η οπτική επίβλεψη, η διεξαγωγή μετρήσεων, οι προωθητικές δράσεις (διαφήμιση) και η μεταγωγή δεδομένων. Παραδείγματα δυνητικών εφαρμογών ανά τομέα αναφέρονται κάτωθι:

- Οπτική επίβλεψη
 - Πρόβλεψη εκδήλωσης πυρκαγιών,
 - Εποπτεία καταστροφών,
 - Οπτική επίβλεψη δυσπρόσιτων σημείων,
 - Εκτίμηση οδικής κυκλοφορίας και έγκαιρη ειδοποίηση συμφόρησης,
 - Εύρεση αγνοούμενων ή ζώων σε δύσβατα σημεία.
- Διεξαγωγή μετρήσεων
 - Συλλογή κλιματικών δεδομένων,
 - Εκτίμηση καιρικών συνθηκών/ πρόβλεψη μικροκλίματος,
 - Μετρήσεις ατμοσφαιρικών ρύπων,
 - Τοπογραφική αποτύπωση,
 - Τρισδιάστατη αποτύπωση.
- Προωθητικές δράσεις
 - Φωτογραφία,
 - Βιντεοσκόπηση,
 - Μεταφορά αντικειμένων μικρού βάρους,
 - Διαφήμιση,
 - Κάλυψη γεγονότων.
- Μεταγωγή δεδομένων
 - Αναμετάδοση ήχου & εικόνας,
 - Συλλογή δεδομένων μεγάλων δικτύων αισθητήρων,
 - Επικοινωνία μεταξύ ομάδων,
 - Αναμετάδοση σήματος.

Ωστόσο, κρίσιμος παράγοντας για τη δυνατότητα χρήσης και εμπορικής αξιοποίησης της πλατφόρμας είναι το ισχύον νομικό πλαίσιο που σήμερα είναι αρκετά περιοριστικό. Συγκεκριμένα, σχετικά με τις ερασιτεχνικές πτήσεις στην Ελλάδα, επιτρέπονται οι πτήσεις σε υψόμετρο μικρότερο των 400 ποδιών (περίπου 120 μέτρα) από το έδαφος και μακριά από κατοικημένες περιοχές. Επίσης, τίθενται όρια για το μέγεθος των αερόπλοιων, τα οποία λήφθηκαν υπόψη κατά την κατασκευή του “Daedalus Project”.

4.6 SWOT Analysis

Η ανάλυση SWOT είναι ένα εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού το οποίο χρησιμοποιούμε για την ανάλυση του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος της επιχείρησης. Το αρκτικόλεξο SWOT προκύπτει από τις αγγλικές λέξεις: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (αντίστοιχα στα ελληνικά: δυνατά σημεία, αδύνατα σημεία, ευκαιρίες, απειλές). Στη συνέχεια παραθέτουμε την εφαρμογή της.

Πίνακας 1: Ανάλυση SWOT για το Daedalus Project.

<p><i>Δυνάμεις</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Καλή τεχνική κατάρτιση της ομάδας. • Πρόσβαση σε βιβλιογραφικό υλικό μέσω του Πολυτεχνείου Κρήτης για της ολοκλήρωση του R&D. • Χρήση των υποδομών του Πολυτεχνείου Κρήτης. • Καλύπτει το κενό σε υλοποιήσεις μικρού έως μεσαίου ύψους με μεγάλο χρόνο παραμονής στη περιοχή. 	<p><i>Αδυναμίες</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Έλλειψη βιομηχανικής εμπειρίας και πρόσβασης σε ειδικούς συμβούλους. • Δυσκολία άμεσης πρόσβασης σε εξειδικευμένους προμηθευτές.
<p><i>Ευκαιρίες</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Μια αγορά πλήρως ανοιχτή με τεράστιες προοπτικές ανάπτυξης. 	<p><i>Απειλές</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Υπάρχουν μεγάλες εταιρίες του χώρου με μεγάλη ρευστότητα και τεχνογνωσία, που όμως ασχολούνται με πολύ μεγαλύτερες και ακριβότερες υλοποιήσεις. • Απροσδιόριστο ακόμα νομικό πλαίσιο για επιχειρήσεις αυτόνομων εναέριων οχημάτων.

5.Πλάνο Λειτουργίας

5.1 Ανάπτυξη Πλατφόρμας

Μετά τη σύλληψη και το σχεδιασμό της ιδέας, ακολούθησαν τα παρακάτω επιτυχημένα βήματα:

- Ανάπτυξη τεχνικών σχεδίων – **Ολοκληρωμένο.**
- Ανάπτυξη ιστοσελίδας παρουσίασης – **Ολοκληρωμένο.**
- Δημιουργία προφίλ σε κοινωνικά δίκτυα – **Ολοκληρωμένο.**
- Ανάπτυξη συστήματος πτήσης (μηχανολογικά) – **Ολοκληρωμένο.**
- Ανάπτυξη τεχνικών σχεδίων – **Ολοκληρωμένο.**
- Ανάπτυξη συστήματος πλοήγησης (ασύρματης) 1ο στάδιο – **Ολοκληρωμένο.**
- Λογιστικά Συστήματα (ie: part numbers ID, CAD drawings) – **Ολοκληρωμένο.**
- Ανάπτυξη σχεδίου manufacturing outsource capability – **Ολοκληρωμένο.**
- Σχέδιο συναρμολόγησης – **Ολοκληρωμένο.**

Συνεχίζοντας την ανάπτυξη της πλατφόρμας, ακολουθούμε το παρακάτω χρονοδιάγραμμα βελτιστοποίησης της πλατφόρμας.

Πίνακας 2: Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης πλατφόρμας.

Χρονοδιάγραμμα	Οκτώβριος 2014	Νοέμβριος 2014	Δεκέμβριος 2014	Ιανουάριος 2015	Φεβρουάριος 2015	Μάρτιος 2015
Ανάπτυξη τεχνολογίας προϊόντος						
Πρώθηση Πλατφόρμας						
Υποστήριξη του Daedalus						

Το πρώτο τρίμηνο (10/2014 - 11/2014) θα ακολουθηθεί το παρακάτω πρόγραμμα ανάπτυξης του “Daedalus Project”, με τις ακόλουθες τακτικές:

1. Πρόγραμμα Ανάπτυξης Τεχνολογίας Προϊόντος:

1. Βελτίωση του λογισμικού του “Daedalus Project”.
2. Αναδιαμόρφωση του μηχανολογικού συστήματος.
3. Αναδιαμόρφωση συσκευασίας και τυποποίηση του προϊόντος για εισαγωγή στη διεθνή αγορά.
4. Τεχνική δοκιμή του τελικού προϊόντος.
5. Στελέχωση της ομάδας για την τεχνική υποστήριξη της πλατφόρμας.
6. Πατέντα πλατφόρμας.

Το χρονικό διάστημα μεταξύ 11/2014-3/2015 θα αναπτυχθούν τα προγράμματα προώθησης των πωλήσεων.

2. Πρόγραμμα για εμπορικά κανάλια

1. Εύρεση Σημείων πώλησης.
2. Εκδηλώσεις σε μαγαζιά.
3. Επίδειξη και έκθεση του προϊόντος.
4. Κατάλογος πωλήσεων.

3. Πρόγραμμα διαφήμισης

1. Προώθηση μέσω Digital Marketing.
2. Μέτρηση της αποδοτικότητας των υπάρχων διαφημίσεων.
3. Σχεδιασμός και οργάνωση διαφημιστικών εκστρατειών σε κάθε κομμάτι του Marketing.
4. Λίστες με διαφημιστικό και προωθητικό υλικό για τους αγοραστές και αυτούς που επηρεάζουν τις αγορές.
5. Συμμετοχή σε ειδικά γεγονότα πάνω στο τομέα του “Daedalus Project”.
6. Αποστολή δελτίων τύπου στα μέσα μαζικής ενημέρωσης, που αφορούν τα υπάρχοντα προϊόντα και την πορεία τους.

Πρέπει να τονισθεί, επίσης, ότι θα αναπτυχθεί πρόγραμμα υποστήριξης του “Daedalus Project”, το οποίο θα διαρκέσει για 3 μήνες (11/2014-1/2015) θα περιλαμβάνει τις ακόλουθες τακτικές:

4. Πρόγραμμα Υποστήριξης

1. Δημιουργία Εγγύησης.
2. Νομιμοποίηση τεχνολογίας και καινοτομίας.
3. Τελική Διαμόρφωση τιμολόγησης του προϊόντος .
4. Συμφωνία με ασφαλιστικό φορέα.
5. Χρηματοοικονομικές τακτικές (leasing, franchising, factoring).

5.2 Η Στρατηγική

Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να διευκρινιστεί ότι η στρατηγική του μάρκετινγκ απορρέει - σχετίζεται λειτουργικά με την τοποθέτηση του προϊόντος (positioning) στην αγορά στόχο (target market). Ο προσδιορισμός της αγοράς στόχου του “Daedalus Project” προέκυψε από την προηγηθείσα S.W.O.T. ανάλυση. Η τοποθέτηση προκύπτει από την ανάλυση ανταγωνισμού της αγοράς στόχου. Εννοείται ότι είναι η τοποθέτηση, η οποία καθοδηγεί σχεδόν απόλυτα το επικοινωνιακό-προωθητικό μίγμα της όποιας στρατηγικής και πάντως οπωσδήποτε υλοποιείται ορατά μέσω της διαφήμισης. Κατόπιν τούτων προσδιορίστηκε η παρακάτω δήλωση στρατηγικής.

Δήλωση Στρατηγικής

Αγορά - Στόχοι	<ul style="list-style-type: none"> • Εμπορική και στρατιωτική χρήση με έμφαση τα συστήματα ασφάλειας και αναζήτησης κοιτασμάτων
Τοποθέτηση	<ul style="list-style-type: none"> • Ελαφριά αυτόνομη πλατφόρμα που κινείται ανεξάρτητα των καιρικών συνθηκών για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε όλα τα ύψη
Γραμμή προϊόντων	<ul style="list-style-type: none"> • Πρόσθεση ενός νέου φθηνότερου μοντέλου και δύο νέων ακριβότερων μοντέλων του Daedalus.
Τιμολόγηση	<ul style="list-style-type: none"> • Μέση τιμή λίγο ανώτερη από τις τιμές αντίστοιχων προϊόντων (drones). Θα ανέβει το πολύ κατά 4%.
Διανομή	<ul style="list-style-type: none"> • Εύρεση νέων καναλιών και αντιπροσώπων. • Μη επέκταση στα πολυκαταστήματα. • Όχι αποθήκες
Service	<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορο και οικονομικό service.
Διαφήμιση	<ul style="list-style-type: none"> • Ανάπτυξη νέας στρατηγικής καμπάνιας για υποστήριξη της τοποθέτησης με έμφαση στα νέα μοντέλα. (Kickstarter Campaign, crowdfunding) • Αύξηση του διαφημιστικού κονδυλίου κατά 10%.
Προώθηση πωλήσεων	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση του κονδυλίου κατά 10%. • Δημιουργία οπτικοακουστικής έκθεσης του Daedalus project με πετυχημένες πτήσεις στην ιστοσελίδα μας. • Συμμετοχή στις κλαδικές εκθέσεις, παρουσιάσεις και διαγωνισμούς.
Έρευνα	<ul style="list-style-type: none"> • Θεσμοθέτηση κονδυλίου 3% επί των Πωλήσεων, στοχεύοντας στην δημιουργία νέων προϊόντων με καινοτόμα χαρακτηριστικά και τεχνολογία αιχμής
Προώθηση Μάρκετινγκ	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση του κονδυλίου κατά 10% για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας αγοραστικής απόφασης των καταναλωτών • Προώθηση μέσω Digital Marketing (Social Media, Forum Posting, PR, SEO, wiki).

5.3 Διευθυντική ομάδα

5.3.1 Τα στελέχη

Η Daedalus I.K.E στελεχώνεται από τον κ. Μανδουραράκη Ιωάννη (MSc Μηχανικός H/Y) ως υπεύθυνο της ομάδας και για την μηχανολογική κατασκευή του “Daedalus Project”. Τους κ.κ. Αδρεόπουλο Μάριο (Μηχανικό H/Y) και Ιγγλεζάκη Αντώνιο (MSc Μηχανικός H/Y) υπεύθυνους για το Software Development των συστημάτων του δαίδαλου. Την εμπορική ανάπτυξη έχει αναλάβει ο κ. Παράσχος Αθανάσιος (Μηχανικός Ορυκτών Πόρων).

5.3.2 Δυνατά σημεία της ομάδας εξέλιξης

Η ομάδα της “Daedalus I.K.E.” απαρτίζεται από νέους ανθρώπους με καλό υπόβαθρο σπουδών και τεχνικών γνώσεων. Έχοντας πρόσβαση τόσο σε ακαδημαϊκές πηγές, όπως βιβλιογραφία, όσο και πανεπιστημιακούς καθηγητές για το state-of-the-art σε τεχνικά ζητήματα που αφορούν την κατασκευαστική εξέλιξη της κατασκευής καθώς και την ολοκλήρωση των ηλεκτρονικών συστημάτων και του προγράμματος οδήγησης του δαίδαλου, καθώς και εργαστηριακή υποδομή που παρέχεται από το Πολυτεχνείο Κρήτης, έχει τη δυνατότητα γρήγορης προτυποποίησης και δοκιμών αντίστοιχη με αυτή μεγάλων εταιριών. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει την γρήγορη εξέλιξη της πλατφόρμας και την βελτιστοποίησή της για τις αποστολές που θα κληθεί να καλύψει.

5.3.3 Αδύναμα σημεία της ομάδας εξέλιξης

Στις αδυναμίες της ομάδας θα πρέπει να θεωρηθούν η έλλειψη βιομηχανικής εμπειρίας σε αντίστοιχες ιδιωτικές εταιρίες. Αυτό σημαίνει ότι η ομάδα έχει μια απόσταση από πρακτικές και ιδιαιτερότητες της ιδιωτικής αγοράς. Αυτό περιλαμβάνει τόσο ενδεχόμενες εξειδικευμένες λύσεις σε παρόμοια προβλήματα εξέλιξης με αυτά που αντιμετωπίζουμε εμείς καθώς και πρόσβαση σε εξειδικευμένους ή ειδικούς προμηθευτές υλικών. Επιπλέον συχνά εξειδικευμένες υλοποιήσεις, όπως οι διαμορφώσεις για στρατιωτική χρήση χρηματοδοτούνται εκ των προτέρων από αντίστοιχες υπηρεσίες του εξωτερικού δίνοντας ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε ομάδες που δραστηριοποιούνται σε αυτές τις αγορές-χώρες.

5.4 Συνεργάτες

Την παρούσα στιγμή, την ομάδα της Deadalus I.K.E. συμπληρώνουν ως εσωτερικοί συνεργάτες ο νομικός σύμβουλος, με εξειδίκευση σε θέματα εναέριων μεταφορών, καθώς και ο λογιστής της. Επιπροσθέτως, η ομάδα του Deadalus I.K.E. έχει αναπτύξει εξωτερικές συνεργασίες με τους κύριους προμηθευτές της. Συγκεκριμένα, συνεργάζεται με εμπόρους από τους οποίους θα προμηθεύεται τις φιάλες ηλίου (He), τα γρανάζια (servocity), τα ηλεκτρολογικά (diamond models, rc chania, hobby shop, iprovidenow), τα ηλεκτρονικά μέρη της πλατφόρμας (ucanDrone Cart) και το μπαλόνι (iprovidenow, arizonaballon, southernballoon works, flyballons, zepellin Hellas).

Στα άμεσα σχέδια είναι η αναζήτηση ενός εξειδικευμένου εξωτερικού συνεργάτη για την ισχυροποίηση της ομάδας εξέλιξης. Ο συνεργάτης αυτός μπορεί να είναι είτε κάποιος εξειδικευμένος μηχανικός με την απαραίτητη εργασιακή εμπειρία σε αντίστοιχες εταιρίες του ιδιωτικού τομέα (μηχανολογικής-αεροναυπηγικής εξέλιξης ή στη εξέλιξη λειτουργικών συστημάτων) είτε κάποια υπάρχουσα εξειδικευμένη εταιρεία που δραστηριοποιείται στο χώρο στο χώρο της βιομηχανικής παραγωγής, ώστε να είναι εφικτή η υλοποίηση του προϊόντος σε παραγωγή μεγάλης κλίμακας.

5.5 Νομικό πλαίσιο

Σύμφωνα με το διεθνές νομικό πλαίσιο, το Daedalus Project είναι μη επανδρωμένο αεροναυτικό όχημα (UAV –Unmanned Aeronautical Vehicle), δηλαδή είναι μία ιπτάμενη συσκευή που δεν μεταφέρει άνθρωπο, και το οποίο έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται για επιστημονικούς, ερευνητικούς ή στρατιωτικούς σκοπούς. Επίσης, όσον αφορά την ελληνική νομοθεσία, το Daedalus Project ανήκει στην κατηγορία Β των αερομοντέλων, διότι έχει συνολική μάζα απογείωσης μεγαλύτερη των 7.000 γραμμαρίων (7kg) και μικρότερη 25.000 γραμμαρίων (25kg).

Το Daedalus Project ακολουθεί τις παρακάτω προδιαγραφές που ορίζονται από την Ελληνική (σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές οδηγίες) και Αμερικανική Νομοθεσία (USA), συγκεκριμένα παραθέτονται ανά χώρα:

Για την ελληνική νομοθεσία:

- Η μέγιστη επιφάνεια όλων των πτερύγων ορίζεται στις 500 τετραγωνικές παλάμες.
- Ο μέγιστος πτερυγικός φόρτος ορίζεται στα 250 γραμμάρια ανά τετραγωνική παλάμη.
- Ο μέγιστος συνολικός κυβισμός εμβολοφόρων κινητήρων ορίζεται στα 250 κυβικά εκατοστά.
- Η μέγιστη τάση ηλεκτρικής πηγής εν ηρεμία ορίζεται στα 72V (Βόλτς).
- Η μέγιστη συνολική ώση κινητήρων αντίδρασης (τουρμπίνα) ορίζεται σε 250 Newton (25kg).
- Δεν επιτρέπεται σε αερομοντέλο η χρήση μεταλλικής έλικας ή μεταλλικού ρότορα.

Ο χειριστής του Daedalus Project οφείλει να έχει άμεσο τρόπο διακοπής της λειτουργίας του κινητήρα ή των κινητήρων του. Το σύστημα πρέπει να έχει την δυνατότητα να ενεργοποιείται άμεσα σε κάθε περίπτωση ανάγκης, αυτόματα ή μετά από ενέργεια του χειριστή. Έχουμε ήδη μεριμνήσει, ώστε κάθε πρόσθετη συσκευή που φέρει το μοντέλο να είναι σταθερά προσαρτημένη με τρόπο που να μην μπορεί να μετακινηθεί ή να αποσπασθεί από το μοντέλο. Πρέπει να τονίσουμε ότι το μπαλόνι του Daedalus Project αποτελείται μόνον με ήλιο και φέρει μόνο ηλεκτρικούς κινητήρες. Τέλος, όλες οι μέχρι τώρα πτήσεις του Daedalus Project δεν έχουν γίνει παρουσία θεατών, διότι δεν έχει δοκιμασθεί επαρκώς και κριθεί ασφαλές, από τον χειριστή και τον ιδιοκτήτη του.

Η ομάδα του Daedalus έχει την πλήρη ευθύνη για:

- την εκμετάλλευση του και σωστή συντήρηση του υλικού,
- το σύστημα τηλεχειρισμού, τηλεκατευθυνόμενου αερομοντέλου, το οποίο θα πρέπει:
 - να είναι σύμφωνο με τις τεχνικές προδιαγραφές που έχουν καθοριστεί από την αρμόδια αρχή του κράτους,
 - να εκπέμπει σε μία ή περισσότερες ραδιοσυχνότητες από αυτές που έχουν εκχωρηθεί για τον σκοπό αυτό, από τις αρμόδιες αρχές του κράτους.

Ο χειριστής του Daedalus έχει την πλήρη ευθύνη για:

- να λάβει την απαραίτητη εκπαίδευση στον χειρισμό του συγκεκριμένου σε κάθε περίπτωση αερομοντέλου,
- για τον τρόπο και την εξέλιξη της πτήσης,

- να διατηρεί οπτική επαφή με το αερομοντέλο σε όλη της διάρκεια της πτήσης και να βασίζεται σ αυτή,
- για τους απαραίτητους χειρισμούς ελέγχου του,
- να διακόπτει άμεσα τις πτήσεις, όταν οι συνθήκες γίνουν ακατάλληλες για την ασφαλή πτήση του συγκεκριμένου αερομοντέλου.

Ο χειριστής του Daedalus Project δεν επιτρέπεται να ενεργεί υπό την επήρεια:

- αλκοόλ,
- ναρκωτικών ουσιών,
- φαρμακευτικών ουσιών,
- άλλων ουσιών.

που μπορούν να αλλοιώσουν την κρίση και αντίδρασή του.

Οι πτήσεις του Daedalus Project είναι περιορισμένες στον εναέριο χώρο που προσφέρεται για τον σκοπό αυτό και σε απόσταση ασφαλείας 50 μέτρων από ανθρώπους συμπεριλαμβανομένων των θεατών της ίδιας της πτήσης, ζώα, οχήματα, εγκαταστάσεις κλπ., εξαιρουμένων του χειριστή, της ομάδας του Daedalus, των κριτών ή χρονομετρών και οχημάτων ή άλλων βοηθητικών συσκευών, που εξυπηρετούν την πτήση.

Οι απογειώσεις και προσγειώσεις θα εκτελούνται σε χώρους ελεύθερους εμποδίων. Ο εναέριος χώρος πτήσεων πρέπει να περιορίζεται σε τέτοια απόσταση, ώστε να μη δημιουργεί ηχορύπανση σε χώρους όπου η ησυχία είναι απαραίτητη (υπαίθριες συναθροίσεις ατόμων, νοσοκομεία, σχολεία, εκκλησίες κλπ).

Ο Daedalus Project δεν επιτρέπεται να πετάξει χωρίς άδεια από την αρμόδια αρχή:

- σε απαγορευμένες, περιορισμένες, επικίνδυνες και δεσμευμένες περιοχές όπως αυτές αναφέρονται στις πάσης φύσεως αεροναυτικές εκδόσεις της ΥΠΑ,
- σε ύψος μεγαλύτερο των 400 ποδών από την επιφάνεια του εδάφους,
- σε απόσταση μικρότερη των 3 χιλιομέτρων από ελεγχόμενο αεροδρόμιο,
- εντός πολιτικών ή στρατιωτικών αεροδρομίων,
- άνωθεν, πλησίον ή εντός στρατιωτικών εγκαταστάσεων,
- άνωθεν η πλησίον κατοικημένων περιοχών,
- άνωθεν η πλησίον εγκαταστάσεων κοινής ωφέλειας,
- άνωθεν η πλησίον αρχαιολογικών χώρων.

Όλες οι πτήσεις του Daedalus Project πρέπει να είναι ασφαλισμένες για υλικές ζημιές και σωματικές βλάβες προς τρίτους.

Για την νομοθεσία των Η.Π.Α.:

Αν το Daedalus Project χρησιμοποιείται για χόμπι ή για ψυχαγωγικό πέταγμα δεν απαιτεί την έγκριση της FAA (Federal Aviation Administration) αλλά πρέπει να ακολουθεί τις γενικές οδηγίες ασφαλείας. Οποιαδήποτε άλλη χρήση του απαιτεί την έγκριση της FAA .

Οι γενικές οδηγίες ασφάλειας αναφέρονται :

- Να πετάζει ένα πρότυπο του Daedalus Project στην τοπική πρότυπη λέσχη αεροσκαφών.
- Ο χειριστής του Daedalus Project πρέπει να εκπαιδευτεί και να μάθει να πετάει ακίνδυνα.
- Το Daedalus Project οφείλει να έρχεται σε επαφή με τον αερολιμένα ή το πύργο ελέγχου κατά το πέταγμα μέσα σε 5μίλια από τον αερολιμένα.
- Το Daedalus Project δεν επιτρέπεται να πετάζει κοντά σε επανδρωμένα αεροσκάφη.
- Το Daedalus Project Project δεν επιτρέπεται να πετάζει πέρα από τη γραμμή θέασης του χειριστή.
- Το Daedalus Project δεν επιτρέπεται να ζυγίζει περισσότερες από 55 λίβρες εκτός αν έχει πιστοποιηθεί από την FAA.
- Το Daedalus Project δεν επιτρέπεται να πετάζει αντίθετα από τις οδηγίες ασφάλειάς του εκάστοτε κανονισμού.
- Το Daedalus δεν επιτρέπεται να κάνει εμπορική χρήση των πρότυπων αεροσκαφών.

Τέλος, οι υπόλοιπες περιοχές του πλανήτη δεν έχουν αναπτύξει επαρκώς νομοθεσία για μη επανδρωμένα συστήματα αεροσκαφών αυτής της κλίμακας.

6.Σχέδιο χρηματοοικονομικών – Κίνδυνοι

6.1 Τιμολόγηση (pricing)

Λαμβάνοντας υπόψη κάποιες βασικές υλοποιήσεις άλλων κατασκευαστών όπως η AeroVironment, η οποία τιμολογεί ένα drone της που ζυγίζει περίπου 2,5 κιλά, και χρησιμοποιείται για να δείχνει μια γρήγορη επίβλεψη του χώρου από αέρα για την περίπτωση επικίνδυνων καταστάσεων, με στόχο την αγορά από τις αστυνομικές υπηρεσίες στα 60.000 δολάρια. Έτσι, έχουμε μια τάξη μεγέθους του επιπέδου χρέωσης για υπηρεσίες επίβλεψης.

Αν και στη συγκεκριμένη περίπτωση η τιμή ανταποκρίνεται ως ένα βαθμό και στην φορητότητα της κατασκευής, το “Daedalus Project”, λόγω της σταθερής παρουσίας και των δυνατοτήτων που φέρει, στη βασική του διαμόρφωση η τιμή του θα είναι στα 90.000 δολάρια.

6.2 Χρηματοοικονομικές προβλέψεις τριετίας

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην χρηματοοικονομική αποδοτικότητα του εγχειρήματος. Συγκεκριμένα, τονίζεται η ικανότητα τις ιδέας να παράγει πρόσθετους οικονομικούς πόρους (έσοδα) σε σύγκριση με τους πόρους που επενδύονται, ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο το έργο πρόκειται να χρηματοδοτηθεί.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της χρηματοοικονομικής ανάλυσης είναι :

1. Πίνακας υπολογισμού των βασικών χρηματοοικονομικών στοιχείων ανά έτος.
2. Περιγραφή οικονομικών αποτελεσμάτων και προβλέψεων ανά έτος.

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται το χρηματοοικονομικό μοντέλο σύμφωνα με το οποίο θα ξεκινήσει το Daedalus project.

Πίνακας 3: Βασική Χρηματοοικονομική Ανάλυση.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΧΡΗΜΑΤΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ (\$)	1ο Έτος	2ο Έτος	3ο Έτος
Πάγια Κόστη (Ενοίκια, Αναλώσιμα, Λειτουργικά έξοδα, Έξοδα συντήρησης)	10000	20000	30000
Μισθοί προσωπικού	60000	75000	95000
Κόστος υποδομών εφαρμογής (hardware/software)	15000	30000	30000
Μάρκετινγκ	15000	25000	25000
Δαπάνες προς τρίτους κ λοιπά έξοδα	10000	25000	35000
Σύνολο εξόδων	110000	180000	205000
Άμεσες Πωλήσεις	0	180000	180000
Έσοδα από Υπηρεσίες Υποστήριξης	0	0	20000
Έσοδα από ενοικίαση πλατφόρμας	10000	30000	60000
Άλλο (Διαγωνισμοί - Δωρεές)	3000	15000	0
Σύνολο εσόδων	13000	225000	260000
Ισοζύγιο	-97000	+45000	+55000

Οι χρηματοοικονομικές προβλέψεις αναφέρονται στα :

1. Έξοδα, τα οποία προκύπτουν από:

1. Πάγια Κόστη, δηλαδή τα σταθερά έξοδα της Daedalus I.K.E για ολόκληρο τον πρώτο χρόνο, τα οποία διακρίνονται:

1. Ενοίκια, δηλαδή την μίσθωση του χώρου στέγασης.
2. Αναλώσιμα.
3. Λειτουργικά έξοδα, τα οποία είναι τα έξοδα που οφείλονται σε συνήθεις δραστηριότητες της επιχείρησης. (κόστος πωληθέντων, έξοδα μεταφοράς εμπορευμάτων, αποσβέσεις, χρεωστικοί τόκοι).
4. Έξοδα συντήρησης.

2. Μισθοί προσωπικού.
 3. Κόστος υποδομών εφαρμογής (hardware/software).
 4. Marketing.
 5. Δαπάνες προς τρίτους και λοιπά έξοδα.
2. Έσοδα, τα οποία αφορούν την κάθε αύξηση που παρουσιάζουν τα οικονομικά οφέλη της επιχείρησης και διακρίνονται:
1. Άμεσες πωλήσεις του προϊόντος.
 2. Έσοδα από υπηρεσίες υποστήριξης.
 3. Έσοδα από ενοικίαση της πλατφόρμας.
 4. Άλλο (Διαγωνισμοί - Δωρεές).
3. Ισοζύγιο, όπου εμφανίζεται επί συγκεκριμένου χρόνου η συνοπτική κατάσταση σε χρηματικές μονάδες όλων των λογαριασμών της επιχείρησης

Όλα τα μεγέθη (κόστος, έσοδα, έξοδα από τη λειτουργία του) υπολογίζονται σε σταθερές τιμές και βασισμένα στην παρούσα αγορά. Ο πρώτος χρόνος της εταιρείας αναφέρεται στην περίοδο ανάπτυξης και ίδρυσης της Daedalus I.K.E, καθώς και στην τελειοποίηση του προϊόντος. Τα έξοδα της εταιρείας προβλέπονται να ξεπερνούν κατά πολύ τα έσοδα. Σύμφωνα με το ισοζύγιο, το πρώτο έτος χαρακτηρίζεται από ζημία, η οποία συνηθίζεται σε επιχειρήσεις εφαρμογής καινοτόμων επιχειρηματικών σχεδίων και εμπορικής εκμετάλλευσης γνώσεων που παράγονται σε ερευνητικά εργαστήρια.

Στο πρώτο έτος λειτουργίας της επιχείρησης, τα έσοδα οφείλονται στην ενοικίαση της πλατφόρμας και στα κέρδη από την συμμετοχή της ομάδας σε διάφορους διαγωνισμούς. Όσον αφορά τα έξοδα, προκύπτουν από την αρχική επένδυση για την εδραίωση της εταιρείας.

Το δεύτερο έτος της εταιρείας αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο χρόνο λειτουργίας της εταιρείας. Τα έσοδα της εταιρείας οφείλονται πλέον στην άμεση πώληση της πλατφόρμας, μετά την ολοκλήρωση της εξέλιξης που με μια τιμή βάσης γύρω στις 90.000\$ ανά μονάδα αλλά επίσης έσοδα από ενοικίαση της πλατφόρμας με κόστος 10000\$/ανά 7 ημέρες και από φορείς χρηματοδότησης. Αντίθετα, τα έξοδα θα αυξηθούν λόγω της έναρξης της παραγωγής και της εμπορίας. Ωστόσο, το δεύτερο έτος αποτελεί επίσης, τον πρώτο χρόνο υγιούς λειτουργίας της επιχείρησης, καθώς πλέον παρατηρείται κέρδος και όχι ζημία, με αποτέλεσμα να αποτελεί την πρώτη νίκη της ομάδας και κατ επέκταση της εταιρείας.

Στο τρίτο έτος, η εταιρεία, αρχίζει και λειτουργεί πλέον όλες τις παρεχόμενες υπηρεσίες που μπορεί να υποστηρίξει το προϊόν. Συνοπτικά, τα έσοδα της επιχείρησης χαρακτηρίζονται για πρώτη φορά από υπηρεσίες υποστήριξης, καθώς και από άμεσες πωλήσεις και ενοικίαση της πλατφόρμας, ενώ παύει να υπάρχει πλέον χρηματική υποστήριξη από δωρεές και διαγωνισμούς.

Συμφώνα με τις χρηματοοικονομικές προβλέψεις της τριετίας προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο προϊόν, η Daedalus I.K.E θα αρχίσει να είναι κερδοφόρα από το δεύτερο κιόλας έτος, ενώ το break-even θα γίνει κατά τον τρίτο χρόνο λειτουργίας.

6.3 Προϋπολογισμός για την αναζήτηση 1ου γύρου χρηματοδότησης (seed-funding)

Για την ολοκλήρωση του προγράμματος εξέλιξης του Daedalus Project” και την έκδοση του τελικού προϊόντος υπολογίζουμε τα ποσά, που θα απαιτηθούν μέχρι να φτάσει η πλατφόρμα σε πλήρη λειτουργικότητα με τα αυτόνομα χαρακτηριστικά, που έχουμε περιγράψει.

Συγκεκριμένα:

1. Κόστος Εξέλιξης Ηλεκτρονικών (3μήνες*3άτομα* 8ώρες) = 15.000 \$
2. Κόστος Αναλωσίμων για την εξέλιξη = 10.000 \$
3. Κόστος ενεργειών μάρκετινγκ (online campaigns) = 5.000 \$
4. Κόστος εκθέσεων events roadshow etc (για τη συμμετοχή 3 ατόμων) = 10.000 \$
5. Άδειες / Νομική Υποστήριξη = 10.000 \$
6. Συνολικό Κόστος : 50000 \$

B' Μέρος : Η γεωφυσική μέθοδος πλήρους τανυστή βαθμίδας της έντασης του πεδίου της βαρύτητας της Γης και εφαρμογές.

7.Εισαγωγή Β' Μέρους

Σκοπός του Β' Μέρους είναι η ανάπτυξη της γεωφυσικής μεθόδου πλήρους τανυστή της βαθμίδας της έντασης του πεδίου της βαρύτητας της Γης. Πριν, από την παρουσίαση των αναπτυγμένων μεθόδων για την ερμηνεία της GGT και PGGT δεδομένων, παρέχεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο στα Κεφάλαια 8, όπου και εξηγείται η θεωρητική βάση της διατριβής. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 9 περιγράφονται τα εμπορικά διαθέσιμα αερομεταφερόμενα μέσα μέτρησης τόσο της βαρύτητας όσο και των διαβαθμίσεων της, καθώς και τους διαφορετικούς τύπους των βαρυτόμετρων για μετρήσεις αερομεταφερόμενων οργάνων. Επίσης, οι τεχνικές εκτίμησης που υιοθετούνται ευρέως για ερμηνεία βαρυτικών δεδομένων αναφέρονται επιγραμματικά στο Κεφάλαιο 9. Στο Κεφάλαιο 10, παραθέτονται γενικές πληροφορίες σχετικές με το Air-FTG® σύστημα, τον τρόπο απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων και το επιχειρησιακό σχέδιο πτήσης. Τέλος, στο Κεφάλαιο 11, αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική διατριβή.

7.1 Το κίνητρο

Οι μελέτες γύρω από τη βαρύτητα της Γης αποτελούν τα πρώτα παραδείγματα των σύγχρονων εφαρμογών της κλασικής νευτώνειας φυσικής. Το βαρυτικό πεδίο συνήθως μετράται στην μεταλλευτική έρευνα, στην εξερεύνηση υδρογονανθράκων, στη μελέτη του φλοιού της Γης, στη περιβαλλοντική μηχανική και στην εξερεύνηση των γεωθερμικών πόρων.

Προκειμένου να μελετήσουμε τη βαρύτητα, χρησιμοποιούμε όργανα μέτρησης, τα οποία κινούνται στη θάλασσα, το έδαφος, αερομεταφερόμενα όργανα μέτρησης και δορυφορικά συστήματα μέτρησης. Μεταξύ αυτών, τα αερομεταφερόμενα όργανα μέτρησης είναι ο δημοφιλέστερος τύπος έρευνας λόγω της οικονομικής αποδοτικότητας τους και της γρήγορης κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών.

Η πρόοδος της τεχνολογίας των οργάνων μέτρησης και η ανάπτυξη των συστημάτων πλοήγησης συντέλεσαν στην πρώτη επιτυχημένη μέτρηση της βαρύτητας από τον αέρα στις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Beiki M., 2011). Βέβαια, πρέπει να τονίσουμε ότι η βαρυτική κλισιμετρία είναι ευαίσθητη στις απότομες ανωμαλίες του μήκους κύματος. Τα τελευταία είκοσι χρόνια, τα όργανα μέτρησης της βαρύτητας τόσο από τον αέρα όσο και από τη θάλασσα αναπτύσσονται με στόχο να πραγματοποιούν καθημερινές μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια σύνταξης της συγκεκριμένης διατριβής, τα αερομεταφερόμενα όργανα μέτρησης της βαρύτητας είναι υπό συνεχή ανάπτυξη. Εντούτοις, αναμένεται ότι στο κοντινό

μέλλον, αερομεταφερόμενα όργανα μέτρησης της βαρύτητας, θα είναι όλο και περισσότερο διαθέσιμα στο εμπόριο.

Επίσης, τα στοιχεία του τανυστή των κλίσεων της βαρύτητας περιέχουν τις παράγωγους πρώτης τάξης των διανυσμάτων της βαρύτητας στις τρεις ορθογώνιες κατευθύνσεις. Οι μαθηματικές ιδιότητες των τανυστών της βαρύτητας καθιστούν αναγκαία τη χρήση νέων τεχνικών επεξεργασίας και ερμηνείας. Τα τελευταία χρόνια, αρκετές νέες τεχνικές για την ερμηνεία των στοιχείων της GGT έχουν εισαχθεί στη βιβλιογραφία (Beiki M., 2011). Ωστόσο, τόσο η επεξεργασία, όσο και η ερμηνεία των δεδομένων GGT αποτελούν ακόμα πρόκληση και απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη.

Συντμήσεις

2D	Two-dimensional
3D	Three-dimensional
AGG	Airborne Gravity Gradiometry
AIRGrav	Airborne Inertially Referenced Gravimeter
DGPS	Differential GPS
GGT	Gravity Gradient Tensor
FTG	Full Tensor Gradiometer
PDF	Planar Deformation Features
PGGT	Pseudo-Gravity Gradient Tensor
SINS	Strapdown INS
UAV	Unmanned Airborne Vehicle

8.Θεωρητικές γνώσεις

8.1 Μαθηματικά

8.1.1 Θεώρημα (του) Gauss

Ας υποθέσουμε, ότι το διανυσματικό πεδίο $w(x)$ είναι κλάσης C^m στο ανοιχτό υποσύνολο U του \mathbb{R}^3 και πως το ολοκλήρωμα Ω του ανοιχτού υποσύνολου Ω περιέχεται στο U . Τότε, λέμε ότι το $w \in C^m(\overline{\Omega})$. Πιο συγκεκριμένα, ας υποθέσουμε ότι το $w \in C^1(\overline{\Omega})$ και πως το Ω αποτελεί μια φραγμένη κανονική περιοχή. Τότε ισχύει το κλασικό θεώρημα (του) Gauss ή της απόκλισης, δηλαδή η ταυτότητα:

$$\int_{\Omega} \operatorname{div} w \, dV = \int_{\partial\Omega} w * v \, dS \quad (8.1)$$

Ωστόσο, είναι πολύ εύκολο να αποδείξει κανείς ότι η παραπάνω σχέση είναι ταυτόσημη με την:

$$\int_{\Omega} \nabla * w \, dV = \int_{\partial\Omega} w * v \, dS \quad (8.2)$$

δεν ισχύει μόνο στον \mathbb{R}^3 , αλλά σε κάθε \mathbb{R}^n , με $n \geq 2$. Απλώς, στη γενική περίπτωση το αριστερό μέλος της (8.1) συμβολίζει ένα n -πλό ολοκλήρωμα Riemann, ενώ το δεξί συμβολίζει ένα υπερεπιφανειακό ολοκλήρωμα. Το τελευταίο, είναι ένα $(n-1)$ -πλό ολοκλήρωμα που ορίζεται με τρόπο ακριβώς ανάλογο προς εκείνον που οδηγεί στα διπλά επιφανειακά ολοκληρώματα της συνήθους ανάλυσης στον \mathbb{R}^3 .

Σε κάθε περίπτωση, εκείνο που αξίζει να σημειώσουμε είναι ότι, το θεώρημα της απόκλισης συνδέει τη συμπεριφορά ενός διανυσματικού πεδίου στο εσωτερικό μιας φραγμένης περιοχής Ω του \mathbb{R}^n με τις τιμές του ίδιου πεδίου στην (υπό)επιφάνεια $\partial\Omega$, η οποία αποτελεί το σύνορο της περιοχής Ω . (Τσούμπελης Δ., 2010)

8.1.2 Οι ταυτότητες του Green

Ας υποθέσουμε τώρα ότι το διανυσματικό πεδίο w ορίζεται μέσω των δύο βαθμωτών u και φ ως εξής:

$$w = u\nabla\varphi, u \in C^1(\Omega), \varphi \in C^2(\Omega) \quad (8.3)$$

Τότε το πεδίο $w \in C^1(\overline{\Omega})$ και η αντικατάστασή του στον τύπο (8.2) του θεωρήματος Gauss δίνει:

$$\int_{\Omega} \nabla * (u\nabla\varphi) \, dV = \int_{\partial\Omega} (u\nabla\varphi) * v \, dS \quad (8.4)$$

Όμως, ένας απλός υπολογισμός δείχνει ότι

$$\nabla * (u\nabla\varphi) = \nabla u * \nabla\varphi + u\nabla * (\nabla\varphi) = \nabla u * \nabla\varphi + u\Delta\varphi \quad (8.5)$$

Αν λοιπόν αντικαταστήσουμε αυτό το αποτέλεσμα στο αριστερό μέλος της (8.5) και στο δεξί της θέσουμε:

$$v * \nabla\varphi = \partial_v\varphi$$

θα καταλήξουμε στη σχέση

$$\int_{\Omega} (u * \Delta \varphi + \nabla u * \nabla \varphi) dv = \int_{\partial \Omega} u \partial_n \varphi dS \quad (8.6)$$

Αυτή ονομάζεται πρώτη ταυτότητα (του) Green.

Αν ξαναγράψουμε την (8.6) θέτοντας $(u, \varphi) \rightarrow (\varphi, u)$ και αφαιρέσουμε το αποτέλεσμα από την αρχική έκφραση, θα καταλήξουμε στην

$$\int_{\Omega} (u \Delta \varphi - \varphi \Delta u) dV = \int_{\partial \Omega} (u \partial_n \varphi - \varphi \partial_n u) dS \quad (8.7)$$

Αυτή είναι η δεύτερη ταυτότητα (του) Green.

Τέλος, ως τρίτη ταυτότητα (του) Green συχνά αναφέρεται η σχέση

$$\int_{\Omega} \Delta \varphi dV = \int_{\partial \Omega} \partial_n \varphi dS \quad (8.8)$$

που προκύπτει θέτοντας $u = 1$ στην (8.6).

8.1.3 Άμεσες συνέπειες των ταυτοτήτων Green

α) Αναγκαία συνθήκη για το πρόβλημα Neumann για την εξίσωση Laplace

Κάθε συνάρτηση κλάσης $C^2(\Omega)$ που είναι ταυτόχρονα και λύση της εξίσωσης Laplace καλείται αρμονική στην περιοχή Ω . Από την τρίτη ταυτότητα Green αμέσως έπεται ότι,

Οι συνοριακές τιμές μιας συνάρτησης $\varphi \in C^2(\Omega)$ που είναι αρμονική στην φραγμένη περιοχή Ω οφείλουν να τηρούν την ολική συνθήκη

$$\int_{\partial \Omega} \partial_n \varphi dS = 0 \quad (8.9)$$

β) Μοναδικότητα της λύσης των τριών θεμελιακών ΠΣΤ για την εξίσωση Poisson

Θεώρημα 1

Υποθέτουμε ότι η Ω είναι μια φραγμένη, κανονική περιοχή με σύνορο κλάσης C^2 . Αν οι συναρτήσεις h, f είναι συνεχείς και η γ συνεχής και μη αρνητική (όχι όμως ταυτοτικά μηδενική), τότε, το πρόβλημα Dirichlet

$$\Delta u = h(x), x \in \Omega, u = f(x), x \in \partial \Omega$$

καθώς και το πρόβλημα Robin,

$$\Delta u = h(x), x \in \Omega, \partial_n u + \gamma(x)u = f(x), x \in \partial \Omega$$

επιδέχονται μία το πολύ λύση κλάσης $C^2(\Omega) \cap C^1(\Omega)$.

Θεώρημα 2

Αν η Ω είναι μια φραγμένη, κανονική περιοχή και το πρόβλημα Neumann

$$\Delta u = h(x), x \in \Omega, \partial_n u = f(x), x \in \partial \Omega$$

επιδέχεται δύο λύσεις κλάσης $C^2(\Omega) \cap C^1(\Omega)$, αυτές θα διαφέρουν το πολύ κατά μία σταθερή

ποσότητα. Σε κάθε περίπτωση, αυτό το πρόβλημα αποκλείεται να έχει ακόμα και μία λύση αυτού του είδους, αν οι (δοσμένες) συναρτήσεις $h(x)$, $x \in \Omega$ και $f(x)$ $x \in \partial\Omega$ δεν πληρούν τη συνθήκη

$$\int_{\Omega} h(x) dV = \int_{\partial\Omega} f(x) dS \quad (8.10)$$

8.1.4 Το θεώρημα της ολοκληρωτικής αναπαράστασης αρμονικών συναρτήσεων

Από τις ταυτότητες του οδηγούμαστε αμέσως στο εξής σημαντικό αποτέλεσμα:

Θεώρημα 3

Ας υποθέσουμε ότι η $\varphi \in C^2(\Omega)$, όπου Ω μια κανονική περιοχή του \mathbb{R}^n και $u(x, \xi)$ κάποια από τις θεμελιακές λύσεις της εξίσωσης Laplace. Δηλαδή,

$$u(x, \xi) = \begin{cases} C \ln|x - \xi| + \tilde{C}, & n = 2 \quad (8.11\alpha) \\ \frac{C}{n-2} |x - \xi|^2 + \tilde{C}, & n > 2 \quad (8.11\beta) \end{cases}$$

όπου C, \tilde{C} τυχαίες σταθερές.

Τότε, σε οποιοδήποτε σημείο ξ σε Ω ισχύει η σχέση

$$\int_{\Omega} u(x, \xi) \Delta \varphi(x) dV = C \omega_n \varphi(\xi) + \int_{\partial\Omega} [u(x, \xi) \partial_n \varphi(x) - \varphi(x) \partial_n u(x, \xi)] dS \quad (8.12)$$

Όπου

$$\omega_n = \frac{2\pi^{n/2}}{\Gamma(n/2)} \quad (8.13)$$

Σημείωση. Η σταθερή ω_n εκφράζει το (υπερ-)εμβαδό της σφαιρικής (υπερ-)επιφάνειας του \mathbb{R}^n , την οποία θα συμβολίζουμε με S_1^{n-1} . Στον τύπο για την ω_n , το $\Gamma(z)$ συμβολίζει τη **συνάρτηση γάμμα του Euler**

$$\Gamma(z) := \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt \quad (8.14)$$

Επισημαίνουμε ότι, από τον ορισμό της συνάρτησης γάμμα αμέσως συνάγεται ότι

$$\Gamma(z+1) = z\Gamma(z) \quad (15)$$

Επιπλέον, δύο αξιοσημείωτες τιμές αυτής της συνάρτησης είναι οι

$$\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}, \quad \Gamma(1) = 1$$

Θεώρημα (Θεώρημα της αναπαράστασης αρμονικών συναρτήσεων)

Αν η $\varphi(x) \in C^2(\Omega)$ είναι αρμονική στην περιοχή Ω , τότε μπορεί να γραφτεί στη μορφή

$$\varphi(x) = \frac{1}{C \omega_n} \int_{\partial\Omega} [\varphi(\xi) \partial_n u(\xi, x) - u(\xi, x) \partial_n \varphi(\xi)] dS_{\xi}, \quad x \in \Omega \quad (8.16)$$

όπου $u(x, \xi)$ σφαιρικά συμμετρική λύση με πόλο στο σημείο ξ .

Ορισμός

Ας υποθέσουμε ότι η $B_r(x)$ είναι μια σφαίρα ακτίνας r με κέντρο το σημείο $x \in \mathbb{R}^n$

κι ότι η $f: \partial B_r(x) \rightarrow \mathbb{R}$. Τότε, η μέση τιμή της f στη σφαιρική επιφάνεια $S_r^{n-1}(x) = \partial B_r(x)$ ονομάζεται η ποσότητα:

$$\langle f \rangle := \frac{1}{E} \int_{S_r^{n-1}(x)} f(\xi) dS_\xi \quad (8.17)$$

Όπου

$$E = r^{n-1} \omega_n$$

το "εμβαδόν" της σφαιρικής επιφάνειας $S_r^{n-1}(x)$.

Θεώρημα (Θεώρημα μέσης τιμής του Gauss)

Αν η $\varphi(x)$ είναι αρμονική στην περιοχή Ω και η σφαίρα $\bar{B}_r(x)$ περιέχεται στην Ω τότε $\varphi(x) = \langle \varphi \rangle$.

8.2 Πεδία

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, πεδίο είναι ο χώρος μέσα στον οποίο ασκούνται δυνάμεις (ενός συγκεκριμένου είδους). Ο ορισμός αυτός δίνεται σε σχέση με την έννοια του χώρου και προϋποθέτει ακαριαία επίδραση των δυνάμεων από σημείο σε σημείο. Κάτι τέτοιο όμως είναι αντίθετο προς τις θεμελιώδεις απόψεις της θεωρίας της σχετικότητας.

Σύμφωνα με τη σύγχρονη φυσική, πεδίο είναι η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η ύλη και στην οποία οι δραστικές ιδιότητές της είναι κατά πολύ πιο έντονες απ' ότι οι αδρανείς. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν εκδηλώνονται πιο έντονα οι αδρανείς ιδιότητες της ύλης, γίνεται λόγος για υλικά σώματα. Αυτού του είδους η εκδήλωση μπορεί να εμφανιστεί σε μια περιοχή με περισσότερο ή λιγότερο συγκεκριμένα πλαίσια ή αλλιώς να είναι συγκεντρωμένη ή "εντοπισμένη".

Στην φύση υπάρχουν τα εξής πεδία:

- Ηλεκτρικό Πεδίο.
- Μαγνητικό Πεδίο.
- Βαρυτικό Πεδίο.
- Πυρηνικό Πεδίο.

Κάθε πεδίο παίζει το ρόλο ενός μεσολαβητή, ενός μεταφορέα, της αλληλεπίδρασης συγκεκριμένου τύπου μεταξύ των σωμάτων, με πεπερασμένη και όχι με άπειρη ταχύτητα. Από τα παραπάνω λοιπόν βγαίνει ότι το πεδίο δεν είναι κάτι το άυλο, αλλά είναι υλικό, είναι δηλαδή ένας τρόπος, μία μορφή, με την οποία εμφανίζεται η ύλη, έχοντας ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και ιδιότητες που δεν έχουν άλλες μορφές της, όπως π.χ. το μήκος κύματος, η ταχύτητα με την οποία μεταδίδεται (300.000 χιλιόμετρα ανά δευτερόλεπτο), η ένταση σ' ένα σημείο κλπ.

Οποιοδήποτε είδος πεδίου μπορεί να εμφανίζεται είτε ως στατικό - δηλαδή η ένταση δεν εξαρτάται από το χρόνο, παραμένει αμετάβλητη σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή - είτε ως μεταβαλλόμενο (εννοείται μεταβαλλόμενο με το χρόνο, δηλαδή η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι συνάρτηση του χρόνου, για εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο). Στα μαθηματικά, αυτό μεταφράζεται στην συνάρτηση, η οποία ορίζει το πεδίο και άλλοτε χαρακτηρίζεται ως βαθμωτή και άλλοτε ως διάνυσμα. Προκειμένου

λοιπόν να μελετήσουμε ένα πεδίο, χρησιμοποιούμε συναρτήσεις και γενικότερα την έννοια της κλίσης (ή πιο απλά της διαβάθμισης) του πεδίου.

8.2.1 Κλίση Πεδίου

Στα μαθηματικά, η κλίση είναι μια γενίκευση της συνήθους έννοιας της παραγώγου σε λειτουργίες πολλών μεταβλητών. Αν $f(x_1, \dots, x_n)$ είναι μια διαφορίσιμη και βαθμωτή συνάρτηση πολλών μεταβλητών, η κλίση είναι το διάνυσμα, του οποίου τα στοιχεία είναι οι n μερικοί παράγωγοι της f . Παρόμοια με την παράγωγο, η κλίση παριστά την κλίση της εφαπτομένης της γραφικής παράστασης της συνάρτησης. Ακριβέστερα, τα σημεία της κλίσης στην κατεύθυνση του μεγαλύτερου ρυθμού αύξησης της λειτουργίας και του μεγέθους του είναι η κλίση της γραφικής παράστασης σε αυτή την κατεύθυνση. Τα συστατικά της βαθμίδωσης σε συντεταγμένες είναι οι συντελεστές των μεταβλητών στην εξίσωση του χώρου εφαπτομένης στην γραφική παράσταση.

8.2.2 Δυναμική Κλίση

Στη φυσική, δυναμική κλίση είναι ο τοπικός ρυθμός μεταβολής του δυναμικού σε σχέση με την μετατόπιση, δηλαδή η χωρική παράγωγος, ή η χωρική κλίση. Η ποσότητα αυτή εμφανίζεται συχνά στις εξισώσεις των φυσικών διεργασιών, διότι οδηγεί σε κάποια μορφή της ροής.

Μίας Διάστασης

Ο απλούστερος ορισμός για μια δυναμική κλίση F , σε μια διάσταση, είναι η ακόλουθη:

$$F = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} \quad (8.18)$$

όπου $\varphi(x)$ είναι κάποιο είδος βαθμωτού δυναμικού και το x είναι η μετατόπιση (όχι απόσταση), κατά τη διεύθυνση X , οι δείκτες αναφέρονται σε δύο διαφορετικές θέσεις X_1, X_2 , και τα αντίστοιχα δυναμικά στα σημεία αυτά, $\varphi_1 = \varphi(x_1)$, $\varphi_2 = \varphi(x_2)$. Για απειροελάχιστη μετατόπιση dx , η αναλογία των διαφορών γίνεται μια αναλογία των διαφορικών:

$$F = \frac{d\varphi}{dx} \quad (8.19)$$

Τριών Διαστάσεων

Σε τρεις διαστάσεις, οι καρτεσιανές συντεταγμένες καθιστούν σαφές ότι η προκύπτουσα κλίση δυναμικού είναι το άθροισμα των κλίσεων δυναμικού σε κάθε κατεύθυνση:

$$F = e_x \frac{\partial\varphi}{\partial x} + e_y \frac{\partial\varphi}{\partial y} + e_z \frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (8.20)$$

όπου e_x, e_y, e_z είναι μοναδιαία διανύσματα κατά τις διευθύνσεις x, y, z κατευθύνσεις. Αυτό μπορεί να εκφραστεί με τη χρήση ∇ ,

$$F = \nabla\varphi$$

αν και αυτή η τελική μορφή συναντάται σε κάθε καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων, όχι μόνο σε καρτεσιανό. Αυτή η έκφραση αντιπροσωπεύει το σημαντικό χαρακτηριστικό του οποιουδήποτε συντηρητικού διανυσματικού πεδίου F , δηλαδή F έχει ένα αντίστοιχο δυναμικό ϕ . Χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Stoke, αυτό ισοδύναμα δηλώνεται ως:

$$\nabla \times F = 0$$

8.3 Βαρυτικό Πεδίο

8.3.1 Εισαγωγή

Στις διασκοπήσεις με τη βαρυτική μέθοδο, μετράμε την επιτάχυνση της βαρύτητας με βαρυτόμετρα. Ο στόχος είναι να εντοπίσουμε την επίδραση στο πεδίο βαρύτητας, που σχετίζεται με τη μεταβολή της πυκνότητας στα γεωλογικά στρώματα. Αλλά η ένταση του πεδίου βαρύτητας ή η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα της καθώς και από τη μάζα και την ταχύτητα περιστροφής της.

Αρα, πριν από την ερμηνεία των βαρυτικών δεδομένων πρέπει να γίνει διόρθωση, η οποία θα αντισταθμίσει αυτές τις επιδράσεις. Μετά από αυτή την εργασία είναι εφικτή η διάκριση πολύ μικρών αλλαγών στην επιτάχυνση της βαρύτητας οι οποίες δίνουν πληροφορίες για την πλευρική μεταβολή της πυκνότητας των πετρωμάτων.

8.3.2 Βαρυτικό πεδίο

Είναι ο χώρος όπου ασκείται ελκτική δύναμη βαρύτητας σε κάθε σώμα που βρίσκεται εκεί μέσα. Στις αρχές του 17ου αιώνα, ο Κέπλερ διατύπωσε τους τρεις “θεμελιώδεις” νόμους της κίνησης των πλανητών. Ταυτόχρονα ο Γαλιλαίος ανακάλυπτε ότι μικρά σώματα κοντά στην γη κινούνται προς τη γη με ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση. Αλλά κανείς από τους δύο δεν κατανόησε ότι το αίτιο αυτών των δύο φαινομένων είναι το ίδιο, δηλαδή η βαρύτητα.

Αργότερα, μετά από μισό αιώνα, ο Νεύτωνας αναγνώρισε ότι αυτές οι κινήσεις καθορίζονται από την δύναμη της βαρύτητας. Συνδύασε τους νόμους του Κέπλερ με την δική του ιδέα για να καταλήξει στον θεμελιώδη νόμο της παγκόσμιας έλξης, ο οποίος εκφράζει το μέτρο της ελκτικής δύναμης μεταξύ δύο υλικών σημείων και διατυπώνεται ως εξής :

«Το μέτρο της δύναμης της βαρύτητας μεταξύ δυο σωμάτων, είναι ανάλογο με το γινόμενο των μαζών των σωμάτων και αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ τους», δηλαδή

$$F = G \frac{m_1 * m_2}{r^2} \quad (8.21)$$

όπου F είναι το μέτρο της δύναμης, m_1 και m_2 οι μάζες των σωματιδίων και G είναι η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας, η οποία υπολογίστηκε από τον Cavendish μετά από περίπου ένα αιώνα και έχει τιμή $G=6.673*10^{-11} \text{ m}^3*\text{kg}^{-1}*\text{sec}^{-2}$ στο σύστημα S.I.. Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η ελκτική δύναμη είναι ίση με το γινόμενο της μάζας και της επιτάχυνσης.

$$F = m * g \quad (8.22)$$

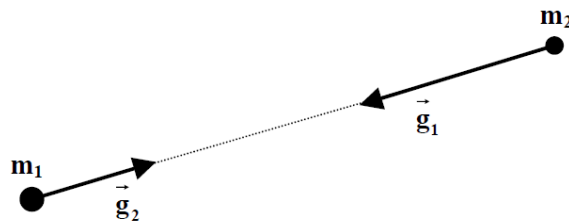
Οπότε συνδυάζοντας τις (8.21) και (8.22) προκύπτει:

$$F = m_1 \left(\frac{Gm_2}{r^2} \right) = m_1 g_2 \quad (8.23\alpha)$$

$$F = m_2 \left(\frac{Gm_1}{r^2} \right) = m_2 g_1 \quad (8.23\beta)$$

Στην εικόνα 22, τα g_1 και g_2 παριστούν επιτάχυνση. Αν το υλικό σημείο m_1 είναι ελεύθερο να κινηθεί, τότε αυτό θα πλησιάζει το m_2 με ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση και επιτάχυνση g_2 . Όμοια, το g_1 δηλώνει την επιτάχυνση με την οποία κινούνται τα ελεύθερα υλικά σημεία m_2 προς το m_1 . Η επιτάχυνση ή ένταση, g , του βαρυτικού πεδίου, το οποίο δημιουργεί υλικό σημείο μάζας m , είναι ανεξάρτητη από την παρουσία άλλων υλικών σημείων και εξαρτάται μόνο από τη μάζα m και την απόσταση από το υλικό σημείο r , σύμφωνα με τη σχέση:

$$g = G \frac{m}{r^2} \quad (8.24)$$



Εικόνα 22: Σχηματική παράσταση της αμοιβαίας έλξης που υφίστανται δύο μάζες, m_1 και m_2 . (Βαφείδης, 2001)

Η ένταση του πεδίου βαρύτητας εκφράζει την ικανότητα του υλικού σημείου να επιταχύνει άλλα σώματα. Η επιτάχυνση περιγράφεται από διάνυσμα με διεύθυνση στην ευθεία που ενώνει το υλικό σημείο και το σώμα, με φορά προς το υλικό σημείο και μέτρο που δίνεται από την εξίσωση (8.3). Μονάδα μέτρησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας είναι m/sec στο διεθνές σύστημα, S.I., και gal (Galileo) στο C.G.S., το οποίο ισούται: $1 gal = 1 cm/sec^2$. Βέβαια, στην γεωφυσική χρησιμοποιείται μια υποδιαίρεση του μεγέθους αυτού, το $mgal$ ($1 mgal = 10^{-3} cm/sec^2$).

Για τον υπολογισμό της έντασης του βαρυτικού πεδίου της γης θεωρούμε ότι η γη αποτελείται από υλικά σημεία κατανομημένα ομοιόμορφα στο εσωτερικό μιας σφαίρας, δηλαδή η πυκνότητα είναι παντού η ίδια και η γη (προς στιγμή) θεωρείται ότι δεν περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της. Τότε, από την εξίσωση (8.24) υπολογίζεται η επίδραση κάθε υλικού σημείου της γης σε σώμα το οποίο βρίσκεται σε απόσταση r από το κέντρο του. Αν R είναι η ακτίνα της γης, τότε η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης αποδεικνύεται ότι δίδεται από τη σχέση :

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (8.25)$$

Αυτή θα ήταν η ένταση του πεδίου βαρύτητας αν η γη ήταν σφαιρική και δεν περιστρεφόταν γύρω από τον εαυτό της. Ωστόσο, όπως είναι γνωστό, η γη αποκλίνει από το σφαιρικό σχήμα, ενώ παράλληλα, περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της.

Το πεδίο της βαρύτητας είναι αστρόβιλο, γιατί ισχύει :

$$\nabla \times \mathbf{g} = 0$$

ενώ, χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Helmholtz, σύμφωνα με το οποίο «κάθε διανυσματικό πεδίο το οποίο είναι συνεχές στο άπειρο, μπορεί να εκφραστεί ως κλίση ενός βαθμωτού δυναμικού U και στροφή ενός διανύσματος A ,

$$\mathbf{F} = \nabla U + \nabla \times \mathbf{A} \quad (26)$$

όπου τα ∇U και $\nabla \times \mathbf{A}$ είναι ορθογώνια μεταξύ τους», αποδεικνύεται ότι είναι συντηρητικό πεδίο και μπορεί να αντιπροσωπευθεί από την κλίση βαθμωτού δυναμικού, δηλαδή

$$\mathbf{g} = \nabla U$$

όπου το δυναμικό δίνεται από την σχέση (27):

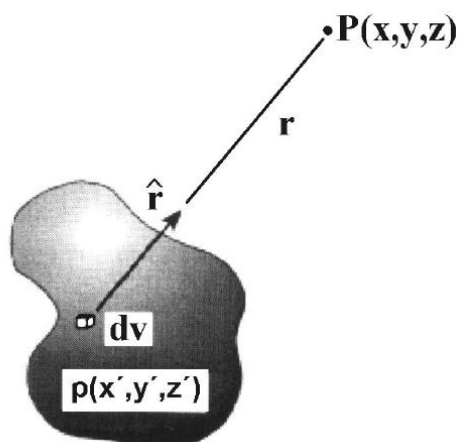
$$U = G \frac{m}{r} \quad (27)$$

Το βαρυτικό δυναμικό U εκφράζει το έργο, που παράγεται από το πεδίο σε ένα σωματίδιο. Για το βαρυτικό δυναμικό ισχύει η αρχή της υπέρθεσης, δηλαδή το βαρυτικό δυναμικό ενός συνόλου μαζών είναι το αλγεβρικό άθροισμα των συνιστωσών δυναμικού της κάθε μιας μάζας. Κατανομή μάζας m θεωρείται ως το σύνολο πολλών στοιχειωδών μαζών $dm = \rho(x', y', z') dv$ (Εικόνα 23), όπου $\rho(x', y', z')$ είναι η πυκνότητα.

Σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης το σημειακό δυναμικό δίνεται από την σχέση:

$$U(P) = G \int_V \frac{dm}{r} = G \int_V \frac{\rho(Q)}{r} dv \quad (8.28)$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται σε όλο τον όγκο V της μάζας, P είναι το σημείο παρατήρησης, Q το σημείο ολοκλήρωσης και r η απόσταση μεταξύ P και Q .



Εικόνα 23: Η βαρυτική έλξη σε σημείο P , εξαιτίας της κατανομής πυκνότητας ρ (Blakely, 1995).

Για το βαρυτικό δυναμικό αποδεικνύεται ότι ισχύει η δευτεροβάθμια διαφορική εξίσωση του Laplace:

$$\nabla^2 U(P) = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (8.29)$$

οπότε, το βαρυτικό δυναμικό είναι αρμονικό σε κάθε σημείο εκτός της πηγής του, δηλαδή της μάζας που το προκαλεί.

Αν η βαρυτική έλξη ικανοποιεί την συνθήκη

$$g = \nabla U$$

και μηδενίζεται στο άπειρο, τότε έχουμε

$$U = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\nabla \cdot g}{r} dv \quad (8.30)$$

Συγκρίνοντας το ολοκλήρωμα της σχέσης (8.30) με αυτό της σχέσης (8.28) παίρνουμε τη δευτεροβάθμια διαφορική εξίσωση:

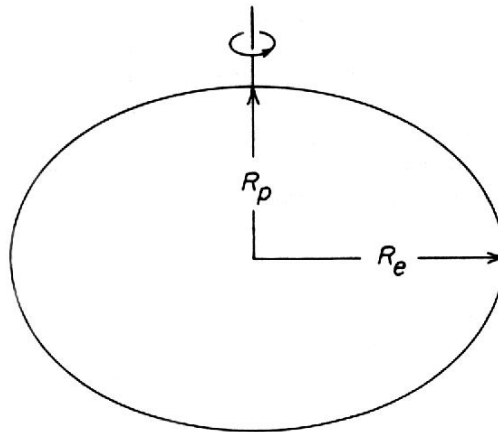
$$\nabla^2 U(P) = -4\pi G\rho \quad (8.31)$$

8.3.3 Περιστροφή της Γης

Λόγω περιστροφής γύρω από άξονα που περνά από το Νότιο και το Βόρειο πόλο, στα υλικά σημεία της γης επιδρά φυγόκεντρη δύναμη με αποτέλεσμα το σχήμα της γης να μοιάζει περισσότερο με ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Η πλάτυνση αυτού του ελλειψοειδούς ορίζεται συναρτήσει της πολικής ακτίνας R_p και της ισημερινής ακτίνας R_e από τη σχέση:

$$f = \frac{R_e - R_p}{R_e} \quad (8.32)$$

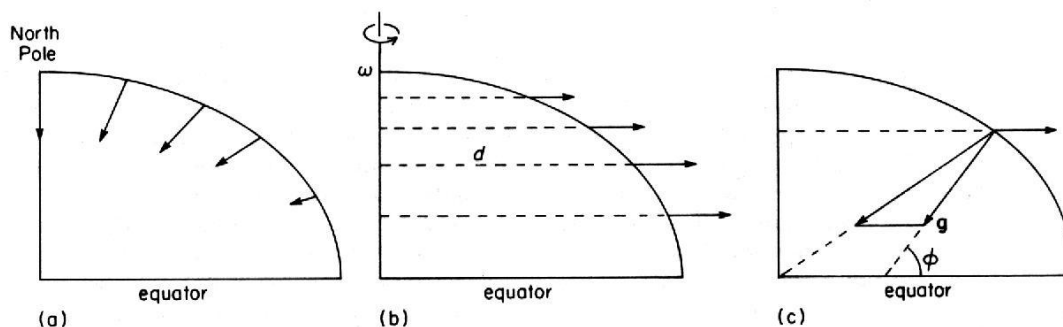
και εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής της γης.



Εικόνα 24: Σχηματική τομή του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής της γης με ισημερινή και πολική ακτίνα R_e και R_p αντίστοιχα (Robinson, 1988).

Σώμα στην επιφάνεια περιστρεφόμενου ελλειψοειδούς υφίσταται την επίδραση του βαρυτικού πεδίου της συνολικής μάζας του ελλειψοειδούς. Αυτή η ελκτική δύναμη κατευθύνεται προς το κέντρο της

μάζας και είναι ασθενέστερη στον ισημερινό από ότι στους πόλους, δηλαδή η επιτάχυνση της βαρύτητας αυξάνεται από τον ισημερινό προς τους πόλους. Η παραπάνω διαπίστωση εξηγείται από την εξίσωση (8.25) και το γεγονός ότι η ακτίνα του ελλειψοειδούς μειώνεται από τον ισημερινό προς τους πόλους. Η βαρύτητα επίσης επηρεάζεται από την κατανομή της μάζας στο ελλειψοειδές, η οποία είναι διαφορετική από ότι στη σφαίρα.



Εικόνα 25: Τα διανύσματα παριστάνουν (a) τη βαρυτική έλξη στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς της γης, (b) την φυγόκεντρο επιτάχυνση στην επιφάνεια της γης, λόγω περιστροφής και (c) τη συνισταμένη βαρυτική έλξη σε ένα σημείο στην επιφάνεια της γης (Robinson, 1988).

Η διαφορετική ακτίνα της γης δεν είναι ο μόνος λόγος για τον οποίο η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι ασθενέστερη στον ισημερινό. Θα πρέπει να λάβουμε υπόψη επίσης την επίδραση της φυγόκεντρης δύναμης η οποία εξασκείται στο υλικό σημείο το οποίο βρίσκεται στην επιφάνεια της περιστρεφόμενης γης. Αυτό το υλικό σημείο αναγκάζεται να ακολουθήσει κυκλική πορεία γύρω από τον άξονα περιστροφής της γης. Η διεύθυνση της φυγόκεντρης δύναμης δεν περνά από το κέντρο της γης, αλλά από το κέντρο της κυκλικής τροχιάς του. Το μέτρο της φυγόκεντρης επιτάχυνσης είναι:

$$a_c = \omega^2 * d \quad (8.33)$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γης και d , η απόσταση του υλικού σημείου από το κέντρο της κυκλικής τροχιάς του (Εικόνα 25b). Παρατηρείστε ότι η επίδραση της φυγόκεντρης δύναμης είναι ισχυρότερη στον ισημερινό, όπου η απόσταση d ισούται με R_e . Όσο απομακρυνόμαστε από τον ισημερινό η d μειώνεται και γίνεται μηδέν στους πόλους όπου η φυγόκεντρη δύναμη είναι επίσης μηδέν.

Το πεδίο βαρύτητας περιστρεφόμενου ελλειψοειδούς είναι ίσο με το άθροισμα των επιδράσεων της μάζας και της φυγόκεντρης δύναμης. Τα διανύσματα αυτών των δύο επιδράσεων έχουν σχεδιασθεί (όχι υπό κλίμακα) στην εικόνα 25c. Η επίδραση της ελκτικής δύναμης βαρύτητας είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την φυγόκεντρη δύναμη, δηλαδή 300 φορές. Παρατηρούμε ότι μόνο στους πόλους η ένταση του πεδίου βαρύτητας έχει κατακόρυφη διεύθυνση προς το κέντρο της γης.

8.3.4 Πεδίο Βαρύτητας της Γης

Στην επιφάνεια σφαίρας η ένταση δίνεται από τη σχέση:

$$g = G \frac{m}{r^2} \quad (8.34)$$

όπου r είναι πλέον η ακτίνα της σφαίρας.

Αυτή η τιμή της έντασης πρέπει να προσαρμοσθεί έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη η επίδραση της πλάτυνσης και της φυγόκεντρης δύναμης. Έτσι, η ένταση περιγράφεται από τον τύπο του ελλειψοειδούς

$$\gamma = \gamma_0(1 + \alpha * \sin^2 \varphi + \beta * \sin^2 2\varphi) \quad (8.35)$$

όπου γ_0 και γ είναι η ένταση του πεδίου βαρύτητας στον ισημερινό και σε γεωγραφικό πλάτος φ αντίστοιχα, ενώ α και β είναι σταθερές, οι οποίες υπολογίζονται από αστρονομικές παρατηρήσεις. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε μόνο πως υπολογίζεται το γ_0 .

Πριν από το 1950 η ακρίβεια της έντασης του πεδίου βαρύτητας ήταν στην καλύτερη περίπτωση μερικά mgal. Ιδιαίτερα σε απομακρυσμένους σταθμούς η σχετική μέτρηση της έντασης είχε σφάλμα αρκετών mgal. Την δεκαετία του 1950 προτάθηκε η πραγματοποίηση διασκόπησης σε παγκόσμια κλίμακα με στόχο την απόκτηση μετρήσεων καλύτερης ακρίβειας. Οι σταθμοί παρατήρησης θα βρίσκονταν σε όλες τις ηπείρους με σκοπό την δημιουργία ενός παγκόσμιου δικτύου σταθμών αναφοράς χρήσιμο για την ρύθμιση βαρυτικών διασκοπήσεων τοπικής κλίμακας.

Για την απόκτηση αυτών των υψηλής ακρίβειας μετρήσεων, έτσι ώστε η απόλυτη τιμή του γ να μετρηθεί σε σταθμό αναφοράς με ακρίβεια μερικών δέκατων του mgal, θα έπρεπε οι σχετικές μετρήσεις Δg να πραγματοποιηθούν με ακρίβεια μερικών δέκατων του mgal.

Τότε συσκευές, που να μετρούν με αυτή την ακρίβεια την απόλυτη τιμή της έντασης δεν υπήρχαν, αλλά γινόταν προσπάθεια να κατασκευασθούν και αναμενόταν να είναι έτοιμες σε μία ή δύο δεκαετίες. Υπήρχαν όμως συσκευές π.χ. εκκρεμές ή βαρυτόμετρο τα οποία έκαναν μετρήσεις της σχετικής τιμής Δg της έντασης με αυτή την ακρίβεια. Οπότε αποφασίσθηκε να πραγματοποιηθεί η βαρυτική διασκόπηση παγκόσμιας κλίμακας μόνο των σχετικών μετρήσεων, με σκοπό την αναγωγή τους σε απόλυτες τιμές της έντασης, όταν θα ήταν εφικτή η μέτρηση της απόλυτης τιμής σε σταθμό αναφοράς με ακρίβεια μερικών δέκατων mgal.

Η διασκόπηση πραγματοποιήθηκε με το εκκρεμές Gulf και βαρυτόμετρα. Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν στη Βόρεια Αμερική σε αεροδρόμια από την πόλη του Μεξικού έως την Αλάσκα. Η μεταφορά των οργάνων γινόταν με πολιτικά ή στρατιωτικά αεροπλάνα. Σε κάθε σταθμό η μέτρηση επαναλαμβάνονταν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν εκκρεμή κατασκευασμένα στο Πανεπιστήμιο Cambridge της Αγγλίας για την συλλογή μετρήσεων κατά μήκος γραμμής μελέτης που ξεκινά από το Houston του Τέξας και καταλήγει στο Winnipeg του Καναδά.

Από τη σύγκριση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων που συγκεντρώθηκαν στην πρώτη φάση αυτού του προγράμματος προέκυψε ότι το σφάλμα ξεπερνούσε τα ανεκτά όρια. Καλύτερες τεχνικές ελέγχου της θερμοκρασίας και του κενού σε συνδυασμό με βελτιωμένα χρονόμετρα είχαν τότε σαν αποτέλεσμα τη επίτευξη ακρίβειας στις σχετικές μετρήσεις καλύτερης από 0.3 mgal. Οι εργασίες συνεχίστηκαν για περίπου 10 χρόνια και συγκεντρώθηκαν στοιχεία από 100 σταθμούς σε όλο το κόσμο. Αξίζει να αναφερθεί μια ακόμη δυσκολία στη χρήση βαρυτόμετρων κατασκευασμένων το 1950 σε παγκοσμίου κλίμακας βαρυτική διασκόπηση. Παρόλο που η ακρίβεια των οργάνων ήταν 0.05 mgal, δεν μπορούσαν να μετρήσουν διαφορές μεγαλύτερες των 100 mgal χωρίς επαναρύθμιση του ελατηρίου. Έτσι, αν η βαρύτητα μεταξύ δύο σταθμών διέφερε περισσότερο από 100 mgal, τότε ήταν απαραίτητες πρόσθετες μετρήσεις σε ενδιάμεσους σταθμούς. Σε κάθε ενδιάμεσο σταθμό πραγματοποιούνταν

μετρήσεις πριν και μετά από τη ρύθμιση. Οι επιπρόσθετες μετρήσεις απαιτούσαν περισσότερο χρόνο και εισήγαγαν επιπλέον σφάλματα. Για τον παραπάνω λόγο, η χρήση του βαρυτόμετρου στη παγκόσμια διασκόπηση ήταν περιορισμένη.

Για πολλούς κατασκευαστές, αυτή η βαρυτική διασκόπηση ήταν μια πρόκληση. Στην αρχή, μετέτρεψαν τα ελατήρια έτσι ώστε το εύρος των τιμών από 100 mgal να φθάσει σε μερικές χιλιάδες mgal. Αλλά με αυτά τα ελατήρια, χειροτέρεψε η ευαισθησία σε μικρές μεταβολές του πεδίου βαρύτητας. Επίσης, σε σταθμούς όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το εκκρεμές, το νέο βαρυτόμετρο παρουσίαζε διαφορετικές ενδείξεις. Μετά από πολύχρονη προσπάθεια κατασκευάστηκαν βαρυτόμετρα με σωστή κλίμακα τα οποία επέτρεψαν την ολοκλήρωση της παγκόσμιας βαρυτικής διασκόπησης, ενώ το πρόγραμμα μετρήσεων με εκκρεμή ήταν ακόμη σε εξέλιξη. Το παγκόσμιο δίκτυο σταθμών όπου έγιναν μετρήσεις με βαρυτόμετρα περιλαμβάνει 1400 σταθμούς. Επίσης, στην εικόνα 26 απεικονίζεται το παγκόσμιο δίκτυο σταθμών, όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της έντασης του πεδίου βαρύτητας με εκκρεμές. Οι σταθμοί των δύο δικτύων μετρήσεων με βαρυτόμετρα και εκκρεμή αποτελούν τις θέσεις ρύθμισης των σύγχρονων βαρυτικών διασκοπήσεων.



Εικόνα 26: Παγκόσμιο δίκτυο σταθμών μέτρησης του πεδίου βαρύτητας με εκκρεμή (Robinson, 1988).

Λίγο αργότερα το 1963, ολοκληρώθηκε η παγκόσμια βαρυτική διασκόπηση η οποία περιλαμβάνει και μετρήσεις με το όργανο ελεύθερης πτώσης (απόλυτη τιμή του g). Συνδυάζοντας τη απόλυτη τιμή g_r σε ένα από τους σταθμούς του παγκόσμιου δικτύου με τη σχετική μέτρηση Δg σε ένα σταθμό παρατήρησης εύκολα υπολογίζεται η απόλυτη τιμή του g στο σταθμό αυτό, σύμφωνα με τη σχέση:

$$g = g_r + \Delta g \quad (8.36)$$

Η σχέση αυτή χρησιμοποιήθηκε και για τον καθορισμό του g στους σταθμούς του παγκόσμιου δικτύου. Πριν από την παγκόσμια διασκόπηση σαν σταθμός αναφοράς εθεωρείτο αυτός του Potsdam της Γερμανίας. Αργότερα βρέθηκε ότι υπήρχε σφάλμα στην απόλυτη τιμή του g ίσο με 14 mgal. Παρόλα αυτά, οι γεωφυσικοί συμφώνησαν να συνεχίζουν να χρησιμοποιούν αυτή τη τιμή αναφοράς μέχρι να επιτευχθεί ακρίβεια της τάξης του 0.1 mgal. Αυτό επιτεύχθηκε το 1965 και από τότε χρησιμοποιούνται οι τιμές του Πίνακα 4. Τα αποτελέσματα της παγκόσμιας διασκόπησης δίνουν τιμές 978.0 gals στον ισημερινό και περίπου 983.2 gals στους πόλους. Η διαφορά των 5.2 gals οφείλεται στην πλάτυνση και περιστροφή της γης. Αυτό το γενικό συμπέρασμα ήταν γνωστό πολύ πριν από την πραγματοποίηση αυτής της διασκόπησης. Αλλά η βελτιωμένη ακρίβεια συνετέλεσε στην λεπτομερέστερη γνώση σχετικά με το σχήμα και τη δομή της γης.

Πίνακας 4: Πρότυπες τιμές παραμέτρων της γης που χρησιμοποιούνται στις βαρυτικές διασκοπήσεις.

Ακτίνα της γης στους πόλους	$R_p = 6378160 \text{ m}$
Ακτίνα της γης στον ισημερινό	$R_e = 6356774.5 \text{ m}$
Πλάτυνση του ελλειψοειδούς της γης	$f = 1 / 298.247$
Γωνιακή συχνότητα περιστροφής της γης	$\omega = 7.2921151467 \cdot 10^{-5} \text{ rad/sec}$
Ένταση του πεδίου βαρύτητας στον ισημερινό	$g_0 = 978.031846 \text{ gals}$

Είμαστε έτοιμοι να καθορίσουμε τις παραμέτρους της εξίσωσης της βαρύτητας σε ιδανικό πρότυπο της γης. Αυτό το πρότυπο είναι το ελλειψοειδές εκ περιστροφής το οποίο προσαρμόζεται στην επιφάνεια της θάλασσας και ονομάζεται κανονικό ή ελλειψοειδές αναφοράς. Οι γεωδαίτες, στην μελέτη του σχήματος της γης χρησιμοποιούν το ελλειψοειδές σαν αναφορά για την περιγραφή των ανωμαλιών της αληθούς επιφανείας της θάλασσας. Ανακάλυψαν ότι αυτές οι ανωμαλίες είναι μερικές δεκάδες μέτρων πάνω ή κάτω από το ελλειψοειδές αναφοράς στα περισσότερα σημεία του πλανήτη.

Αργότερα θα αναφερθούμε στο πώς οι γεωφυσικοί συγκρίνουν τις τιμές της κανονικής έντασης του πεδίου βαρύτητας που είναι η βαρύτητα στο ελλειψοειδές με τις μετρούμενες τιμές για τον εντοπισμό μεταβολής στην πυκνότητα που σχετίζεται με τις γεωλογικές δομές. Το ελλειψοειδές χαρακτηρίζεται από την ισημερινή ακτίνα R_e , την πλάτυνση f και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω . Αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται από αστρονομικές παρατηρήσεις. Στην συνέχεια, καθορίζονται οι σταθερές α και β στην σχέση της κανονικής έντασης του πεδίου βαρύτητας, οπότε προκύπτει:

$$\gamma = 987.031846 * (1 + 0.0053024 * \sin^2 \varphi + 0.0000059 * \sin^2 2\varphi)$$

Στη σχέση αυτή παραμένει άγνωστη η παράμετρος γ_0 , η οποία εκφράζει τη επιτάχυνση της βαρύτητας στον ισημερινό του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής.

Η γ_0 ισούται με την μέση τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας στην επιφάνεια της θάλασσας στον ισημερινό της γης. Ιδανικά θα έπρεπε οι μετρήσεις να πραγματοποιηθούν σε σταθμούς κατά μήκος των ακτών που τέμνουν τον ισημερινό. Μια γρήγορη ματιά στον παγκόσμια χάρτη δείχνει μόνο μια δωδεκάδα σταθμών οι οποίοι δεν αρκούν για τον αξιόπιστο υπολογισμό της γ_0 . Πρόσθετες μετρήσεις του

γ από άλλες περιοχές χρησιμοποιήθηκαν αφού υπέστησαν διορθώσεις έτσι ώστε να αντιστοιχούν στην επιφάνεια της θάλασσας και στον ισημερινό.

8.3.5 Πεδίο Βαρύτητας γνωστών διαστάσεων

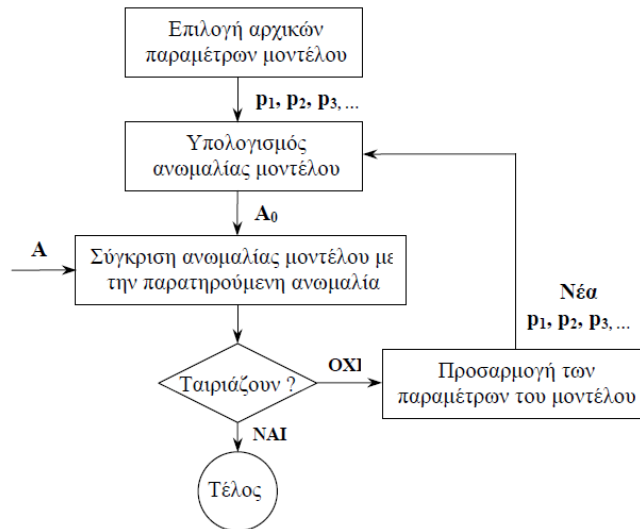
Το πρόβλημα της ποσοτικής ερμηνείας των βαρυτικών ανωμαλιών συνίσταται στον υπολογισμό μιας ή περισσότερων παραμέτρων της πηγής από τα δεδομένα, ενσωματώνοντας όλες τις γεωλογικές και γεωφυσικές πληροφορίες, καθώς και κάθε άλλου είδους πληροφορία.

Οι τεχνικές ποσοτικής ερμηνείας απαιτούν την επίλυση του ευθέως και του αντίστροφου προβλήματος. Στο **ευθύ πρόβλημα** κατασκευάζεται αρχικό μοντέλο της πηγής βασισμένο σε γεωλογικές και γεωφυσικές πληροφορίες. Υπολογίζεται η ανωμαλία που προκαλεί το μοντέλο και συγκρίνεται με την παρατηρούμενη ανωμαλία. Στο **αντίστροφο πρόβλημα** οι παράμετροι του μοντέλου προσαρμόζονται με σκοπό να βελτιώσουν τον βαθμό ταύτισης μεταξύ των δύο ανωμαλιών. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η υπολογισμένη και η παρατηρούμενη ανωμαλία να θεωρηθούν ικανοποιητικά όμοιες. Συχνά στο αντίστροφο πρόβλημα μια ή περισσότερες παράμετροι του μοντέλου υπολογίζονται αυτόματα ή/και απευθείας από τις παρατηρήσεις. Οι απλοποιημένες υποθέσεις είναι αναπόφευκτες. Τα διαγράμματα ροής των δύο αυτών κατηγοριών φαίνονται στην εικόνα 27.

Η γενική μορφή των εξισώσεων των δυναμικών πεδίων είναι σύμφωνα με τον Blakely (1995):

$$f(P) = \int_R s(Q) * G(R, Q) dv \quad (8.37)$$

όπου R είναι ο όγκος που καταλαμβάνει η πηγή, P είναι το σημείο παρατήρησης, το οποίο είναι πάντα έξω από τον όγκο R, το Q αναφέρεται στο ολοκλήρωμα, s(Q) είναι διανυσματική συνάρτηση που περιγράφει την πυκνότητα στο Q και G(P,Q) είναι επίσης μια διανυσματική συνάρτηση που εξαρτάται, τόσο από το σημείο παρατήρησης P, όσο και από το σχήμα του σώματος που προκαλεί την ανωμαλία και ονομάζεται συνάρτηση πυρήνα (kernel).



Εικόνα 27: Ποσοτική ερμηνεία μιας ανωμαλίας. Η παρατηρούμενη ανωμαλία παριστάνεται με A και η ανωμαλία του μοντέλου με A_0 . Οι παράμετροι p_1, p_2, p_3, \dots είναι χαρακτηριστικά της πηγής, όπως βάθος ταφής, πάχος, πυκνότητα κ.α (Blakely, 1995).

Στο ευθύ πρόβλημα υπολογίζουμε το $f(P)$ όταν γνωρίζουμε ή κάνουμε υποθέσεις για τις συναρτήσεις $s(Q)$ και $G(P, Q)$ και τον όγκο R . Από μαθηματική άποψη το ευθύ πρόβλημα έχει μοναδική λύση, το βαρυτικό μοντέλο όμως που κατασκευάζεται με την τεχνική αυτή είναι φυσικά μη μοναδικό.

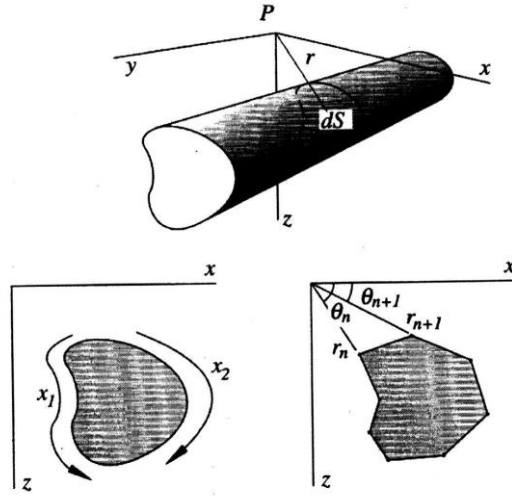
Στο αντίστροφο πρόβλημα, οι τιμές της $f(P)$ χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της $s(Q)$ ή του R . Ο υπολογισμός της $s(Q)$ ανάγεται σε γραμμικό πρόβλημα, ενώ ο υπολογισμός του R , σε μη γραμμικό πρόβλημα.

Η κατασκευή μοντέλων των βαρυτικών ανωμαλιών γίνεται με την χρήση προγραμμάτων H/Y. Η ερμηνεία των ανωμαλιών πραγματοποιείται στις 2 – 2.5 διαστάσεις (2 - 2.5 D) ή/και στις 3 διαστάσεις (3 D) ανάλογα με την φύση της ανωμαλίας. Μοντέλο 2D σύμφωνα με τον Sheriff (1994) είναι αυτό που δεν παρουσιάζει μεταβολές στην διεύθυνση κάθετα στην γραμμή των μετρήσεων. Όταν εφαρμόζονται διορθώσεις στα όρια του ολοκληρώματος της σχέσης (8.37) για μοντέλο που εκτείνεται στο άπειρο, τότε αναφερόμαστε σε μοντέλο 2.5D. Όταν το μοντέλο δεν εκτείνεται στο άπειρο σε καμία από της διαστάσεις του τότε αναφερόμαστε σε 3D μοντέλο.

Μοντέλα 2D και 2.5D

Στην ποσοτική ερμηνεία των βαρυτικών διασκοπήσεων, οι υπολογισμοί στις δύο διαστάσεις (2-D), κατά μήκος γραμμών μελέτης (profile) κάθετων σε άξονα πρισματικών δομών, ο οποίος θεωρείται απείρου μήκους, είναι συνήθης. Αυτό συμβαίνει γιατί δομές με επιμηκυμένο τον ένα άξονα τους απαντούνται συχνά στην γεωλογία. Οι ζώνες διάρρηξης, τα ρήγματα, οι φλέβες, οι τεκτονικές τάφροι και τα αντίκλινα είναι παραδείγματα γεωλογικών δομών, οι οποίες είναι αναπτυγμένες σε μια συγκεκριμένη οριζόντια διεύθυνση και οι βαρυτικές ανωμαλίες που αυτές δημιουργούν παρουσιάζουν συμμετρία εκατέρωθεν της διεύθυνσης αυτής. Αν σε βαρυτικούς χάρτες εμφανίζονται γραμμικές ανωμαλίες, τότε είναι δυνατό να θεωρήσουμε τις βαρυτικές πηγές αμετάβλητες στην διεύθυνση παράλληλα στον κύριο άξονα της

ανωμαλίας. Θεωρώντας ότι ο άξονας y έχει διεύθυνση παράλληλη στον επιμηκυμένο άξονα της πηγής, έχουμε μόνο τις διαστάσεις στον x και στον z για παραπέρα εξέταση. Ο Talwani το 1959 πρότεινε την αντικατάσταση της τομής των δισδιάστατων σωμάτων με πολύγωνα. Η μέθοδος αυτή ερμηνείας των δισδιάστατων δομών είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική στην ερμηνεία των δυναμικών πεδίων.

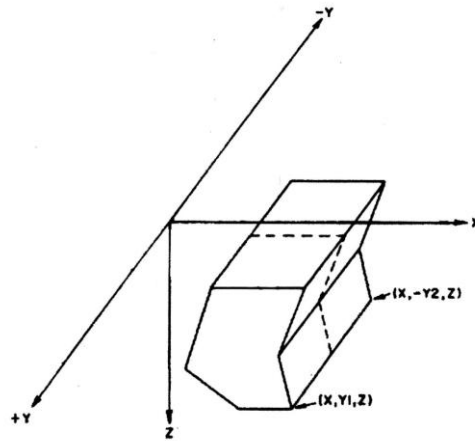


Εικόνα 28: Προσέγγιση ενός δισδιάστατου σώματος από πολύγωνο N -πλευρών. Ο άξονας y είναι παράλληλος στον άξονα ανάπτυξης του σώματος. Το σώμα εκτείνεται στο άπειρο στην διεύθυνση y (Blakely, 1995, Σταμπολίδης, 1999).

Η κατακόρυφη έλξη της βαρύτητας g για σώμα δύο διαστάσεων (Εικόνα 28) εξαρτάται από την θέση των N κορυφών του πολυγώνου και δίνεται από την εξίσωση:

$$g = 2G\rho \sum_{n=1}^N \frac{\beta_n}{1 + \alpha_n^2} \left[\ln \frac{r_{n+1}}{r_n} - a_n(\theta_{n+1} - \theta_n) \right] \quad (8.38)$$

όπου $a_n = \frac{x_{n+1} - x_n}{z_{n+1} - z_n}$ και $\beta_n = x_n - a_n z_n$, ενώ τα r_n και θ_n ορίζονται με βάση την Εικόνα 28.



Εικόνα 29: Γεωμετρία πολυγωνικού πρισματικού σώματος 2.5 διαστάσεων (Cady, 1980, Σταμπολίδης, 1999).

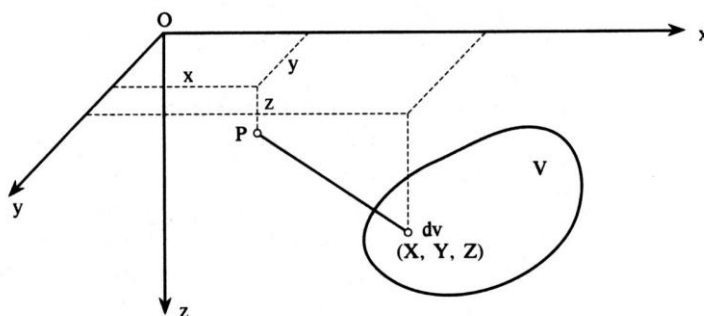
Όταν ο μεγάλος άξονας της δομής δεν εκτείνεται στο άπειρο, αλλά έχει πεπερασμένη έκταση συγκρινόμενη με τους υπόλοιπους άξονες, (Εικόνα 29) τότε τα όρια του ολοκληρώματος της σχέσης (8.37) προσαρμόζονται και εφαρμόζονται δισδιάστατοι υπολογισμοί. Οι δομές που είναι παρόμοιες με αυτή της εικόνας 29, ονομάστηκαν “2.5 διαστάσεων” για πρώτη φορά από τους Shuey και Pasquale (1973).

Μοντέλα 3-D

Η κατακόρυφη συνιστώσα της έντασης του πεδίου βαρύτητας στο $P(x,y,z)$ που οφείλεται σε δομή γνωστής πυκνότητας και σχήματος (Εικόνα 30), αποδεικνύεται ότι είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων που προκαλούνται από τις απειροελάχιστες μάζες της δομής και περιγράφεται από τη σχέση :

$$\Delta g_z(x,y,z) = G * \iiint_V \rho(X,Y,Z) * \frac{(Z-z)}{[(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2]^{3/2}} dX dY dZ \quad (8.39)$$

Άρα, ο υπολογισμός της έντασης ανάγεται στον προσδιορισμό του τριπλού ολοκληρώματος, του οποίου τα όρια καθορίζονται από τις διαστάσεις της δομής. Ο υπολογισμός του Δg_z είναι δύσκολο να γίνει αναλυτικά, εκτός από τις περιπτώσεις μαζών απλών γεωμετρικών σωμάτων.



Εικόνα 30: Η ένταση του πεδίου βαρύτητας σε σημείο του καρτεσιανού επιπέδου $P(x,y,z)$ που προκαλείται από μια δομή όγκου V και πυκνότητας $\rho(X,Y,Z)$ (Αραμπέλος, 1991).

Ένας προσεγγιστικός τρόπος είναι να διαιρέσουμε τη μάζα σε κατακόρυφες στήλες σταθερής διατομής και πυκνότητας. Σε κάθε σημείο υπολογίζεται αριθμητικά η επίδραση του συνόλου των σημείων αυτών.

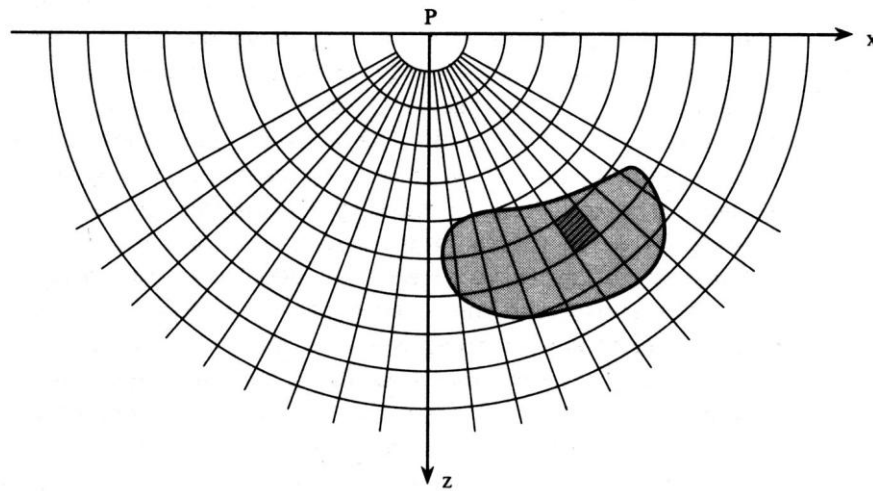
Ο όγκος των υπολογισμών μειώνεται φοβερά αν αντί του τρισδιάστατου μοντέλου, η μάζα διαταραχής θα μπορούσε να προσεγγιστεί με δισδιάστατο μοντέλο. Για αυτό το μοντέλο που ορίζεται πλήρως από μια απλή κάθετη τομή $\tau(x,z)$ και έχει επιφανειακή πυκνότητα $\Delta\rho(x,z)$, ισχύει η σχέση:

$$\Delta g(x,z) = 2G \iint_{\tau} \Delta\rho(x,z) \frac{(Z-z)}{(X-x)^2 + (Z-z)^2} dx dz \quad (8.40)$$

Αν υπερθέσουμε στην κάθετη τομή (γραμμοσκιασμένο μέρος στην Εικόνα 31) ένα σύστημα ομόκεντρων κύκλων κέντρου P και ακτίνων (Εικόνα 31), τότε αποδεικνύεται ότι κάθε στοιχειώδες τμήμα του σώματος αυτού προκαλεί την ίδια βαρυτική έλξη στη θέση P .

Αυτή η βαρυτική έλξη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta g_j(P) = 2G * \Delta \rho(r_{k+1} - r_k) * (\cos \varphi_j - \cos \varphi_{j+1}) \quad (8.41)$$



Εικόνα 31: Διαίρεση με ομόκεντρους κύκλους και ακτίνες (Αραμπέλος, 1991).

Το Δg στο σημείο P στην επιφάνεια, είναι δυνατό να προσδιοριστεί γραφικά τοποθετώντας πάνω στην τομή του σώματος μια διαφάνεια με υποδιαιρέσεις με ημικύκλια και ακτίνες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα. Μετακινώντας τη διαφάνεια έτσι ώστε το κέντρο των ομόκεντρων ημικυκλίων να συμπίπτει με το σημείο P και ο άξονας Px να ταυτιστεί με την επιφάνεια του εδάφους και εφαρμόζοντας τη σχέση (8.41) για κάθε στοιχειώδες τμήμα, το συνολικό Δg στο σημείο P, υπολογίζεται από ο άθροισμα των επιμέρους τιμών Δg_j .

Ο υπολογισμός αυτός επαναλαμβάνεται για διάφορους σταθμούς παρατήρησης P κατά μήκος γραμμής μελέτης, δημιουργώντας έτσι μια θεωρητική καμπύλη βαρυτικής ανωμαλίας, την οποία μπορούμε να συγκρίνουμε πλέον με την αντίστοιχη μετρούμενη ανωμαλία. Σε περίπτωση ασυμφωνίας των δύο καμπυλών, μεταβάλλουμε την μορφή του πρότυπου, προσθέτοντας ή αφαιρώντας στοιχεία, μέχρι να επιτευχθεί η ταύτιση των καμπυλών.

8.3.6 Τοπικό πεδίο βαρύτητας και διορθώσεις βαρύτητας

Η κατακόρυφη συνιστώσα του διανύσματος της βαρύτητας, g_z , μετρήθηκε πρώτα με το Galileo Galilei περίπου το 1589. Προς τιμήν του Galilei, η μονάδα μέτρησης του πεδίου βαρύτητας ονομάζεται Gal = $0,01 \text{ m} / \text{s}^2$. Ωστόσο, λόγω των μικρών παραλλαγών των πεδίων βαρύτητας, που προκαλούνται από τοπικές μάζες και την ευαισθησία των βαρυτόμετρων, που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις στο πεδίο, το $\text{mGal} = 10^{-3} \text{ Gal}$ υιοθετείται ως μονάδα του πεδίου βαρύτητας (Telford et al., 1990).

Για να ερμηνεύσουμε τις ανωμαλίες στα μικρά μήκη κύματος της βαρύτητας, που προκαλούνται από τις τοπικές μάζες με θετικές ή αρνητικές αντιθέσεις πυκνότητας, αρχικά θα πρέπει να διαχωρίσουμε το περιφερειακό πεδίο από την ανωμαλία, που προκαλείται από τη πηγή πριν από την ανάλυση των μετρήσεων του πεδίου βαρύτητας. Η διαδικασία διαχωρισμού περιλαμβάνει μια σειρά από διορθώσεις του μετρούμενου πεδίου βαρύτητας. Ο Blakely (1995) περιγράφει ότι ένα μετρήσιμο βαρυτικό πεδίο περιέχει διαφορετικά αποτελέσματα για το γεωγραφικό πλάτος, τις κινούμενες πλάκες, το υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, την τοπογραφία του περιβάλλοντος, του έδαφους και μετέπειτα

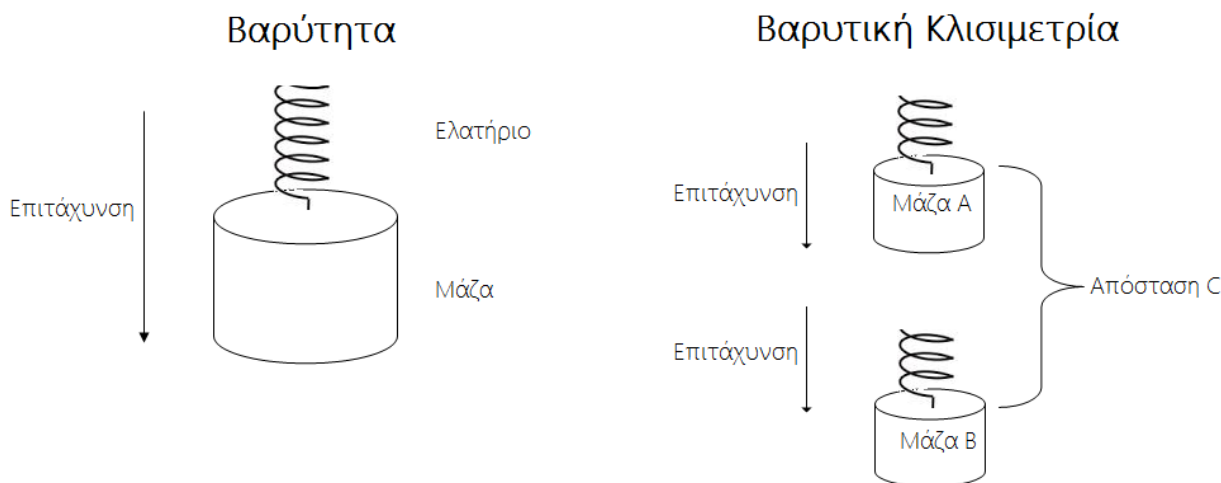
της γης, τις παλίρροιες και την παλιρροϊκή ενέργεια, καθώς και τις ισοστατικές διορθώσεις. Οι αναγνώστες παραπέμπονται σε βιβλία, π.χ. Telford (1990) και Blakely (1995) για λεπτομέρειες σχετικά με τις διορθώσεις βαρύτητας.

8.4 Τανυστής της Βαρύτητας (διαβάθμιση)

Η ιστορία των διαβαθμίσεων της βαρύτητας ξεκίνησε τις αρχές του 1886, όταν ο Ούγγρος επιστήμονας, Lorand Eötvös, εισήγαγε για πρώτη φορά κλισίμετρα με ζυγό στρέψης στη βιομηχανία του πετρελαίου. Μετά τον Eötvös, η μονάδα μέτρησης των κλίσεων της βαρύτητας ονομάζεται Eötvös και είναι ίση με 10^{-4} mGal/m. Ένα άτομο που στέκεται σε απόσταση 2 μέτρων δημιουργεί ένα βαρυτικό σήμα περίπου ένα Eötvös. Οι ορεινοί όγκοι μπορούν να δώσουν σήμα μερικών εκατοντάδων Eötvös.

Στη δεκαετία του 1970 νέα συστήματα αναπτύχθηκαν για τη μέτρηση του διανύσματος των κλίσεων της βαρύτητας κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς. Περίπου τρεις δεκαετίες αργότερα, καινούργια βαρυτικά κλισίμετρα εισήχθησαν στη βιομηχανία για την εξερεύνηση των υδρογονανθράκων, τη μεταλλευτική έρευνα, τη τεχνική γεωλογία, την περιβαλλοντική μηχανική και τους υπολογισμούς του γεωειδούς της γεωδαισίας.

Η βαρυτική κλίση είναι η μελέτη των διαφορετικών επιταχύνσεων λόγω βαρύτητας. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία του τανυστή είναι ο χωρικός ρυθμός μεταβολής της βαρυτικής επιτάχυνσης. Τα δεδομένα της διαβάθμισης της βαρύτητας χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η πυκνότητα του υπεδάφους και ο ρυθμός αλλαγής των ιδιοτήτων των πετρωμάτων από εταιρίες που δραστηριοποιούνται στα πετρέλαια, το φυσικό αέριο και τα ορυκτά. Από τα δεδομένα αυτά, είναι δυνατό να κατασκευαστεί μοντέλο των ανωμαλιών του υπεδάφους όπου μπορούν να εξακριβωθούν με ακρίβεια εναποθέσεις πετρελαίου φυσικού αερίου και ορυκτών.



Εικόνα 32: Απλουστευμένη άποψη της βαρύτητας και της Βαρυτικής Κλισιμετρίας.

Η διαβάθμιση της βαρύτητας μετρά τις μεταβολές στην επιτάχυνση της βαρύτητας μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων. Η διαβάθμιση της βαρύτητας είναι ο χωρικός ρυθμός μεταβολής της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Μπορεί να εξαχθεί διαφορίζοντας την τιμή της βαρύτητας σε δύο σημεία που χωρίζονται

από μία μικρή απόσταση και διαιρώντας τη αυτή την απόσταση. Οι δύο μετρήσεις της βαρύτητας που παρέχονται από επιταχυνσιόμετρα που είναι ευθυγραμμισμένα σε υψηλό επίπεδο ακρίβειας.

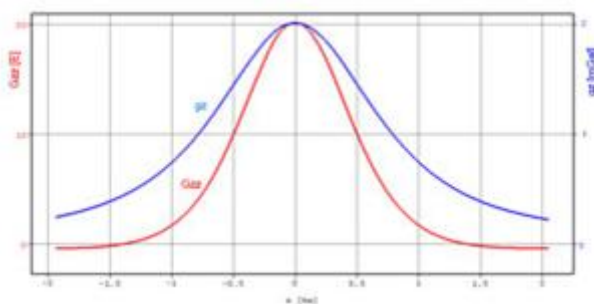
$$G_{zz} = \frac{\partial g_z}{\partial z} \approx \frac{g_z\left(z + \frac{1}{z}\right) - g_z\left(z - \frac{1}{z}\right)}{l} \quad (8.42)$$

Πιο απλά, ένα επιταχυνσιόμετρο είναι απλά η μάζα ενός ελατηρίου. Το βαρυτόμετρο μετρά την επιτάχυνση της μάζας λόγω βαρύτητας. Στην Εικόνα 32, η κλίση της βαρύτητας μετρά την επιτάχυνση της μάζας A και B. Η διαφορά της επιτάχυνσης υπολογίζεται τότε διαιρούμενη της απόστασης C.

Μια συμβατική έρευνα για τη βαρύτητα καταγράφει μια μονό από τις τρεις συνιστώσες της βαρυτικής δύναμης, συνήθως την κατακόρυφη συνιστώσα επιτάχυνσης της βαρύτητας, ενώ στην πλήρους τανυστή μέτρηση βαρυτικής κλισιμετρίας χρησιμοποιώντας ζεύγη επιταχυνσιόμετρων μετράτε ο ρυθμός μεταβολής του βαρυτικού πεδίου και στις τρεις κατευθύνσεις. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζει πιο ακριβή αναπαράσταση του πεδίου βαρύτητας που ερευνήθηκε. Αυτό δείχνει το Σχήμα 34.

Εκτός από την εξ' ολοκλήρου μέτρηση της βαρύτητας σε ένα δοσμένο σημείο η μέτρηση της διαβάθμισης της βαρύτητας έχει δυο ακόμα κύρια πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής βαθμωτής βαρυτομετρίας, τα οποία οδηγούν σε σημαντική αύξηση της ακρίβειας και της ανάλυσης.

Πρώτον, όντας οι παράγωγοι της βαρύτητας, αναδεικνύεται το σήμα της σε υψηλότερες συχνότητες. Αυτό καθιστά την ανωμαλία της βαρυτικής διαβάθμισης να εντοπίζεται περισσότερο στην πηγή της βαρυτικής ανωμαλίας. Δεύτερον, και ίσως πιο σημαντικό, οι επιδράσεις που προκαλούνται από την κίνηση της πλατφόρμας αλληλοαναιρούνται.



Εικόνα 33: Κατακόρυφη συνιστώσα επιτάχυνσης βαρύτητας και πρώτη παράγωγος της σε ένα σημείου βάθους 1 km. (Jackson, 2013).

Σε μια κινούμενη πλατφόρμα, η επιτάχυνση της διαταραχής που μετριέται από δυο επιταχυνσιόμετρα, είναι η ίδια, έτσι όταν πραγματοποιείται η διαφορά, η μέτρηση της βαρυτικής διαβάθμισης δε επηρεάζεται. Αυτή είναι η βασική αιτία που για την ανάπτυξη βαρυτικών ερευνών από αέρα/θάλασσα όπου τα επίπεδα επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερα.



Εικόνα 34: Η συμβατική βαρύτητα μετρά μόνο μια συνιστώσα του βαρυτικού πεδίου της κάθετης κατεύθυνσης G_z (LHS), ο πλήρης τανυστής της βαρυτικής κλισιμετρίας συνυπολογίζει όλες τις συνιστώσες του βαρυτικού πεδίου (RHS) (Jackson, 2013).

Γι' αυτούς τους λόγους η βαρυτική κλισιμετρία προσφέρει μια σημαντική αύξηση της ανάλυσης της ακρίβειας έναντι της συμβατικής βαθμωτής βαρυτομετρίας.

Πίνακας 5: Ο πίνακας συγκρίνει τη συμβατική βαρύτητα με την διαβάθμιση της βαρύτητας.

	Gravity (g_z)	Gravity gradient (G_{zz})
Signal	$\frac{GM}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \times 10^4$ [mGal]	$\frac{GM(r^2 - 2z^2)}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \times 10^9$ [E]
Peak Signal ($r = 0$)	$\frac{GM}{z^2} \times 10^4$	$\frac{2GM}{z^3} \times 10^9$
Full width at half maximum	$1.53 z$	$\approx z$
Wavelength (λ)	$3.07 z$	$2 z$

Όπως περιγράφηκε, το διάνυσμα βαρύτητας είναι η κλίση του βαρυτικού δυναμικού U στις τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις. Ομοίως, η επόμενη σειρά των χωρικών παράγωγων παράγει ένα τανυστή δεύτερης τάξης:

$$\Gamma = \nabla g = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{xy} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{xz} & g_{yz} & g_{zz} \end{bmatrix} \quad (8.42)$$

Έξω από την περιοχή της πηγής, η U ικανοποιεί την εξίσωση Laplace, και ως εκ τούτου το ίχνος του τανυστή είναι ίσο με μηδέν. Επειδή η Γ είναι συμμετρική, περιέχει μόνο πέντε ανεξάρτητες συνιστώσες και μπορεί να διαγωνοποιηθεί ως εξής:

$$V^T \Gamma V = \Lambda \quad (8.43)$$

Όπου $V = [v_1 \ v_2 \ v_3]$ και $\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$ περιέχουν ιδιοδιανύσματα και ιδιοτιμές, αντίστοιχα.

Φυσικά, από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων σε κάθε σημείο παρατήρησης, η εξίσωση

σημαίνει ότι μπορεί κανείς να βρει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων με κατά μήκος άξονες τα ιδιοδιανύσματα, στα οποία ο τανυστής της βαρύτητας βρίσκεται σε διαγώνια μορφή. Οι Pedersen και Rasmussen (1990) εισήγαγαν τις ακόλουθες τρεις σταθερές:

$$I_0 = IXNO\S(\Gamma) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0$$

$$I_1 = \Gamma_{11}\Gamma_{22} + \Gamma_{22}\Gamma_{33} + \Gamma_{11}\Gamma_{33} - \Gamma_{12}^2 - \Gamma_{23}^2 - \Gamma_{13}^2 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3$$

$$I_2 = \det(\Gamma) = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \quad (8.44)$$

Έδειξαν ότι η αναλογία $I = -\frac{27I_2^2}{4I_1^3}$ κυμαίνεται μεταξύ μηδέν και του ανώτατου άκρου κάθε δυναμικού πεδίου. Όταν η μορφή του πεδίου μοιάζει όλο και περισσότερο σαν 3D, τότε αυξάνεται η I και προκύπτει ότι:

$$\begin{cases} \lambda_2 = \lambda_3 \\ \lambda_1 = -2\lambda_2 = -2\lambda_3 \end{cases}$$

Με τη δισδιάστατη απεικόνιση των πηγών να κινείται προς την κατεύθυνση Y, ο αριθμός των μη μηδενικών GGT τμημάτων μειώνεται στα τέσσερα με δύο ανεξάρτητα στοιχεία

$$\Gamma = \nabla g = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ g_{xy} & g_{yy} \end{bmatrix} \quad (8.45)$$

Ωστόσο, για μια ακριβή δισδιάστατη απεικόνιση του πεδίου, το I είναι ίσο με μηδέν για όλα τα σημεία μέτρησης και

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\lambda_3 \\ \lambda_2 = 0 \end{cases}$$

Για μια γκαουσιανή δισδιάστατη απεικόνιση του πεδίου, η προβολή του τρίτου ιδιοδιανύσματος, το οποίο αντιστοιχεί στην ελάχιστη ιδιοτιμή πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, κατευθύνεται κατά μήκος της διαγραφής του σώματος, ενώ το ιδιοδιάνυσμα, που αντιστοιχεί στην ενδιάμεση ιδιοτιμή, βρίσκεται κατά μήκος της μέγιστης κλίσης του τομέα.

Πίνακας 6: Βαρυτικά πεδία και τμήματα GGT στη πηγή των σημείων και των πηγών μαζικών γραμμών

	<i>Point source</i>	<i>Line source</i>
U	$\gamma m/r$	$-\gamma m \ln(r)$
g_x	$\gamma m \Delta x/r^3$	$\gamma m \Delta x/r^2$
g_y	$\gamma m \Delta y/r^3$	—
g_z	$\gamma m \Delta z/r^3$	$\gamma m \Delta z/r^2$
g_{xx}	$\gamma m (3\Delta x^2 - r^2)/r^5$	$\gamma m (2\Delta x^2 - r^2)/r^4$
g_{xy}	$\gamma m (3\Delta x \Delta y)/r^5$	—
g_{xz}	$\gamma m (3\Delta x \Delta z)/r^5$	$\gamma m (2\Delta x \Delta z)/r^4$
g_{yy}	$\gamma m (3\Delta y^2 - r^2)/r^5$	—
g_{yz}	$\gamma m (3\Delta y \Delta z)/r^5$	—
g_{zz}	$\gamma m (3\Delta z^2 - r^2)/r^5$	$\gamma m (2\Delta z^2 - r^2)/r^4$

Καθεμία από τις συνιστώσες του διανύσματος της βαρύτητας αποκρίνεται μοναδικά με το μέγεθος, το σχήμα και το πάχος των ανωμαλιών της πυκνότητας και καθεμία συμπληρώνει τη διαδικασία ερμηνείας. Ωστόσο, η T_{zz} , η κατακόρυφη προς τα κάτω συνιστώσα του τανυστή, είναι η μόνη συνιστώσα, που συνδέεται άμεσα με την γεωλογία του υπεδάφους.

Η τεχνική που εφαρμόζεται στην 3D κλισιμετρία, με δεδομένη την T_{zz} , αξιολογεί γρήγορα την πολυπλοκότητα της γεωλογίας της περιοχής, δηλαδή προσδιορίζει και χαρτογραφεί τα βασικά γεωλογικά χαρακτηριστικά της. Εφαρμόζεται (Fast Fourier Transform - FFT) για να αξιολογηθούν ποιοτικά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που σχετίζονται με το γεωλογικό υπέδαφος. Συνήθως, υψηλής συχνότητας ανωμαλίες τείνουν να είναι φτωχής προέλευσης, ενώ ανωμαλίες χαμηλής συχνότητας προκύπτουν από ένα εκτιμώμενο βάθος, του οποίου η μάζα είναι περίπου το ένα τρίτο έως ένα τέταρτο του χωρικού μήκους κύματος.

Ερμηνεία Δεδομένων Κλισιμετρίας

Οι οριζόντιες συνιστώσες T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} , & T_{yz} χρησιμοποιούνται συνήθως για τον εντοπισμό και χαρτογράφηση φωτογραμμώσεων, οι οποίες σχετίζονται με δομικές ή / και στρωματογραφικές αλλαγές ή τη γεωμετρία της περιοχής-έρευνας. Η κατακόρυφη συνιστώσα, T_{zz} , χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί το βάθος και η πρόβλεψη σύνθετων πληροφοριών, που σχετίζονται με την γεωλογία της συγκεκριμένης περιοχής. Ωστόσο, αυτά τα στοιχεία έχουν παραδοσιακά ερμηνευτεί ξεχωριστά το ένα από το άλλο και συχνά διατρέχουν τον κίνδυνο να λείπουν βασικές πληροφορίες.

Πλεονεκτήματα της βαρυτικής κλισιμετρίας

1. Μείωση Κινδύνου Εξερεύνησης.

Τα δεδομένα των διαβαθμίσεων μπορούν να μειώσουν το σφάλμα, εμπλουτίζοντας την σεισμική απεικόνιση. Το τρισδιάστατο μοντέλο εξισορροπεί μάζα και ως εκ τούτου παρέχει μια ποσοτική λύση για τη δομική διαμόρφωση, το πάχος, και τη πλευρική μεταβλητότητα της πυκνότητας. Οι μετρήσεις των κλίσεων χρησιμοποιούνται επίσης ποιοτικά για να αποκτήσουμε πολύτιμες γνώσεις για βασικά

γεωλογικά χαρακτηριστικά και να εξάγουμε πληροφορίες για την στρωματογραφία και τις φωτογραμμώσεις. Με χρήση φίλτρων είναι δυνατή η διάκριση πυριγενών χαρακτηριστικών υψηλής πυκνότητας σε διάφορα βάθη και έτσι είναι δυνατή η ερμηνεία βασαλτικής γεωλογίας, χωρίς σεισμικό έλεγχο.

2. Καλύτερη ανάλυση.

Η ανάλυση είναι πάντα καλύτερη σε ρηχά βάθη και καλύτερη ή ίση σε όλα τα βάθη, εξαιτίας του υπολογισμού της Tzz. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός καλύτερα σταθεροποιημένου GMA, το οποίο επιτρέπει την καλύτερη αποτύπωση των οριζόντιων επιταχύνσεων. Η μέτρηση της κλίσης, πολλαπλών συνιστωσών παρέχει τη δυνατότητα για περαιτέρω μείωση του θορύβου σε σύγκριση με την απλή μέτρηση της βαρύτητας.

3. Παρεμβολές πολύ χαμηλού θορύβου, που οφείλονται στις επιταχύνσεις του αεροσκάφους.

Η επιτάχυνση των οχημάτων, που μεταφέρουν βαρυτόμετρα δεν μπορεί να διαχωριστεί από τις μετρήσεις βαρύτητας εξαιτίας της οποίας υποτίθεται ότι για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, η μέση κατακόρυφη επιτάχυνση του αεροσκάφους της έρευνας θα είναι αμελητέα. Αυτές οι επιδράσεις μειώνουν την ικανότητα ανάκτησης υψηλότερων συχνοτήτων στα συμβατικά βαρυτόμετρα, ενώ στον εξοπλισμό της βαρυτικής κλισιμετρίας που αποτελείται από δύο οριζόντια τοποθετημένα βαρυτόμετρα, που συνδέονται σταθερά, τα δύο βαρυτόμετρα δέχονται τις ίδιες επιταχύνσεις, παλίρροιες γης, και των αποτελεσμάτων του γεωγραφικού πλάτους, κ.λπ. έτσι κλίση είναι η διαφορά μεταξύ των δύο βαρυτόμετρων, διαιρούμενη με την αρχική απόσταση μεταξύ τους. Πιο προχωρημένα κλισίμετρα αποτελούνται από τέσσερα βαρυτόμετρα σε διαφορετικά επίπεδα.

4. Ταχύτερη και φθηνότερη συλλογή δεδομένων.

Τα δεδομένα από τα βαρυτικά κλισίμετρα μπορούν να αποκτηθούν με μεγαλύτερο διάστιχο για ισοδύναμη ανάλυση σε σχέση με τις συμβατικές έρευνες της βαρύτητας. Επειδή, τα δεδομένα των κλισίμετρων επηρεάζονται λιγότερο από τις κάθετες επιταχύνσεις, ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η έρευνα είναι πιο περιορισμένος και οι ταχύτητες των αεροσκαφών μεγαλύτερες. Έτσι οι έρευνες με βαρυτικά κλισίμετρα είναι πιο οικονομικές από τις συμβατικές.

5. Απόκτηση δεδομένων και ερμηνεία σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Η ταχεία επανεξέταση, η ερμηνεία και η άμεση επεξεργασία των δεδομένων είναι δυνατή και αυτή η ικανότητα μπορεί να συντελέσει σχετικά με το αν απαιτείται περισσότερο ή λιγότερο λεπτομερή έρευνα, καθώς μπορεί να ληφθεί απόφαση για την επανάληψη των αναξιόπιστων ή με θόρυβο δεδομένων. Έτσι μειώνονται ο κίνδυνος για πιθανά νέα κόστη.

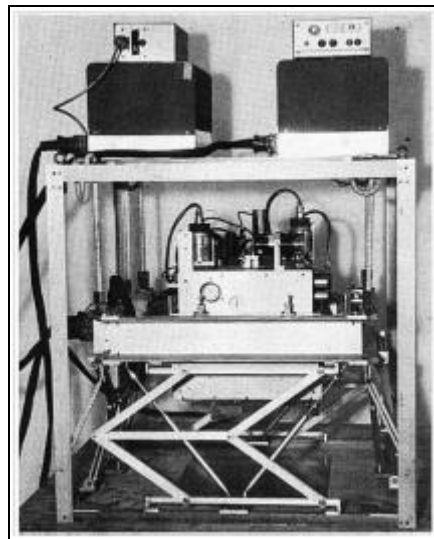
6. Αξιόπιστη ενσωμάτωση για Μοντελοποίηση με Σεισμικά δεδομένα.

Οι βαρυτικές κλίσεις επιτρέπουν την τρισδιάστατη χαρτογράφηση του μελετούμενου επιπέδου, με δυσδιάστατο σεισμικό έλεγχο. Για PSDM, μπορεί να παρέχει ένα ακριβές αρχικό μοντέλο και ως εκ τούτου, συντελεί στη μείωση του αριθμού των επαναλήψεων, του χρόνου και συνεπώς του κόστους συμμετοχής.

9. Αερομεταφερόμενη μέτρηση της βαρύτητας

9.1 Ιστορικά δεδομένα

Ήδη από τη δεκαετία του 1950, γεωφυσικοί και γεωδαίτες έψαχναν λύσεις για τη μέτρηση της βαρύτητας από τον αέρα. Η πρώτη αναφορά για μέτρηση βαρύτητας από αέρα πραγματοποιήθηκε στο Lundberg, όπου χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα, που βασίζεται στην αρχή της διαβάθμισης. Ωστόσο, η δοκιμή Lundberg δε κέρδισε τη βιομηχανία των εξερευνήσεων. Μετά την επιτυχή χρήση ενός μετρητή βαρύτητας πάνω σε υποβρύχια και πλοία στη δεκαετία του 1950, η Air Force Cambridge Research Center ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για να αναπτυχθεί ένα αερομεταφερόμενο σύστημα για μέτρηση της βαρύτητας.



Εικόνα 35: Σταθερή πλατφόρμα μέτρησης βαρύτητας (LaCoste, 1967).

Η πρώτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε το 1958 από την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ, χρησιμοποιώντας ένα LaCoste και Romberg υποστηριζόμενο από θαλάσσιο βαρυτόμετρο, με τα δεδομένα πλοήγησης να παρέχονται από ένα σύστημα Doppler στο αεροσκάφος και μια κάμερα παρακολούθησης του εδάφους. Λίγο μετά από αυτή τη δοκιμή, μια δεύτερη δοκιμή έγινε από την Fairchild Aerial Surveys. Το βαρυτόμετρο, που χρησιμοποιήθηκε ήταν και πάλι ένα LaCoste και Romberg όργανο, αλλά το αεροσκάφος ήταν εξοπλισμένο με μια κάμερα χαρτογράφησης της θέσης και ένα ραντάρ για τον προσδιορισμό του ύψους.

Τα κύρια προβλήματα για την από αέρα μέτρηση της βαρύτητας εκείνη την εποχή ήταν η πλοήγηση του αεροσκάφους, συμπεριλαμβανομένων της ταχύτητας, της ανύψωσης, και του χώρου τοποθέτησης, η επίδραση Εδνός, για τις επιταχύνσεις του αεροσκάφους στη διάρκεια της πτήσης, καθώς και η έλλειψη ενός βαρυτόμετρου, που να μπορεί να δουλέψει σε ένα δυναμικό περιβάλλον. Ωστόσο, φαίνεται ότι μια σχετικά καλή ακρίβεια περίπου 10 mGal θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση των υφιστάμενων συστημάτων πλοήγησης, με συμπληρωματικές τεχνικές ελέγχου. Επιπλέον, η χρήση μεγάλων αεροσκαφών και οι πτήσεις σε μεγάλα ύψη θα μείωναν τις μεγάλες αποκλίσεις. Η επίδραση

Eötvös, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ταχύτητα του αεροσκάφους, θεωρήθηκε να είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για τη μέτρηση της βαρύτητας από αέρα. Ωστόσο, με σωστό προγραμματισμό πτήσης, θα μπορούσαν να γίνουν ακριβείς διορθώσεις. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα βαρυτόμετρα, που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες δοκιμές ήταν προσαρμοσμένα θαλάσσια βαρυτόμετρα, που μπορούσαν να εξομαλύνουν οριζόντιες επιταχύνσεις.

Οι δοκιμές στις αρχές της δεκαετίας του 1960 έγιναν με βαρυτόμετρα, που εγκαθίστανται στα φτερά αεροσκαφών. Η πρώτη επιτυχής μέτρηση της βαρύτητας από ένα ελικόπτερο, διεξήχθη το 1965 από το αμερικανικό Ναυτικό Ωκεανογραφικό Γραφείο, που χρησιμοποίησε έναν Lacoste - Romberg Sea Gravimeter. Μια πιο ενδελεχή δοκιμή ακολούθησε το 1966, παρέχοντας δεδομένα βαρύτητας με ακρίβεια περίπου 3 mgal, που οδήγησε στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος μέτρησης βαρύτητας από ελικόπτερο. Τα όργανα αποτελούνταν από βαρυτόμετρο LaCoste - Romberg, λείζερ υψομέτρου, φωτογραφική μηχανή και σύστημα πλοήγησης Hiran. Τα πλεονεκτήματα του ελικόπτερου συγκριτικά με το αεροσκάφος είναι η ικανότητα καλύτερης παρακολούθησης του εδάφους, η αυξημένη χωρική ανάλυση, που προκύπτει από την πτήση σε χαμηλότερο υψόμετρο και χαμηλότερη ταχύτητα και το γεγονός ότι ένα ελικόπτερο επηρεάζεται λιγότερο από τις τυρβοειδείς συνθήκες από ό, τι τα περισσότερα άλλα είδη των αεροσκαφών. Μόνο μειονέκτημα του είναι το μικρό εύρος κάλυψης.

Παρά τις βελτιώσεις στο σχεδιασμό του συμβατικού συστήματος βαρύτητας και την ανάπτυξη των ραντάρ υψηλής ανάλυσης για την κάθετη επιτάχυνση στη δεκαετία των 80', η εναέρια μέτρηση της βαρύτητας δεν ήταν πλήρως λειτουργική μέχρι την εισαγωγή του GPS. Με τη χρήση διαφορικού GPS (DGPS) φάνηκαν οι προοπτικές για λύση των όποιων προβλημάτων πλοήγησης.

Ο αντίκτυπος της νέας τεχνολογίας οδήγησε σε δύο σημαντικές εξελίξεις στην από αέρα μέτρηση της βαρύτητας. Η πρώτη ήταν η τελειοποίηση των υφιστάμενων συστημάτων βαθμωτών βαρυτομετρικών συστημάτων, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, αφενός, για τη γεωφυσική έρευνα και αφετέρου, για τις μεγάλες περιφερειακές έρευνες, όπως απαιτείται στη γεωδαισία. Η δεύτερη εξέλιξη ήταν ο συνδυασμός του GPS με τις αδρανειακές μονάδες μέτρησης (IMU). Μια από τις πρώτες μεγάλης κλίμακας έρευνες από αέρα για μέτρηση βαρύτητας ήταν η αποστολή πάνω από τη Γροιλανδία το 1991 και το 1992, που εκτελέστηκε από το Ναυτικό Ερευνητικό Εργαστήριο (NRL), σε συνεργασία με την Δανική Υπηρεσία Έρευνας και Κτηματολογίου (KMS).

Άλλα παραδείγματα των ερευνών μεγάλων περιοχών είναι η βαρυτική διασκόπηση στην Ελβετία, από κοινοπραξία μεταξύ του Ελβετικού Ομοσπονδιακού Ινστιτούτου Τεχνολογίας και της LaCoste και Romberg Gravity Inc το 1992, οι έρευνες της βαρύτητας πάνω από το στρώμα πάγου της Δυτικής Ανταρκτικής (1991-1997) από το Lamont -Doherty Earth Observatory, σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου του Τέξας. Πρόσφατα μεγάλα έργα είναι έρευνες για το εθνικό γεωειδές και οι περιφερειακές έρευνες της Μαλαισίας (2002-2003), Μογγολία (2004-2005) και την Αιθιοπία (2006-2007), που εκτελέστηκαν από την DNSC (Olesen and Forsberg, 2007b) και το ερευνητικό κέντρο της Ταϊβάν.

Οι αναφερόμενες ακρίβειες αυτών των αποστολών ήταν 5-2 mgal σε 5-6 km χωρική ανάλυση. Στη δεκαετία του ενενήντα, διαφορετικά εναλλακτικά συστήματα αναπτύχθηκαν, με βάση το συνδυασμό της αδρανειακής τεχνολογίας και του DGPS. Το Αδρανειακό Κέντρο Τεχνολογίας (ITC) στη Μόσχα εφάρμοσε και δοκίμασε ένα αδρανειακό σταθεροποιημένο σύστημα, σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Calgary και το Canagran Research Ltd στο Κάλγκαρι. Ένα παρόμοιο σύστημα, που ονομάζεται

AIRGrav, αναπτύχθηκε από την Sander Geophysics Ltd. και τα δύο συστήματα δίνουν εκτιμήσεις με ακρίβεια 0,5 - 1, 5 mgal.

Η χρήση αδρανειακού συστήματος πλοήγησης (SINS) για εναέρια μέτρηση της βαρύτητας έγινε πρώτα από το Πανεπιστήμιο του Κάλγκαρι (βλέπε π.χ. Schwarz et al. (1991)), όπου η ανάπτυξη και οι δοκιμές συνεχίστηκαν μέχρι τις αρχές της επόμενης δεκαετίας. Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι το μικρότερο μέγεθος και το σχετικά χαμηλό κόστος. Τα αποτελέσματα της πρώτης εναέριας δοκιμής το 1995, χρησιμοποιώντας ένα αδρανειακό σύστημα Honeywell LASEREF III, έδειξαν ότι η σχετική βαρύτητα μπορεί να επιτευχθεί με ακρίβεια 2-3 mgal στο μισό μήκος κύματος από τα 5 km (Wei και Schwarz, 1998).

Μια σύγκριση του ενός αδρανειακού συστήματος INS με του LaCoste - Romberg βαρυτόμετρου, έδειξε ότι και τα δύο συστήματα έχουν ίδια, αλλά το σύστημα LCR έδειξε μια καλύτερη σταθερότητα μακροπρόθεσμα. Αργότερα, ο Bruton έδειξε ότι με το ίδιο σύστημα (SINS) η προσέγγιση μπορεί να αποδώσει ακρίβειες 1,5 mgal σε μισό-μήκος κύματος από τα 2 km και 2,5 mgal σε μισό-μήκος κύματος των 1,4 χιλιομέτρων, καταδεικνύοντας τις δυνατότητες αυτής της προσέγγισης για υψηλής ανάλυσης εφαρμογές. Η προσέγγιση (SINS) επίσης επιτρέπει την επιλογή του φορέα βαρύτητας, αλλά και σε αυτή την περίπτωση οι απαιτήσεις του συστήματος είναι πιο αυστηρές. Παρ' όλα αυτά, οι Jekeli και Kwon (1999) εισήγαγαν το διάνυσμα της βαρύτητας σε ένα επίπεδο ακρίβειας 7-8 mgal για την οριζόντια συνιστώσα και 3 mgal για την κάθετη συνιστώσα χρησιμοποιώντας ίδια δεδομένα με αυτά των Wei και Schwarz (1998).

9.2 Αρχές της εναέριας μέτρησης της βαρύτητας

Κατ' αρχήν, τα βαρυτόμετρα είναι ευαίσθητα επιταχυνσιόμετρα. Εάν ένα επιταχυνσιόμετρο τίθεται στάσιμο στη γήινη επιφάνεια, η οποία είναι επίπεδη (δηλαδή ο ευαίσθητος άξονας συμπίπτει με τη κατεύθυνση του διανύσματος βαρύτητας), τότε το μέγεθος της βαρύτητας μπορεί να καθοριστεί άμεσα. Εντούτοις, η κατάσταση γίνεται πιο σύνθετη όταν κινείται το επιταχυνσιόμετρο, δεδομένου ότι ένα επιταχυνσιόμετρο δεν μπορεί να διακρίνει μεταξύ των κινηματικών και των επιταχύνσεων της βαρύτητας και επειδή το όργανο δεν μπορεί να διατηρηθεί πάνω από ένα επίπεδο. Κατά συνέπεια, στην από αέρα μέτρηση βαρύτητας, η λύση των ακόλουθων δύο προβλημάτων είναι αναγκαία:

- Προσανατολισμός ή σταθεροποίηση αισθητήρων σύμφωνα με τη δυναμική αεροσκαφών.
- Διαχωρισμός της βαρυτικής και μη-βαρυτικής επιτάχυνσης.

Υπάρχουν διάφοροι πιθανοί τρόποι να λυθεί το πρώτο πρόβλημα. Η χρήση μιας αποσβενύμενης πλατφόρμας δύο αξόνων, όπως το βαρυτόμετρο LaCoste - Romberg Air Sea, είναι πιο πολύ καθιερωμένη μέθοδος για τη σταθεροποίηση. Η πλατφόρμα σταθεροποιείται μηχανικά, χρησιμοποιώντας τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα. Η περίοδος απόσβεσης της πλατφόρμας γίνεται σε τέσσερα λεπτά για τις αερομεταφερόμενες εφαρμογές. Αυτό σημαίνει ότι οι οριζόντιες επιταχύνσεις, για παρατεταμένες κλίσεις, πρέπει να παρακολουθούνται.

Θεωρητικά, η επίδραση των οριζόντιων επιταχύνσεων εξαλείφεται πλήρως κατά τη χρησιμοποίηση μιας πλατφόρμας συντονισμένης κατά Schuler σε μια περίοδο απόσβεσης 84.4 λεπτών (περίοδος Schuler). Εντούτοις, μια τόσο μεγάλη περίοδος απαιτεί εξαιρετικά ακριβή γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα, που δεν θα παρουσιάζουν σφάλματα κατά τη διάρκεια της περιόδου. Ένα παράδειγμα

συστημάτων, που είναι συντονισμένα κατά Schuler και έχουν τρεις άξονες, είναι το GT-1A βαρυτόμετρο, αναπτυγμένο από τις Joint Stock Company Gravimetry Technologies στη ρωσική ομοσπονδία και διατίθεται εμπορικά από την Canadian Micro Gravity Pty Ltd και την AIRGrav που είναι ανεπτυγμένο από τη Sander Geophysics Limited.

Ένα εναλλακτικό σύστημα σταθεροποιημένης πλατφόρμας είναι το Strapdown Inertial Navigation System (SINS), που αποτελείται από τρία ορθογώνια επιταχυνσιόμετρα και ένα σετ τριών γυροσκοπίων. Σε αυτή την περίπτωση η μηχανική σταθεροποίηση αντικαθίσταται με υπολογιστικές μεθόδους. Οι προσεγγίσεις για τη σταθεροποίηση παρουσιάζονται σχηματικά σε σχήμα παρακάτω.

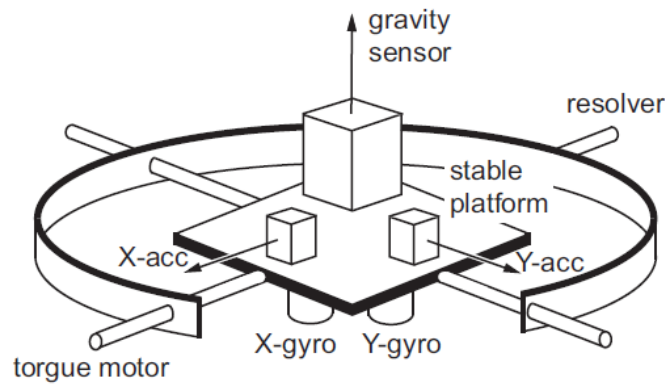
Ο διαχωρισμός της επιτάχυνσης λόγω βαρύτητας και λόγω αδρανούς επιτάχυνσης γίνεται δυνατός με τον υπολογισμό της διαφοράς της δύναμης, που μετριέται από ένα επιταχυνσιόμετρο και την έξοδο του ενός συστήματος, που παρέχει την αδρανή επιτάχυνση. Μέχρι την εισαγωγή του GPS, όλα τα αερομεταφερόμενα συστήματα χρησιμοποιούσαν τη DGPS για να καθορίσουν την κίνηση των αεροσκαφών. Εντούτοις, ένας υψομετρητής με laser ή ένας υψομετρητής με radar μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί, εάν απαιτείται μόνο η κάθετη επιτάχυνση αεροσκαφών. Το τελικό σύστημα, που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την ποσότητα που πρέπει να μετρηθεί και τις μετρούμενες εφαρμογές. Η ακόλουθη ταξινόμηση συνηθίζεται στην μέτρηση της βαρύτητας από τον αέρα:

- Βαθμωτό βαρυτόμετρο.
- Διανυσματικό βαρυτόμετρο.
- Βαρυτικό κλισίμετρο.

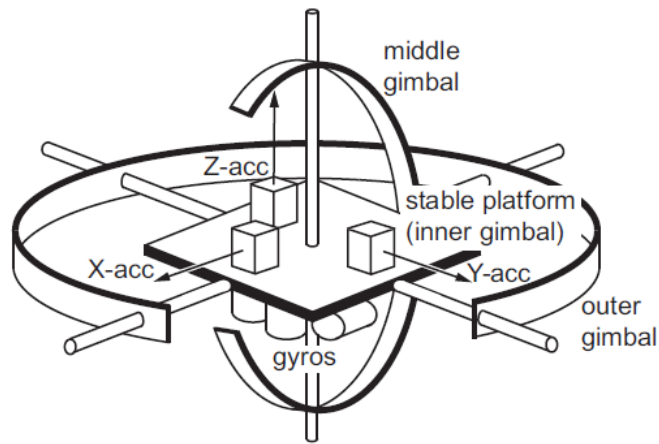
Στο βαθμωτό βαρυτόμετρο, το μέγεθος του διανύσματος βαρύτητας καθορίζεται. Αυτό μπορεί να γίνει, χρησιμοποιώντας μια σταθερή πλατφόρμα ή με τη χρησιμοποίηση ενός συστήματος Strapdown. Η τελευταία περίπτωση αναφέρεται συχνά ως Strapdown INS Scalar Gravimetry (SISG) , οπότε σ' αυτή την περίπτωση μας ενδιαφέρει μόνο η κάθετη συνιστώσα του διανύσματος της βαρύτητας.

Ένα εναλλακτικό σχέδιο είναι να χρησιμοποιηθεί μια τριάδα τριών ορθογώνιων επιταχυνσιόμετρων για να λάβει το μέγεθος της βαρύτητας από τη διαφορά μεταξύ του συγκεκριμένου διανύσματος δύναμης και του διανύσματος επιτάχυνσης των αεροσκαφών. Επειδή, ο απόλυτος προσανατολισμός των επιταχυνσιόμετρων όσον αφορά την τοπική κατακόρυφο δεν απαιτείται σε αυτήν την περίπτωση, αυτή η προσέγγιση καλείται Rotation Invariant Scalar Gravimetry (RISG). Η προσέγγιση αυτή εξερευνήθηκε αρχικά από το Czompo (1994) και συγκρίθηκε αργότερα με SISG από τους Wei και Schwarz (1997). Στο διανυσματικό βαρυτόμετρο, οι τρεις συνιστώσες του διανύσματος της βαρύτητας καθορίζονται με συστήματα που χρησιμοποιούν την αδρανή τεχνολογία. Παραδείγματα αποτελούν το FALCON gravity gradiometer της BHP Billiton (Lee, 2001) και το Air-FTG gradiometer system που χρησιμοποιείται από την Bell Geospace (Murphy, 2004).

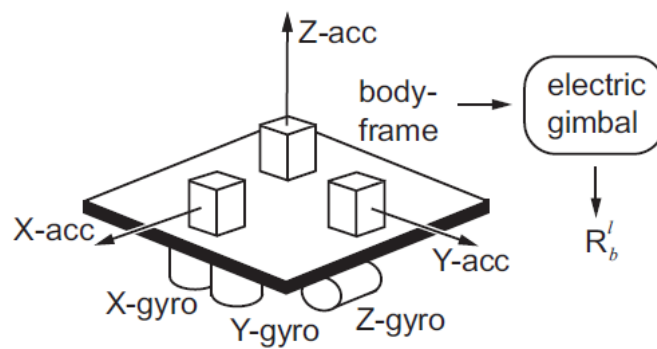
Τα συστήματα μέτρησης της βαθμίδας (gradiometer systems) είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητα στα σφάλματα θέσης του GPS και τα αποτελέσματα που δίνουν είναι με μεγαλύτερη ακρίβεια και ανάλυση σε σύγκριση με το βαθμωτό βαρυτόμετρο και το διανυσματικό βαρυτόμετρο. Γι' αυτό το λόγω χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα στη βιομηχανία του πετρελαίου. (Bell et al, 1997)



Εικόνα 36: Σύστημα πλατφόρμας δύο αξόνων (after Schwarz and Li, 1997).



Εικόνα 37: Σύστημα πλατφόρμας συντονισμένη κατά Schuler (after Schwarz and Li, 1997).



Εικόνα 38: SINS (after Schwarz and Li, 1997).

9.3 Μαθηματικά μοντέλα

Η μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων, και κυρίως της βαρύτητας, της στερεάς Γης πραγματοποιείται με τρεις βασικούς τρόπους, που κατά σειρά σπουδαιότητας, είναι η συλλογή και ερμηνεία επιστημονικών παρατηρήσεων, που γίνονται απ' ευθείας στη φύση, η θεωρητική (φυσικομαθηματική) έρευνα και η πραγματοποίηση πειραμάτων. Σ' αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τα μαθηματικά μοντέλα, που χρησιμοποιούνται για την μαθηματική επεξεργασία της βαρύτητας.

Μοντέλα μέτρησης

Μετά την απομάκρυνση των ανωμαλιών μεγάλης κλίμακας και τον προσδιορισμό της καθαρής τοπικής ανωμαλίας βαρύτητας, που οφείλεται στην ανώμαλη κατανομή της μάζας για την οποία ενδιαφερόμαστε, ακολουθεί η γεωφυσική ερμηνεία της ανωμαλίας αυτής, δηλαδή ο καθορισμός των διαστάσεων, της πυκνότητας και του βάθους του σώματος στο οποίο οφείλεται η παρουσία της ανωμαλίας βαρύτητας, που εμφανίζεται στον χάρτη. Δυστυχώς, όμως, δεν μπορεί να δοθεί μονοσήμαντη λύση στο πρόβλημα. Είναι δηλαδή δυνατό περισσότερες της μιας διαφορετικές κατανομές πυκνότητας να προκαλούν την ίδια μορφή βαρυτομετρικών ανωμαλιών στην επιφάνεια της γης. Οι βαρυτομετρικές ανωμαλίες επιδέχονται ποιοτική και ποσοτική ερμηνεία.

Η ποιοτική ερμηνεία παρέχει πληροφορίες για την ύπαρξη καταρχήν της ανώμαλης κατανομής της μάζας στο υπέδαφος και εντοπίζει χονδρικά την θέση της, που είναι χονδρικά η περιοχή, που η ανωμαλία βαρύτητας παρουσιάζει ακρότατο (μέγιστο ή ελάχιστο). Σε πολλές περιπτώσεις είναι επίσης δυνατό η ποιοτική ερμηνεία να δώσει και κάποιες πληροφορίες σχετικά με το σχήμα της μάζας, που προκαλεί την ανωμαλία.

Με την ποσοτική ερμηνεία προσδιορίζονται ποσοτικά ορισμένες παράμετροι της μάζας, που προκαλεί την ανωμαλία, όπως είναι το βάθος ταφής στο υπέδαφος, οι διαστάσεις της, κλπ. Οι μέθοδοι ποσοτικής ερμηνείας διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες μεθόδους.

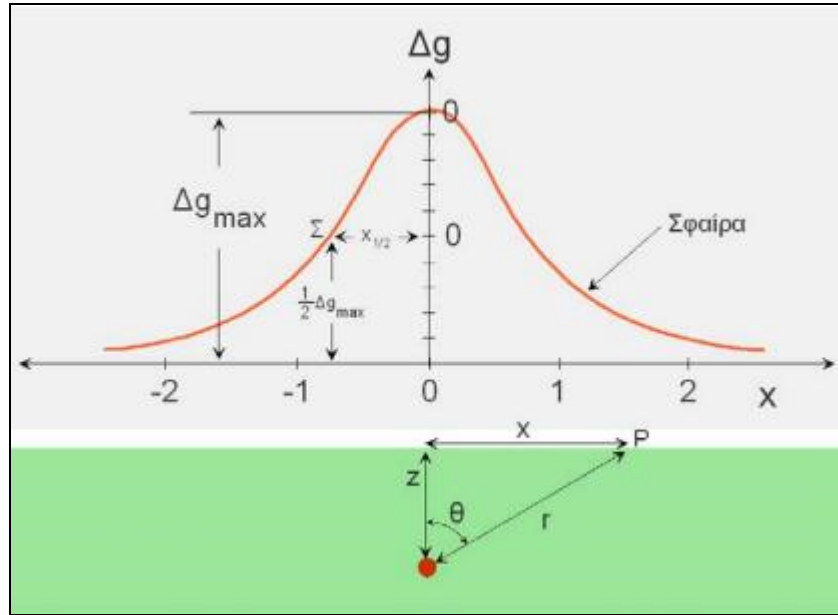
9.3.1 Άμεσες μέθοδοι ερμηνείας ανωμαλιών βαρύτητας

Κατά την εφαρμογή των μεθόδων αυτών, οι οποίες είναι ημιποσοτικές, είναι δυνατόν να προσδιορισθούν άμεσα ορισμένες παράμετροι της δομής του σώματος, που προκαλεί την ανωμαλία βαρύτητας στην επιφάνεια, από την μελέτη ορισμένων χαρακτηριστικών της ανωμαλίας. Οι πιο συνηθισμένες από τις παραμέτρους αυτές είναι το μέγιστο βάθος της οροφής του σώματος, που προκαλεί την ανωμαλία, η μάζα της δομής και το πάχος της. Στα πλαίσια αυτής διατριβής θα περιοριστούμε στην περιγραφή δύο τεχνικών άμεσου προσδιορισμού του βάθους ταφής της οροφής του σώματος, που προκαλεί την ανωμαλία βαρύτητας.

Με τις ως άνω τεχνικές, οι οποίες παρέχουν ημιποσοτικά στοιχεία, είναι δυνατόν να καθορίσουμε αμέσως το μέγιστο βάθος της οροφής της δομής (σώματος), που προκαλεί την βαρυτική ανωμαλία, από την μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών της μορφής της ανωμαλίας. Το μέγιστο βάθος z της οροφής της δομής μπορεί να προσδιορισθεί όταν γνωρίζουμε την μεταβολή της βαρυτομετρικής ανωμαλίας Δg κατά μήκος ορισμένης οριζόντιας διεύθυνσης x , η οποία περνάει από το σημείο όπου η

ανωμαλία παρουσιάζει την μέγιστη τιμή Δg_{\max} . Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγιστο βάθος z .

Στο σχήμα, που ακολουθεί έχουμε την γραφική παράσταση της ανωμαλίας βαρύτητας Δg , που προκαλεί η υπεδιαφική δομή στην επιφάνεια της γης κατά μήκος ορισμένης διεύθυνσης x . Όπως από το σχήμα προκύπτει, το σημείο της καμπύλης μεταβολής της ανωμαλίας Σ στο οποίο η ανωμαλία έχει το ήμισυ της μέγιστης τιμής της $\frac{1}{2} \Delta g_{\max}$ που ορίζει μία απόσταση (τετμημένη του σημείου), που ονομάζουμε $X_{1/2}$.



Εικόνα 39: Σκαρίφημα της βαρυτομετρικής ανωμαλίας όπου φαίνεται ο τρόπος προσδιορισμού της απόστασης $X_{1/2}$, που αντιστοιχεί στο ήμισυ της μέγιστης τιμής Δg_{\max} της ανωμαλίας (Λούης, 2004).

Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα είδαμε ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας σε σημείο P της επιφάνειας της γης δίδεται από τη παρακάτω σχέση, όπου με το γινόμενο $V \cdot \Delta \rho$ του όγκου V του σώματος επί την διαφορά πυκνοτήτων $\Delta \rho$ του σώματος του περιβάλλοντος μέσου, έχουμε αντικαταστήσει την μάζα m του σώματος, που προκαλεί την ανωμαλία σαν το γινόμενο.

$$\Delta g_r = \frac{Gm}{r(x,z)^2} = \frac{GV\Delta\rho}{r(x,z)^2} \quad (9.1)$$

Στην απόσταση $x = 0$, όπου η ανωμαλία αποκτά την μέγιστη τιμή Δg_{\max} , η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\Delta g_{\max} = \frac{GV\Delta\rho}{r(z)^2} \quad (9.2)$$

Στην απόσταση $X_{1/2}$, όπου η ανωμαλία έχει τιμή $\frac{1}{2} \Delta g_{\max}$ η σχέση (9.1) γράφεται:

$$\frac{1}{2} \Delta g_{\max} = \frac{GV\Delta\rho}{r(X_{1/2},z)^2} \quad (9.3)$$

διαίρωντας κατά μέλη τις (1) και (2) λαμβάνουμε τελικά ότι:

$$r(x_{1/2}, z) = \sqrt{2} * r(z) \quad (9.4)$$

από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι τελικά το μέγιστο βάθος ταφής z είναι συνάρτηση μόνο της απόστασης $X_{1/2}$, είναι δηλαδή:

$$z = f(x_{1/2})$$

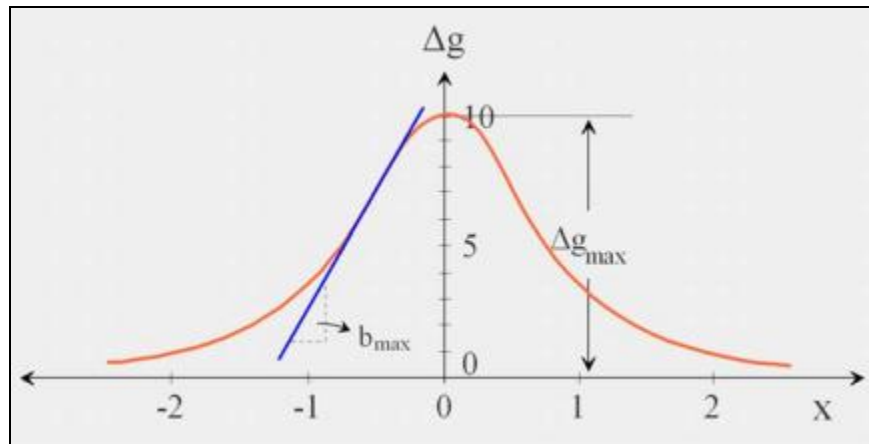
Είναι συνεπώς δυνατόν, προσδιορίζοντας γραφικά την απόσταση $X_{1/2}$, να υπολογίσουμε από την (4) το μέγιστο βάθος z . Όταν η υπεδαφική δομή, που προκαλεί την ανωμαλία βαρύτητας έχει συγκεκριμένη απλή γεωμετρική μορφή τότε η σχέση (4) λαμβάνει συγκεκριμένη απλή ποσοτική μορφή. Όπως θα δείξουμε στις επόμενες παραγράφους όταν η υπεδαφική δομή έχει την μορφή σφαίρας τότε η σχέση (4) λαμβάνει την συγκεκριμένη μορφή:

$$z = 1.305 * x_{1/2}$$

ενώ στη περίπτωση, που η υπεδαφική δομή προσομοιάζεται με οριζόντιο κύλινδρο τότε η (4) λαμβάνει την μορφή

$$z = x_{1/2}$$

Ένας δεύτερος τρόπος προσδιορισμού του μέγιστου βάθους ταφής προκύπτει από τον υπολογισμό της μέγιστης κλίσης της καμπύλης μεταβολής της ανωμαλίας.



Εικόνα 40: Σκαρίφημα της βαρυτομετρικής ανωμαλίας όπου φαίνεται ο τρόπος προσδιορισμού της μέγιστης κλίσης b_m της καμπύλης μεταβολής της ανωμαλίας (Λούης, 2004).

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα εάν η μέγιστη κλίση της καμπύλης είναι b_m τότε το μέγιστο βάθος z του σώματος θα δίδεται από τη σχέση:

$$z = 0.86 \frac{\Delta g_{max}}{b_m} \quad (9.5)$$

9.3.2 Έμμεσες μέθοδοι ερμηνείας ανωμαλιών βαρύτητας

Στις έμμεσες μεθόδους ερμηνείας των βαρυτομετρικών ανωμαλιών εφαρμόζουμε συνήθως την ακόλουθη διαδικασία: Υπολογίζουμε με προσεγγιστικές μαθηματικές μεθόδους την αναμενόμενη θεωρητική ανωμαλία βαρύτητας (απόκριση) Δg_θ , που προκαλούν στην επιφάνεια της γης, σύνθετες δομές (μμοντέλα) με πολύπλοκα σχήματα, που παρουσιάζουν διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho$ με το υλικό μέσο, που τις περιβάλλει, και προσομοιάζουν την μορφή της υπεδάφικης δομής, που προκαλεί την πραγματική ανωμαλία βαρύτητας Δg_π , που έχει προκύψει από τις μετρήσεις μας στο πεδίο (πειραματική ανωμαλία). Στη συνέχεια συγκρίνουμε την θεωρητική ανωμαλία Δg_θ με την πειραματική Δg_π και την παρατηρούμενη απόκλιση τιμών την αποδίδουμε στην μη κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου, που επιλέξαμε να αντιπροσωπεύσει το σώμα, που προκαλεί την πειραματική ανωμαλία βαρύτητας.

Οι παράμετροι, που χαρακτηρίζουν το μοντέλο είναι το βάθος ταφής του, οι διαστάσεις του και η διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho$, που παρουσιάζει με το υλικό μέσο, που το περιβάλλει. Στην συνέχεια “πειράζουμε” κατάλληλα μία ή περισσότερες από τις παραμέτρους του μοντέλου και υπολογίζουμε μαθηματικά την νέα του απόκριση Δg_θ με σκοπό να επιτύχουμε καλύτερη συσχέτιση της νέας Δg_θ με την πειραματική Δg_π . Η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται, όπου κάθε φορά βελτιώνουμε το μοντέλο πειράζοντας το κατάλληλα, με σκοπό το σφάλμα της απόκλισης των Δg_θ και Δg_π να γίνει μικρότερο κάποιου της τιμής που έχουμε επιλέξει. Στη περίπτωση αυτή λέμε ότι έχει επέλθει σύγκλιση της πειραματικής με την θεωρητική ανωμαλία. Το μοντέλο του οποίου οι παράμετροι επέφεραν την σύγκλιση έτσι εκφράζεται η επικρατούσα υπεδάφικη δομή στη θέση του πειράματος. Για μοντέλα προσομοίωσης με απλές γεωμετρικές δομές όπως για παράδειγμα μοντέλα με μορφή σφαίρας, κατακόρυφου ή οριζόντιου κυλίνδρου, κατακόρυφης μετάπτωσης κλπ. Οι θεωρητικές τους αποκρίσεις υπολογίζονται με αναλυτικές μαθηματικές μεθόδους.

9.4 Εφαρμογές και ευκαιρίες

Οι μετρήσεις της βαρύτητας από τον αέρα χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές στη γεωδαισία και στη γεωφυσική. Αν και οι αερομεταφερόμενες αποστολές μπορούν να εξυπηρετήσουν περισσότερες από μια εφαρμογές. Το σχέδιο μιας αποστολής περιλαμβάνει τον τύπο μελέτης και ακρίβειας που απαιτείται, την ανάλυση, την κάλυψη της περιοχής, την πορεία της πτήσης, και την επιλογή της πλατφόρμας.

9.4.1 Γεωδαιτικές εφαρμογές

Στη γεωδαισία, μια από τις κύριες εφαρμογές των αερομεταφερόμενων κλισίμετρων είναι ο τοπικός προσδιορισμός του γεωειδούς. Το γεωειδές, που ορίζεται ως η ισοδυναμική επιφάνεια του πεδίου της βαρύτητας στο μέσο επίπεδο της θάλασσας, χρησιμοποιείται ως επιφάνεια αναφοράς για τα ύψη. Ο προσδιορισμός γεωειδούς από τα στοιχεία της βαρύτητας που έχουν μετρηθεί από τον αέρα, περιλαμβάνει την αναπαράσταση των δεδομένων από την εναέρια αποστολή, σε μια επίπεδη επιφάνεια και χρησιμοποιώντας σε συνδυασμό με άλλες πηγές βαρύτητας για να υπολογιστεί η ακριβής επιφάνεια του γεωειδούς. Όταν συνδυάζεται με τις ακριβείς πληροφορίες χαμηλής συχνότητας που συλλέγουμε από τη δορυφορική μέτρηση βαρύτητας το γεωειδές μπορεί να καθοριστεί από αερομεταφερόμενα κλισίμετρα με ακρίβεια 2-5 εκατοστών σε ένα επίπεδο 5-10 km. Παραδείγματα, μεγάλων αποστολών, όπου αερομεταφερόμενα κλισίμετρα έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς, είναι οι εκστρατείες στη Γροιλανδία από το Ερευνητικό Εργαστήριο Ναυτικού (NRL) και η πρόσφατη έρευνα της βαρύτητας από αέρα από μια συνεργασία των πανεπιστημίων από το Ταιβάν και του δανικού εθνικού διαστημικού κέντρου το 2004

και 2005. Μια άλλη εφαρμογή είναι η κάλυψη των πολικών και άλλων απομονωμένων περιοχών, που στερούνται από ακριβή στοιχεία βαρύτητας, για τη σύνταξη υψηλής ευκρίνειας προτύπων της γήινης βαρύτητας, όπως το πρότυπο EIGEN GL04c (Forste, 2008) και το πρόσφατα δημοσιευμένο πρότυπο EGM2008 (Pavlis, 2008).

Οι γεωδαιτικές αερομεταφερόμενες αποστολές χαρακτηρίζονται από μεγάλη διαδρομή πτήσης με σχετικά υψηλές ταχύτητες πτήσης, προκειμένου να καλύψουν τις μεγάλες περιοχές, σε υψηλό υψόμετρο πτήσης για να ελαχιστοποιηθούν τυχόν αναταραχές. Η οργάνωση, που χρησιμοποιείται στις γεωδαιτικές έρευνες αποτελείται συνήθως από τα παραδοσιακά κλιμακωτά κλισίμετρα, όπως το LCR βαρυτόμετρο, το οποίο συνδυάζει και το αεροθαλάσσιο με DGPS.

9.4.2 Γεωφυσικές εφαρμογές

Στον τομέα της γεωφυσικής, τα αερομεταφερόμενα κλισίμετρα χρησιμοποιούνται κυρίως για τοπικές γεωλογικές μελέτες και για έρευνες ορυκτών πόρων. Οι απαιτήσεις για τις γεωφυσικές εφαρμογές είναι απαριθμημένες στον παρακάτω πίνακα 2.1. Με την τρέχουσα ακρίβεια και την ανάλυση των αερομεταφερόμενων κλισίμετρων σε επίπεδο των 1-2 mGal για 3-5 km, καλύπτονται οι απαιτήσεις για τοπικές γεωλογικές μελέτες, αλλά η χρήση τους για την εξερεύνηση των ορυκτών αποθεμάτων είναι περιορισμένη. Αυτό παρουσιάζεται επίσης στο σχήμα 2.3, από το οποίο γίνεται σαφές ότι ακόμη και η δεκαπλάσια βελτίωση του GPS δεν θα ήταν επαρκής.

Σε σύγκριση ενός βαθμωτού με ένα διανυσματικό κλισίμετρο, η εφαρμογή της εναέριας μέτρησης της βαρύτητας είναι πολλά υποσχόμενη, επειδή οι ανωμαλίες των διαβαθμίσεων της βαρύτητας απεικονίζονται στα όρια των πηγών παρά στην κύρια μάζα. Η εικόνα 48 καταδεικνύει ότι ο θόρυβος ενός κλισίμετρου (gradiometer) το σύστημα πρέπει να είναι περίπου 1 Eötvös RMS για μήκη κύματος 50-100 μ.. Μια τέτοια ακρίβεια και ανάλυση αποτελεί πρόβλημα-πρόκληση, αλλά εργαστηριακές δοκιμές διάφορων οργάνων που είναι υπό ανάπτυξη έχουν δείξει ότι αυτό μπορεί να είναι εφικτό στον κοντινό μέλλον. Οι γεωφυσικές έρευνες για τους ορυκτούς πόρους γίνονται με χαμηλές ταχύτητες και σε μικρές περιοχές, και τα διαστήματα (γραμμές πτήσεων), είναι συνήθως πολύ πυκνότερο απ' ό,τι για τις περιφερειακές έρευνες.

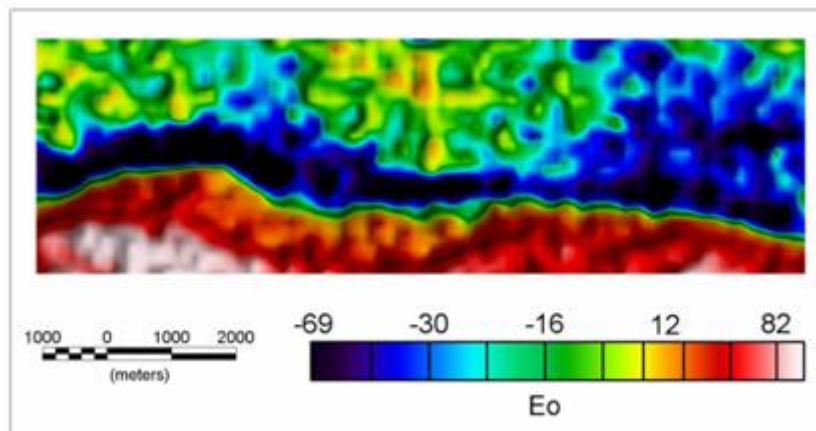
Εφαρμογές της βαρυτικής Κλισιμετρίας

Μέχρι τον Οκτώβριο του 2005, τα συστήματα Falcon είχαν πετάξει συνολικά 1 εκατομμύριο χιλιόμετρα ερευνών, για εξερεύνηση ορυκτών. Μέχρι σήμερα, πολλά περισσότερα χιλιόμετρα θα έχουν εξερευνηθεί με τα συστήματα Air-FTG και FTGeX. Είναι σαφές ότι η αερομεταφερόμενη βαρυτική κλισιμετρία αποτελεί πλέον ένα βασικό μέρος των προσπαθειών για εξερεύνηση ορυκτών. Η αερομεταφερόμενη βαρυτική κλισιμετρία έχει χρησιμοποιηθεί σε εξερευνήσεις για ένα εύρος κοιτασμάτων και εναποθέσεων ως μέσο της άμεσης ανίχνευσης ή βελτίωσης της ήδη υπάρχουσας γεωλογικής χαρτογράφησης. Σε αυτό το μέρος, περιγράφουμε μερικές από αυτές τις εφαρμογές, με κάποια παραδείγματα ερευνών που έχουν υλοποιηθεί σύστημα Falcon. Όπως, η έρευνα στην Ekati για διαμάντια, η έρευνα στην Candelaria για χαλκό και η έρευνα στο Musgrave για νικέλιο.

Άνθρακας

Η χρήση της αερομεταφερόμενης βαρυτικής κλισιμετρίας στη χαρτογράφηση κοιτασμάτων άνθρακα στη κοιλάδα Latrobe, στη νοτιοανατολική Αυστραλία περιγράφηκε από τον Mahanta (2003). Η φλέβα

άνθρακα, που χαρτογραφήθηκε ως κάθετη κλίση της βαρύτητα όπως φαίνεται στην εικόνα 40, ολοκληρώνεται όπου εκτίθεται κατά μήκος της νότιας άκρης και όπου η κάθετη κλίση βαρύτητας φθάνει σε χαμηλότερες τιμές. Η φλέβα βυθίζεται έπειτα ελαφρώς στα βορειοδυτικά κάτω από την κάλυψη αμμοχάλικου, με συνέπεια μια βαθμιαία μείωση του εύρους του σήματος της βαρύτητας. Χαρακτηριστικά πάχη αυτής της φλέβας είναι περίπου 30-50 m στις εμβυθίσεις λίγο κάτω από τις 10°. Η ανιχνευσιμότητα των φλεβών άνθρακα ενονοείται γενικά από μεγαλύτερα πάχη της φλέβας. Ο Mahanta (2003) δείχνει ότι το Falcon AGG μπόρεσε να ανιχνεύσει φλέβες, πάχους μεγαλύτερου των 10 m σε εμβυθίσεις μεγαλύτερες από 10°.



Εικόνα 41: Χαρτογράφηση μιας Φλέβας χρυσού στη κοιλάδα Latrobe με τη αερομεταφερόμενη βαρυτική κλισιμετρία (Fugro Presentation, 2007).

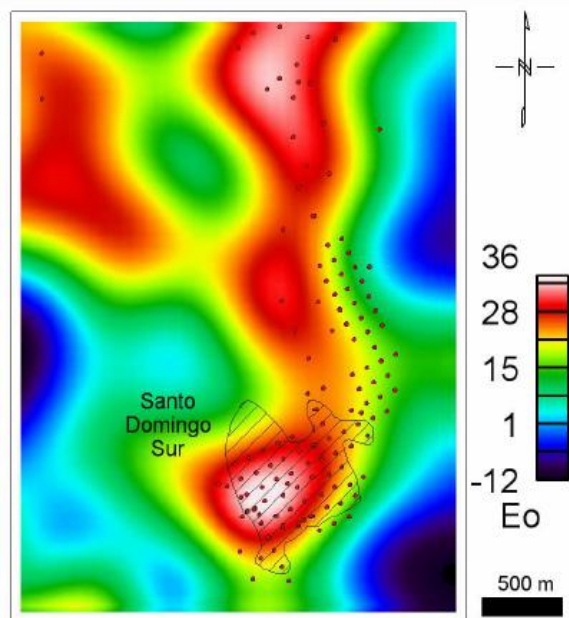
Χαλκός (IOCG)

Ένας προφανής άμεσος στόχος ανίχνευσης για την αερομεταφερόμενη βαρυτική κλισιμετρία αποτελούν οι συγκεντρώσεις χαλκού – σιδήρου με παρουσία χρυσού και αποτελούν τα λεγόμενα Iron Oxide Copper Gold κοιτάσματα. Οι έρευνες με Falcon AGG έχουν ανιχνεύσει επιτυχώς εναποθέσεις κοιτασμάτων σε Ernest Henry και Prominent Hill. Ωστόσο, η σημαντικότερή είναι η έρευνα στο Candelaria της Χιλής, που οδήγησε στην ανακάλυψη του Santo Domingo Sur .

Η έρευνα στο Candelaria ξεκίνησε το 2002, όταν η Far West Mining και η BHP Billiton σχημάτισαν μια κοινοπραξία για να διερευνήσουν εναποθέσεις IOCG στη ζώνη Candelaria της βόρειας Χιλής. Η ζώνη χαλκού της Candelaria αποτελεί μια υψηλών προοπτικών ζώνη IOCG με πολλά κοιτάσματα χαλκού, Candelaria (460 Mt @ 0,95% Cu) και το Manto Verde (350 Mt @ 0,75% Cu).

Στα τέλη του 2002, η κοινοπραξία πραγματοποίησε έρευνα από αέρα βαρυτική κλισιμετρίας με Falcon καλύπτοντας περιοχή 5.145 km². Από τις ερμηνείες της βαρύτητας και των μαγνητικών δεδομένων προέκυψε ενδιαφέρον σε περισσότερες από 70 περιοχές, καθεμία από τις οποίες περιέχει μία ή περισσότερες διακριτές ανωμαλίες βαρύτητας. Μεταξύ του Φεβρουάριου του 2003 και του Μάιου του 2005, σε 18 από τις 70 περιοχές πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές γεωτρήσεις, στοχεύοντας στην εύρεση IOCG. Τελικά, ανακαλύφθηκαν τρεις περιοχές με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για IOCG, το οποίο επιβεβαιώθηκε τα επόμενα χρόνια.

Η ανακάλυψη Santo Domingo Sur είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της εφαρμογής της αερομεταφερόμενης βαρυτικής κλισιμετρίας με σύστημα Falcon.



Εικόνα 42: Κοντινή ανταπόκριση μεταξύ του σχηματισμού των ορυκτών χαρτογραφημένη από γεωτρήσεις και την βαρύτητα (Fugro Presentation 2007).

Διαμάντια (κιμπερλίτες)

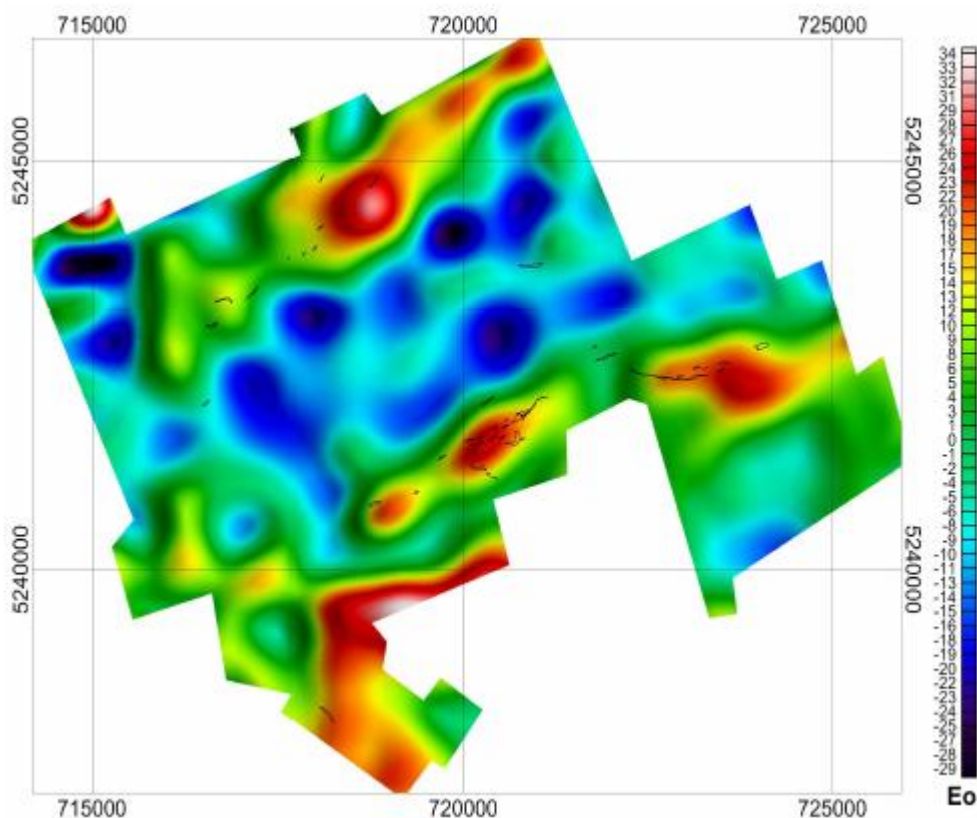
Όλα τα γνωστά μεγάλα κοιτάσματα διαμαντιών απαντώνται στα αρχαιότερα πετρώματα των ηπείρων - κιμπερλίτες-, αλλά είναι εξαιρετικά σπάνια και η εμφάνιση τους είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από την επιφανειακή γεωλογία. Αυτό επιτάσσει γρήγορες έρευνες με μεγάλη κάλυψη. Σε συνδυασμό με τις διαφορετικές φυσικές ιδιότητες του μητρικού πετρώματος σε σχέση με τις εναποθέσεις κάνει την αερομεταφερόμενη βαρυτική κλισιμετρία ιδιαίτερα ελκυστική. Επίσης, η αερομαγνητική και αερομεταφερόμενη ηλεκτρομαγνητική αναζήτηση ήταν ιδιαίτερα δημοφιλής και η διαθεσιμότητα των λεπτομερών δεδομένων της αερομεταφερόμενης βαρυτικής κλισιμετρίας από το 1999 είναι υψηλής ζήτησης για την εξερεύνηση διαμαντιών.

Τα συστήματα Falcon της BHP Billiton έχουν πετάξει 1 εκατομμύριο χιλιόμετρα μέχρι τον Οκτώβριο του 2005 τα περισσότερα από τα μισά χιλιόμετρα ήταν για αναζήτηση διαμαντιών. Τα συστήματα Air-FTG Bell Geospace έχουν πετάξει επίσης ένα σημαντικό μέρος των ερευνών τους για διαμάντια και ένα από τα συστήματα Air-FTG έχει μια σημαντική προσφορά στην εξερεύνηση διαμαντιών στην Μποτσουάνα.

Χαλκός - Ψευδάργυρος

Οι εναποθέσεις ηφαιστειακών σουλφιδίων είναι γνωστές σαν εναποθέσεις με καλή βαρυτική απόκριση λόγω υψηλής πυκνότητας. Για αυτό οι βαρυτικές διασκοπίσεις από έδαφος έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς. Η πρώτη πτήση αερομεταφερόμενης βαρυτικής κλισιμετρίας έγινε πάνω από το Bathurst Camp,

συμπεριλαμβανομένου του Heath Steele και των κοιτασμάτων του Stratmat. Τα κοιτάσματα Stratmat, σχετίζονται με διείδυση των γάββρων και είναι πιθανόν ότι το μεγαλύτερο μέρος του βαρυτικού σήματος είναι λόγω της διείδυσης και όχι του κοιτάσματος. Η αντιστοιχία μεταξύ της υψηλής βαρύτητας και των ζωνών που σχηματίζονται τα ορυκτά στην περιοχή της έρευνας μπορεί να φανεί καθαρά στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 43: Η κάθετη κλίση της βαρύτητας από ένα Falcon Bathurst, σε μια έρευνα το 1999 (Fugro Presentation, 2007).

Άλλα ορυκτά

Η αερομεταφερόμενη βαρυτική κλισιμετρία έχει αποδεδειχθεί ότι είναι χρήσιμη για εύρος ορυκτών και τύπους εναποθέσεων. Ίσως η πιο προφανής από αυτές είναι η εξερεύνηση κοιτασμάτων σιδήρου, ιδιαίτερα για μαζικές εναποθέσεις αιματίτη, των οποίων η υψηλή πυκνότητα βοηθάει στη μέτρηση της βαρύτητας. Με την από αέρα βαρυτική κλισιμετρία έχουν επίσης, ανιχνευθεί εναποθέσεις ασημιού-μολύβδου-ψευδαργύρου στο Cannington, σε έρευνα που έγινε με συστήματα Falcon. Μια πρότυπη μελέτη για εμφανίσεις χρυσού σε ζώνες της Δυτική Αυστραλίας προτείνει τη βαρυτική κλισιμετρία για την ανίχνευση τέτοιων εμφανίσεων.

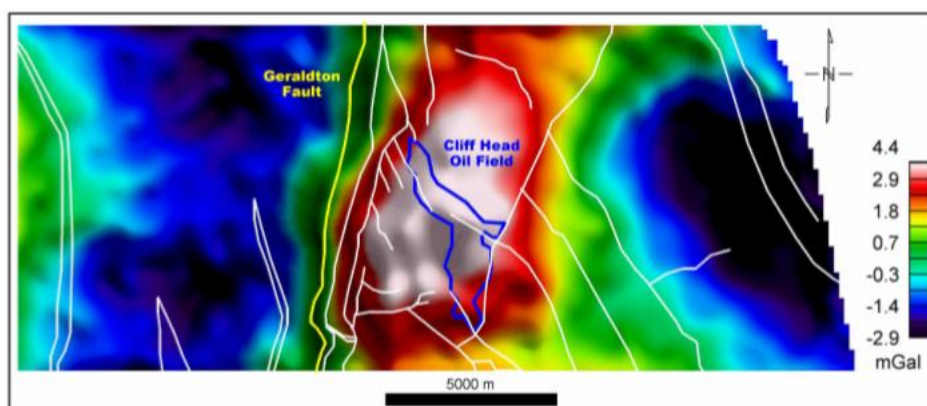
Πετρέλαιο και Φυσικό αέριο.

Υπάρχουν, επίσης σημαντικές και χρήσιμες εφαρμογές για τη μέτρηση της βαρύτητας στην έρευνα για πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Η αερομεταφερόμενη μέτρηση της κλισιμετρίας της βαρύτητας μπορεί να

συνεισφέρει στις έρευνες, παρέχοντας χαμηλού θορύβου και υψηλότερης ανάλυσης δεδομένα συγκριτικά με την αερομεταφερόμενη μέτρηση της βαρύτητας και πιο γρήγορη κάλυψη συγκριτικά με την μέτρηση βαρύτητας από το έδαφος. Γενικά, τα κύρια πεδία εφαρμογών είναι εκεί που τα σεισμικά δεδομένα είναι περιορισμένα ή η χαρτογράφηση μεγάλων περιοχών με σεισμικά έχει μεγάλο κόστος.

Παραδείγματα αποτελούν:

Η λεκάνη του Gippsland, όπου χαρτογραφήθηκε επιτυχώς το Ηωκενές κανάλι, η κύρια πηγή πετρελαίου στην Αυστραλία, με έρευνα που διεξήχθη με σύστημα Falcon (Rose 2006). Η περιοχή Cliffs στη λεκάνη του Perth της δυτική Αυστραλίας χαρτογραφήθηκε πλήρως βαρυτικά, όπου η συγκέντρωση του πετρελαίου βρίσκεται σε ένα ρηγματογενές μπλοκ. (σχημα παρακάτω)



Εικόνα 44 : Η βαρυτικά χαρτογραφημένη περιοχή του Βόρειου Perth. Η τεχνική γεωλογία (λευκές γραμμές) και το περίγραμμα της περιοχής του Cliffs (μπλε γραμμές). Η περιοχή που βρίσκεται το πετρέλαιο φαίνεται καθαρά λόγω του μεγάλου μεγέθους της βαρύτητας (Fugro Presentation, 2007).

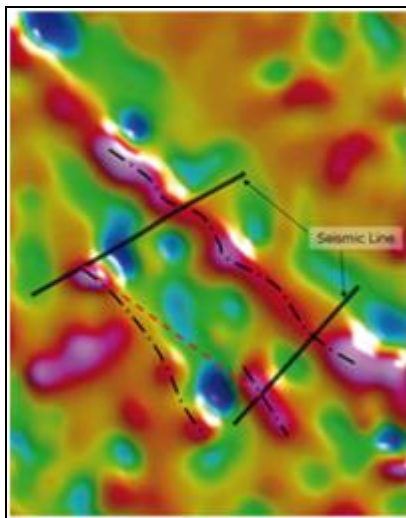
Η επιτυχής χρήση των FTG δεδομένων σε μια 3D συνδυασμένη με σεισμικά δεδομένων συνετέλεσε να υπολογιστεί το σώμα K2 άλατος στον κόλπο του Μεξικού σε βάθος 20000 ποδιών. (Nelson 2004)

2D σεισμική συμπλήρωση

Πολλές περιοχές του κόσμου έχουν αραιά 2D σεισμικά δεδομένα και μερικές φορές χρειάζονται μια 3D γεωλογική απεικόνιση. Μια 3D σεισμική έρευνα θα μπορούσε να είναι η λύση αλλά πολλές εταιρίες προτιμούν να συνδέουν τις 2D απεικονίσεις με την βαρυτική κλισιμετρία ώστε να δίνουν καλύτερη ερμηνεία του υπεδάφους παρέχοντας 3D απεικόνιση.

Μια συμβατική μέθοδος καταγράφει μια μονό από τις τρεις συνιστώσες της βαρυτικής δύναμης, συνήθως την κάθετη, ενώ στην πλήρους ταυυστή μέτρηση διαβάθμισης της βαρύτητας (FTG) χρησιμοποιώντας ζεύγη επιταχυνσιόμετρων μετράτε ο ρυθμός αλλαγής του βαρυτικού πεδίου και στις

τρεις κατευθύνσεις. Αυτό δίνει δυνατότητα στα δεδομένα της βαρυτικής κλισιμετρίας να αποδοθούν σε 3D απεικόνιση.



Εικόνα 45: Η συμβατική μέτρηση της Βαρύτητας, όπου η μαύρη γραμμή είναι η σεισμική γραμμή, η διακεκομμένη μαύρη γραμμή είναι η τάση σφάλματος, και η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή είναι η λανθασμένη ερμηνεία, που βασίζεται μόνο σε σεισμικά δεδομένα (Fugro Presentation, 2007).

Η ενσωμάτωση παράπλευρων πληροφοριών της βαρυτικής κλισιμετρίας είναι σημαντική ώστε να μειωθεί η αβεβαιότητα των 2D μετρήσεων και μπορούν να παρέχουν μια βελτιωμένη λύση. Η εικόνα στα δεξιά δείχνει ένα παράδειγμα από τον κόλπο του Μεξικού και αποτυπώνει την ικανότητα της βαρυτικής κλισιμετρίας να απεικονίσει σφάλματα μεταξύ των υπάρχοντων 2D σεισμικών δεδομένων. Τα ρήγματα έχουν απεικονιστεί πλήρως στα σεισμικά δεδομένα αλλά υπάρχει αβεβαιότητα μεταξύ των σεισμικών γραμμών. Τα δεδομένα από τη βαρυτική κλισιμετρία παρείχαν μια ανεξάρτητη μέτρηση της χωρικής θέσης, της γεωμετρίας των ρηγμάτων, και των salt features, έτσι δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλου δομής εδάφους-βάθους και ερμηνείας της περιοχής με αυξημένη εμπιστοσύνη. Η βαρυτική κλισιμετρία μπορεί να συμβάλει ως ένα έξυπνος 3D γεωλογικό παράγοντας παρέχοντας πολύτιμη πληροφορία στα σεισμικά και βοηθώντας να βελτιωθεί γενικά η εικόνα για την επιφάνεια του υπεδάφους.

Απεικόνιση Αλάτων (Imaging Salt)



Εικόνα 46: Τα FTG δεδομένα έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη μια καλής χαρτογράφησης άλατος σε μια περιοχή όπου τα σεισμικά δεδομένα είναι αραιά και χαμηλής ποιότητας. Η ακρίβεια του FTG προερχόμενου μοντέλου, μαζί με τα σεισμικά δεδομένα, οδήγησε στη δημιουργία μιας ακριβούς ταχύτητας/πυκνότητας διάταξη (Arkex, 2013).

Η σχετικά χαμηλή πυκνότητα του άλατος σε σύγκριση με το περιβάλλον πέτρωμα και η τυπική μορφολογία του σώματος του άλατος (κύριες αιτίες των προβλημάτων για τη δημιουργία σαφής εικόνας με σεισμική απεικόνιση) ταιριάζουν με την υψηλής ανάλυση βαρυτική κλισιμετρία. Η τεχνική μπορεί να χαρτογραφήσει με ακρίβεια την πυκνότητα της επιφανείας μεταξύ του άλατος και του περιβάλλοντος πετρώματος και να προσθέσει 3D δομή για τα διαφορετικά παρεμβαλλόμενα πεδία.

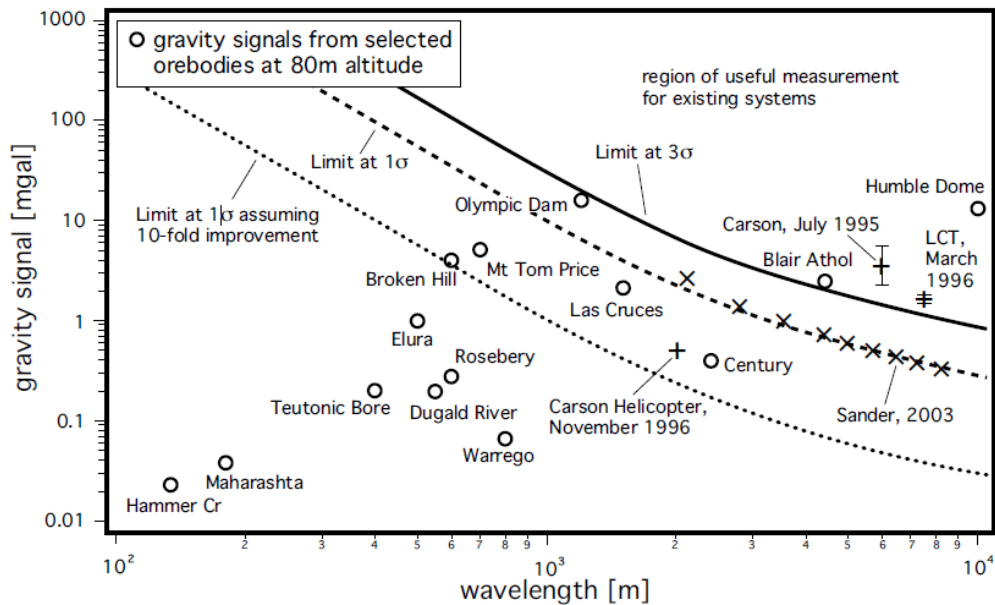
Το παράδειγμα από μια χερσαία έρευνα στην Δυτική Αφρική, δείχνει πώς είναι δυνατόν να επιτευχθεί καλά μια 3D απεικόνιση σε περιοχή που τα 2D σεισμικά δεδομένα είναι αραιά και χαμηλής ποιότητας. Η δυνατότητα ενοποίησης των FTG δεδομένων με τα σεισμικά δεδομένα που υπήρχαν, βόηθησαν τον ερευνητή ώστε να βελτιώσει τη σεισμική εικόνα και να παράγει την επιφάνεια του άλατος όπως φαίνεται με μπλε χρώμα.

Ρηγματογενείς Κοιλιάδες

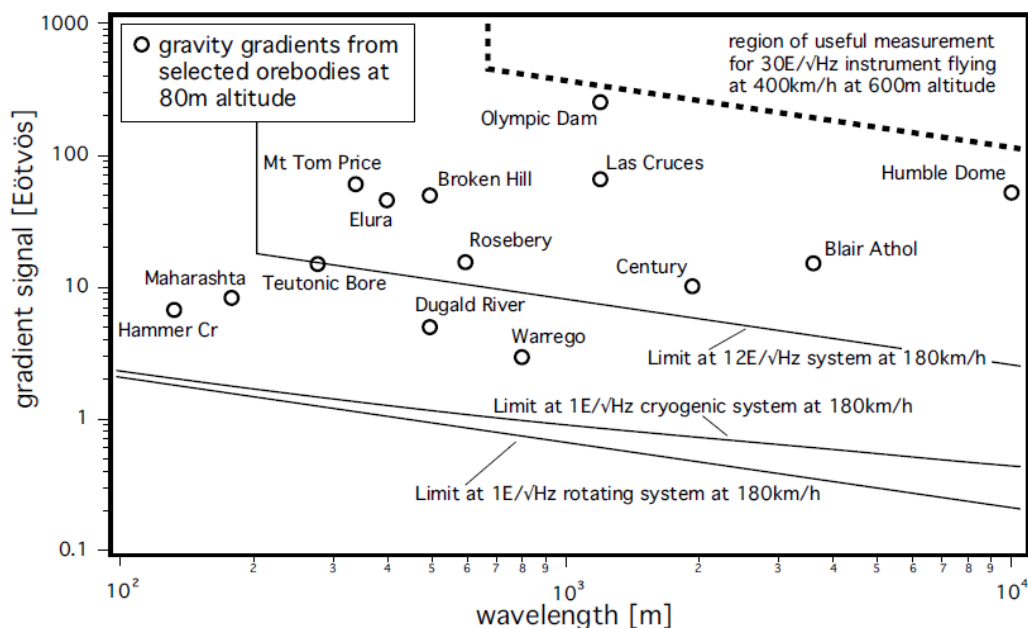
Η βαρυτική κλισιμετρία αποτελεί μια αποδεδειγμένη τεχνική στην εξερεύνηση ρηγματογενών κοιλάδων. Παραδείγματα αποτελούν έρευνες στην ανατολική Αφρική, Ουγκάντα, Αιθιοπία και Κένυα. Η βαρυτική κλισιμετρία είναι δυνατόν να απεικονίσει την αρχιτεκτονική του ρήγματος και με μεγάλη ακρίβεια λόγω τη μεγάλης διαφοράς πυκνότητας μεταξύ της βάσης και του ιζηματογενούς καλύμματος. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά τόσο καλύτερος ο σχηματικός προσδιορισμός. Ο συνδυασμός των δομικών και στρωματογραφικών μηχανισμών εντός του ρήγματος και τα δομικά χαρακτηριστικά απεικονίζονται καλά με τη βαρυτική κλισιμετρία.

Πίνακας 7: Απαιτούμενη ακρίβεια της βαρύτητας και η κάλυψη για τη στερεά επιστήμη της Γης (NRC, 1995).

Feature	Accuracy (mGal)	Resolution (km)
Plate boundaries and deformation:		
Large-scale flexure	5	50
Rifts	3	10
Diffuse extension	2	5
Mountains	3	5
Sub-ice topography	2	10
Volcanology:		
Volcano morphology	1	10
Volcano dynamics	0.5	5
Mineral exploration:		
Sedimentary basins	1	3
Salt domes	0.5	1
Mineral prospects	0.1-2.0	1-10



Εικόνα 47: Οι κάθετες αποκρίσεις της βαρύτητας με το μήκος κύματος του σήματος των επιλεγμένων κοιτασμάτων σε mgal (Van Kann, 2004).



Εικόνα 48: Οι κάθετες αποκρίσεις της βαρύτητας με το μήκος κύματος του σήματος των επιλεγμένων κοιτασμάτων σε Eötvös (Van Kann, 2004).

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζουμε το εμπορικό ενδιαφέρον ανάλογα με την γεωλογική δομή. Παρατηρούμε, λοιπόν, αν ενδιαφερόμαστε για πετρέλαιο και φυσικό αέριο, τότε θα ψάξουμε σε έγκοιλα άλατος και σε λεκάνες. Συνεχίζοντας, αν ενδιαφερόμαστε για διαμάντια, θα εξερευνήσουμε περιοχές με κιμπερλιτικές εναποθέσεις και παλέο κανάλα. Για χρυσό, θα μελετήσουμε περιοχές με παλέο κανάλα, κοιτάσματα αιματίτη, και κεκλιμένες περιοχές σουλφιδίων. Τέλος, για χαλκό, θα ερευνήσουμε εκτάσεις Γής με κοιτάσματα αιματίτη και επιθερμικές περιοχές, αν επιθυμούμε πορφυρικό χαλκό.

Πίνακας 8: Οικονομικού ενδιαφέροντος γεωλογικών αντιθέσεων πυκνότητας (Zuidweg et al, 2008).

Γεωλογική Δομή	Εμπορικό Ενδιαφέρον
Έγκοιλα άλατος	Πετρέλαιο και φυσικό αέριο
Κιμπερλιτικές εναποθέσεις	Διαμάντια
Παλεο κανάλα	Διαμάντια, Χρυσός
Κοιτάσματα Αιματίτη	Χαλκός, Χρυσός
Κοιτάσματα Χρωμίτη	Χρόμιο
Λιθολογικές Επαφές	Διάφορα μέταλλα
Λεκάνες	Πετρέλαιο και φυσικό αέριο
Κεκλιμένες περιοχές σουλφιδίων	Χρυσός, Σουλφίδια
Επιθερμικές περιοχές	Πορφυρικός Χαλκός

9.5 Όργανα μέτρησης βαρύτητας από αέρα

Τα τελευταία χρόνια, λόγω των εξελίξεων των μεθοδολογιών, την βελτίωση των εργαλείων και την ανάπτυξη των συστημάτων πλοήγησης, οι μετρήσεις από αέρα διεξάγονται σε ρουτίνα σε τεράστιες εκτάσεις της γης και της θάλασσας. Οι από αέρα μετρήσεις βαρύτητας παρέχουν γρήγορη και κατά συνέπεια χαμηλού κόστους κάλυψη μεγάλων περιοχών. Οι μετρήσεις αυτές διεξάγονται συνήθως κατά μήκος παράλληλων γραμμών πτήσης στο οποίο το μέγεθος του στόχου και το βάθος καθορίζει το σχεδιασμό του σχεδίου πτήσης. Οι συνέπειες των ανωμαλιών υψηλής συχνότητας, που προκαλούνται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας είναι σημαντικά μειωμένες, επιλέγοντας ένα υψηλό υψόμετρο πτήσης και πυκνά διαστήματα δειγματοληψίας που ευνοούν δομές ορισμένου μεγέθους, που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη.

9.5.1 Μέτρηση της βαρύτητας από αέρα (airborne gravity)

Η μεγαλύτερη αγορά της από αέρος μέτρησης της βαρύτητας είναι στην εξερεύνηση πετρελαίου και φυσικού αερίου ώστε να εξακριβωθούν ιζηματογενείς λεκάνες. Επίσης με την AGG μπορεί να γίνει άμεσα η ανίχνευση και ο γεωγραφικός προσδιορισμός μεγάλης ποικιλίας ορυκτών παραγώγων και εναποθέσεις κοιτασμάτων.

Το γεωγραφικό πλάτος, οι διορθώσεις ελεύθερου-αέρα, Bouguer και εδάφους είναι κοινές διαδικασίες, που εφαρμόζονται τόσο στην από αέρα βαρυτομετρική ανάλυση και όσο και στην διασκοπήσεις βαρύτητας που διεξάγονται στην επιφάνεια της Γής. Ωστόσο, πρόσθετες διορθώσεις απαιτούνται στις από αέρα μετρήσεις για την εξάλειψη των επιδράσεων από την επιτάχυνση του αεροσκάφους. Ο Dransfield (1994) περιγράφει ότι υπάρχουν δύο τύποι μη αδρανειακών επιδράσεων, που πρέπει να διορθώνονται, η κατακόρυφη επιτάχυνση του αεροσκάφους και συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας του αεροσκάφους και της περιστροφή της γης (διόρθωση Eötvös).

Ο Wooldridge (2010) παρέχει μια επισκόπηση των διαθέσιμων εμπορικών αερομεταφερόμενων συστημάτων βαρύτητας. Κατά τη στιγμή της σύνταξης της παρούσας διατριβής, τα εμπορικά διαθέσιμα εναέρια βαρυτόμετρα είναι:

1. Το σύστημα LaCoste Romberg-Air II: Αποτελείται από ένα πολύ ευαίσθητο αισθητήρα βαρύτητας, ο οποίος είναι τοποθετημένος στους δύο-άξονες μιας σταθεροποιημένης πλατφόρμας. Εμπορικά διαθέσιμο από το 1995.
2. Το σύστημα AIRGrav: Το σύστημα αποτελείται από γυροσκοπική σταθεροποιημένη πλατφόρμας τριών αξόνων, και αποτελείται από τρία ορθογώνια επιταχυνσιόμετρα. Έχει αναπτυχθεί από τη Sander Geophysics από το 1997 (Sander et al., 2005).
3. Τα συστήματα GT-1A και GT-2A: Αρχικά, σχεδιάστηκε από την Gravimetric Technologies στη Ρωσία. Αργότερα, το σύστημα αναπτύχθηκε περαιτέρω από την Canadian Micro Gravity (CMG). Η CMG GT-1A αποτελείται από αερομεταφερόμενο βαρυτόμετρο μονού αισθητήρα πάνω σε μια σταθεροποιημένη πλατφόρμα τριών αξόνων. Το GT-2A είναι σχεδόν πανομοιότυπο με το GT-1A, έχοντας μεγαλύτερο δυναμικό εύρος καθώς χρησιμοποιεί καλύτερο βαρυτόμετρο. Το GT-1A είναι εμπορικά διαθέσιμο από το 2003. Ο Studinger (2008), προέβη σε σύγκριση των GT-1A και AIR-Grav συστημάτων για εφαρμογές της έρευνας από τις δοκιμές πτήσης πάνω από τα καναδικά βραχώδη όρη κοντά στο Calgary.
4. Το σύστημα TAGS-Air III: Αυτό το σύστημα έχει κυκλοφορήσει πρόσφατα από τη Micro-g LaCoste και τη Scintrex. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για μια τροποποίηση του αρχικού

LaCoste - Romberg-Air II βαρυτόμετρου και αποτελείται από μια γυροσκοπική σταθεροποιημένη πλατφόρμας δυο αξόνων.

9.5.2 Μέτρηση των διαβαθμίσεων βαρύτητας από αέρα (airborne gravity gradiometry)

Το σημείο με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην από αέρα μέτρηση των κλίσεων της βαρύτητας (airborne gravity gradiometry) έγκειται στο γεγονός της μη-ευαισθησίας στις επιταχύνσεις του αεροσκάφους. Ο Dransfield (1994) περιγράφει την ικανότητα της βαρύτητας με διαβαθμίσεις (airborne gravity gradient) να παρέχει καλύτερη ευαισθησία και ανάλυση από την απλή από αέρα μέτρηση της βαρύτητας (airborne gravimetry). Επιπλέον, στην από αέρα μέτρηση διαβαθμίσεων της βαρύτητας (gravity gradiometry) δεν απαιτείται το γεωγραφικό πλάτος, και οι διορθώσεις ελευθέρου-αέρα, Bouguer, που είναι απαραίτητες για την εναέρια μέτρηση βαρύτητας (airborne gravimetry). Μία από τις πιο σημαντικές διορθώσεις για την από αέρα μέτρηση κλίσεων της βαρύτητας (airborne gravity gradient) είναι η τοπογραφική διόρθωση.

Οι διορθώσεις του εδάφους αποτελούνται από την ανάπτυξη ενός μοντέλου με τοπογραφικά χαρακτηριστικά και την αφαίρεση της επίδρασης της βαρύτητας, του κατασκευασμένου μοντέλου από τα δεδομένα. Αυτό απαιτεί μια εκ των προτέρων γνώση για το ανάγλυφο του εδάφους, καθώς και της πυκνότητας των πετρωμάτων, που το περιβάλλουν. Η ακρίβεια, που παρέχεται από το σύστημα πλοήγησης, είναι υψίστης σημασίας για τις διορθώσεις εδάφους και του υψόμετρου. Προς το παρόν υπάρχουν μόνο τρεις εμπορικά διαθέσιμα αερομεταφερόμενα συστήματα μέτρησης των διαβαθμίσεων βαρύτητας (διαβάθμισης) και κάποιοι άλλοι είναι υπό δοκιμή. (Beiki, M. 2011)

Τα όργανα, που έχουν αναπτυχθεί σε εμπορικά συστήματα, με το πρώτο, που αναπτύχθηκε από την Lockheed Martin (1975-1990) (Difrancesco, 2007), είναι:

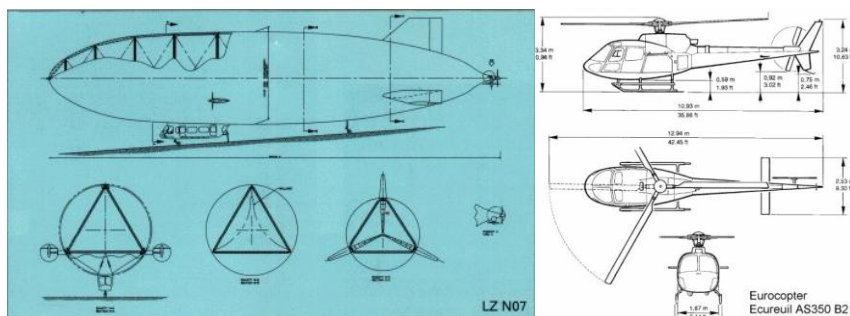
1. Το σύστημα Air-FTG®: Είναι ένα πλήρες βαρυτομετρικό σύστημα, που μετρά πέντε ανεξάρτητες συνιστώσες GGT, δηλαδή G_{xx} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yy} , και G_{yz} . Η συνιστώσα G_{zz} υπολογίζεται από την εξίσωση του Laplace. Το σύστημα έχει αναπτυχθεί από την Bell Geospace.
2. Το σύστημα Falcon™ AGG: Το σύστημα αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από την BHP Billiton και τη Lockheed Martin το 1994. Το σύστημα Falcon AGG έχει σχεδιαστεί για να μετρά τις G_{xy} και $(G_{xx}-G_{yy}) / 2$, που ονομάζονται επίσης και HDT (horizontal directional tendency). Έτσι, η GGT υπολογίζεται από τις επιμέρους υπολογισμένες συνιστώσες. Αποτελείται από 8 επιταχυνσιόμετρα που προσαρμόζονται στα φτερά αεροσκάφους ή σε ελικόπτερο. Τέλος, το σύστημα ανήκει στην Fugro Airborne Surveys και χρησιμοποιείται σε έρευνες για πετρέλαιο, φυσικό αέριο και ορυκτά.
3. Το σύστημα BlueQube: Το ARKeX BlueQube είναι σύστημα μέτρησης της βαρύτητας, που μετρά πέντε ανεξάρτητες συνιστώσες της GGT. Το σύστημα αυτό είναι πολύ παρόμοιο με το σύστημα Air-FTG®. Το BlueQube είναι εμπορικά διαθέσιμη από το 2004.

Πλατφόρμες

Η επιλογή του αεροσκάφους είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η συμπεριφορά της εναέρια πλατφόρμας σε μία πτήση επηρεάζει άμεσα τόσο το θόρυβο όσο και την παραγωγικότητα της πτήσης. Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν στην επιλογή του αεροσκάφους. Έχοντας ένα σταθερό φιλτραρισμένο εύρος ζώνης και τη χωρική ανάλυση, που είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας του αεροσκάφους, με αποτέλεσμα ένα αργό αεροσκάφος αποδίδει καλύτερης ανάλυσης δεδομένων. Πρέπει να τονισθεί ότι η

κλίση της βαρύτητας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση έτσι όσο χαμηλότερο ύψος πτήσης τόσο υψηλότερο το σήμα. Υπάρχουν ζητήματα, επίσης, λειτουργίας και ασφάλειας, που καθορίζουν την ελάχιστη ταχύτητα του αεροσκάφους.

Η αερομεταφερόμενη βαρυτική κλισιμετρία διεξάγεται με αεροσκάφη σταθερών πτερυγίων (Cessna), αερόπλοια (π.χ. Zeppelin LZ N07) και ελικοπτέρων (π.χ. Eurocopter AS350-B3) . Αυτές οι πλατφόρμες επιλέγονται ανάλογα με τις συνθήκες.



Εικόνα 49: Zeppelin LZ N07 και Eurocopter AS350-B3 (BHP Billiton, 2009).

Αεροσκάφη με σταθερά πτερά

Οι περισσότερες έρευνες αερομεταφερόμενης βαρυτικής κλισιμετρίας για Falcon, Air-FTG και συστήματα FTGeX έχουν πετάξει με αεροπλάνα με μονοκινητήρια Cessna Grand Caravans. Συνήθως, το Caravan κάνει μια έρευνα με ταχύτητα εδάφους των $55-65 \text{ ms}^{-1}$ (~ 120 κόμβοι) και μια απόσταση από το έδαφος 80-100 m σε ήπιο ανάγλυφο εδάφους. Είναι η πιο φθηνή λύση από τις τρεις εναλλακτικές λύσεις, παρέχει την ταχύτερη κάλυψη της περιοχής έρευνας και είναι σε θέση να μεταφέρει οποιοδήποτε από τα διαθέσιμα σήμερα βαρυτικά κλισίμετρα.

Αερόπλοιο

Ένα από τα συστήματα Air-FTG που εξερεύνησε την περιοχή της Μποτσουάνας για την de Beers έγινε με το αερόπλοιο Zeppelin NT. Το αερόπλοιο πέταγε με ταχύτητα 16 ms^{-1} (32 κόμβοι) και σε απόσταση από το έδαφος των 80 m. Τα μεγάλα υψόμετρα και γενικά οι υψηλές ημερήσιες θερμοκρασίες της Μποτσουάνας περιόριζαν την ικανότητα ανύψωσης του αερόπλοιου και, κατά συνέπεια, οι επιχειρήσεις της έρευνας γίνονταν βράδυ. Όλα τα βαρυτικά κλισίμετρα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με αερόπλοιο. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του αερόπλοιου από τις άλλες πλατφόρμες είναι τα πολύ χαμηλά επίπεδα επιτάχυνσης που προκύπτουν από την υψηλή αδράνεια του. Αυτό οδηγεί σε χαμηλό θόρυβο.

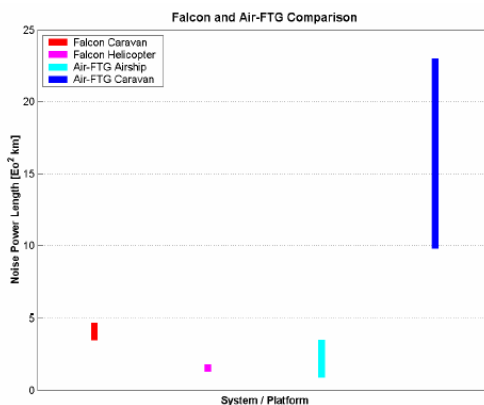
Ελικόπτερο

Ένα από τα συστήματα Falcon έχει εγκατασταθεί σε ένα Eurocopter AS350 B3. Το ελικόπτερο πετάει με ταχύτητα 30 ms^{-1} (60 κόμβοι) σε απόσταση από το έδαφος των 80 m. Τα ελικόπτερα, όπως και τα αερόπλοια είναι πλήρως εξοπλισμένα, φέροντας βαρυτικά κλισίμετρα, με αποτέλεσμα να περιορίζονται σε υψηλά υψομετρικά και υψηλές θερμοκρασίες. Επιτυχημένες έρευνες έχουν γίνει με στην Canadian Arctic. Το AS350 B3 είναι ικανό μόνο με την εκτέλεση ενός ελαφριού ψηφιακού βαρυτικού AGG. Το

διακριτικό πλεονέκτημα του ελικοπτέρου είναι η μεγαλύτερη ανάλυση και η ευαισθησία που προέρχεται από τις πιο αργές πτήσεις. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα εφαρμόσιμο για λεπτομερή χαρτογράφηση μικρών περιοχών.

Σύγκριση Πλατφόρμων

Είναι χρήσιμο να είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε την επίδοση των βαρυτικών κλισιόμετρων σε όλες τις πλατφόρμες, που ταξιδεύουν, σε διαφορετικές ταχύτητες.



Εικόνα 50: Σύγκριση πλατφόρμων (Murphy, 2007).

Αυτή η σύγκριση αγνοεί το πλεονέκτημα του ελικοπτέρου, να πετάει σε χαμηλά ύψη, και όλες τις μεταβλητές λειτουργίας, ασφάλειας και κόστους. Το σύστημα Air-FTG γενικά έχει την υψηλότερη ευαισθησία σε κίνηση του αεροσκάφους, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο σφάλμα και τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα του σφάλματος αυτού, όταν τοποθετηθεί σε ένα αεροσκάφος σταθερών πτερύγων. Ωστόσο, αυτό αντισταθμίζεται πλήρως από τη χρήση μιας πλατφόρμας ενός αερόπλοιου, το οποίο είναι πολύ σταθερό και πολύ αργό. Το σύστημα Falcon διαθέτει πολύ χαμηλότερη ευαισθησία στην κίνηση των αεροσκαφών και, ως εκ τούτου, υπερέχει σαφώς του Air-FTG, όταν βρίσκονται σε ίδια αεροσκάφη σταθερών πτερύγων. Το Heli-Falcon έχει περίπου την ίδια πυκνότητα ισχύος θορύβου, όπως το αερόπλοιο με Air-FTG. Τέλος, το Heli-Falcon έχει ένα επιπλέον πλεονέκτημα, που δεν φαίνεται στο σχήμα αυτό, είναι σε θέση να πετάζει χαμηλότερα από την άλλα συστήματα, έτσι ώστε να έχει πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία κοντά στην επιφάνεια γεωλογίας από τα άλλα.

Οι εφαρμογές των αερομεταφερόμενων βαρυτόμετρων για την απόκτηση των πληροφοριών βαρύτητας είναι συνήθως περιορισμένες λόγω της διαθεσιμότητας, των δαπανών της αποστολής (αεροσκάφη και βαρυτόμετρο) και του εργατικού δυναμικού, το οποίο προστίθεται στις γενικές δαπάνες των αερομεταφερόμενων ερευνών βαρύτητας. Μια μεγάλης κλίμακας έρευνα για τον προσδιορισμό της βαρύτητας όπως η αποστολή στην Ταϊβάν μπορεί να πάρει περισσότερο από 200 ώρες πτήσης για να ολοκληρωθεί. Ακόμα κι αν αυτό είναι αποδοτικότερο από επίγειες τεχνικές μέτρησης, υπάρχει δυνατότητα να μειωθεί ο χρόνος και οι δαπάνες για τις από αέρα διασκοπίσεις βαρύτητας

Καταρχάς, υπάρχει ενδιαφέρον για τη χρήση του INS για τη χαρτογράφηση της βαρύτητας. Αυτά τα συστήματα είναι πολύ φτηνότερα από τις σταθερές πλατφόρμες, και με την αυξανόμενη ακρίβεια των

επιταχυνσιόμετρων και των γυροσκοπίων, η απόδοση αναμένεται να ξεπεράσει αυτή των σταθερών πλατφορμών. Παραδείγματα τέτοιων προγραμμάτων είναι το αερομεταφερόμενο βαρυτομετρικό σύστημα SAGS4 από τη βαυαρική ακαδημία των επιστημών στο Μόναχο, το σύστημα, που αναπτύσσεται για διανυσματική μέτρηση της βαρύτητας από το Ίδρυμα Γεωδαισίας και Πλοήγησης του Μονάχου (Kreye, 2006), και το Gravimetry που χρησιμοποιεί Airborne Inertial Navigation (GAIN) από το Delft.

Η πιο υποσχόμενη λύση για τη μείωση δαπανών και χρόνου είναι η χρήση αυτόνομου οχήματος (UAV), εξοπλισμένο με βαρυτόμετρο ή SINS και GPS. Όμως τα μέχρι τώρα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρα τα οποία είναι ογκώδη, ακριβά, και δύσκολα ενσωματώνονται σε αυτόνομα οχήματα (UAV). Σε συνέδριο στο Ορλάντο USA (2014), παρουσιάστηκε ένα αισθητήρας για μέτρηση της βαρύτητας βάρους 2kg κατάλληλος για UAVs, που αναπτύσσεται από την Geomatics LLC σε συνεργασία με το King Saud University και την (NSTIP.). Τα UAVs έχουν ήδη επιτυχημένες εφαρμογές σε πολλούς ερευνητικούς τομείς, όπως η μετεωρολογία, η τηλεπισκόπηση και ο παρακολούθηση φυσικών καταστροφών.

Για την ακριβή εναέρια μέτρηση της βαρύτητας, μια σταθερή πλατφόρμα απαιτείται. Στην περίπτωση των UAV, αυτό σημαίνει ότι τα αεροσκάφη είναι η καλύτερη επιλογή, ειδικά εάν τους παρέχονται τα ηλιακά πλαίσια για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Μια έρευνα για την εναέρια μέτρηση της βαρύτητας θα να αποτελείται από ένα ή περισσότερα UAVs, που αυτόνομα χαρτογραφούν μεγάλα μέρη της γης, όπως οι ωκεανοί ή οι πολικές περιοχές.

10. Επεξεργασία Δεδομένων και επεξήγηση

Παρακάτω παραθέτονται γενικές πληροφορίες σχετικές με το Air-FTG® σύστημα, τον τρόπο απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων και το επιχειρησιακό σχέδιο πτήσης.

10.1 Περιγραφή Εξοπλισμού

Κλισίμετρο Πλήρους τανυστή (FTG)

Το κλισίμετρο πλήρους τανυστή (FTG) είναι μια υψηλής ακρίβειας, υψηλής ανάλυσης, με πολλά επιταχυνσιόμετρα, περιστρεφόμενη πλατφόρμα, που μετρά τη διαβάθμιση του πεδίου βαρύτητας. Η πλατφόρμα FTG περιέχει τρία βαρυτικά κλισίμετρα που το καθένα αποτελείται από 2 ζευγάρια επιταχυνσιόμετρων που βρίσκονται πάνω σ' ένα περιστρεφόμενο δίσκο. Το κλισίμετρο εγκαταστάθηκε στο αεροσκάφος μαζί με υποστηρικτικό εξοπλισμό, υπολογιστές, οθόνες και άλλο περιφερειακό υλικό που υποστηρίζει την απόκτηση δεδομένων FTG.

Το FTG όργανο τοποθετείτε στο κέντρο της κύριας καμπίνας σε ειδική θήκη κατά τη διάρκεια της πτήσης και ζυγίζει 227 κιλά, με μέγεθος ενός κυβικού μέτρου. Το μέρος των ηλεκτρονικών της καμπίνας έχει περίπου το ίδιο μέγεθος και βάρος 160 κιλά. Η θήκη παρέχει στο FTG όργανο τις κατάλληλες συνθήκες για την εύρυθμη λειτουργία του.

Η απόκτηση δεδομένων βαρυτικής κλισιμετρίας από αέρα

Πριν την απόκτηση των δεδομένων πραγματοποιείται μια ισοστάθμιση του οργάνου στο έδαφος. Αυτή η διαδικασία συντελεί μετέπειτα ώστε να μειωθεί ο θόρυβος που δημιουργείται λόγω του αεροσκάφους στη διάρκεια της πτήσης. Δεδομένα καταγράφονται καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης, συνήθως η ταχύτητα εδάφους είναι περίπου στα 215κμ/ώρα. Το σύστημα δημιουργεί κάθε ώρα περίπου δεδομένα 400mb (συμπεριλαμβάνονται δεδομένα πλοήγησης και οι επιταχύνσεις του αεροσκάφους). Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε δυο αντίγραφα. Έπειτα αποστέλλονται στα κεντρικά της Bell Geospace με διαφορετικές αποστολές. Το ένα σετ μπαίνει στο αρχείο και το δεύτερο επεξεργάζεται από τους μηχανικούς.

10.2 Χαρακτηριστικά Λειτουργίας

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν με το σύστημα FTG-002 από το αεροσκάφος BT-67. Το GPS και τα DGPS συστήματα είναι σύμφωνα το ελλειψοειδές WGS-84. Ένα ραντάρ υψομέτρου χρησιμοποιήθηκε για να μετράει την απόσταση μεταξύ αεροπλάνου και εδάφους. Αυτό σε συνδυασμό με τα δεδομένα του GPS συντελούν στην παραγωγή ενός ψηφιακού μοντέλου (DEM) το οποίο μπορεί να είναι χρήσιμο για διορθώσεις εδάφους. Το GPS επίσης υπολογίζει τεταγμένη, τετμημένη και υψόμετρο του χρήστη. Στην πτήση χρησιμοποιήθηκε ένα Novatek Propak διαφορικό GPS που δίνει ακρίβεια 5 μέτρων και θέσεις πραγματικού χρόνου που διορθώνεται διαφορικά με το Omni-Star σύστημα. Τα συστήματα GPS χρησιμοποιήθηκαν με ένα PNAV-2001 σύστημα πλοήγησης.

Έλεγχος ποιότητας πτήσης FTG

Οι επιταχύνσεις μετρήθηκαν με όργανο κατά τη διάρκεια της απόκτησης των δεδομένων μαζί με άλλες ενδείξεις λειτουργίας. Στην κύρια οθόνη του FTG, παρακολουθούνται θέση, θερμοκρασία, επιταχύνσεις, η θερμοκρασία των οργάνων και πολλοί άλλοι παράγοντες. Σε περίπτωση προβλήματος του εξοπλισμού υπάρχουν τα κατάλληλα μέσα για την επίλυση του. Τα τελικά δεδομένα της έρευνας στέλνονται στην Bell Geospace ηλεκτρονικά για μια πρώτη επεξεργασία. Οποιοδήποτε σφάλμα στα δεδομένα αναγνωρίζεται με μεθόδους διασταύρωσης ή άλλες μεθόδους μπορεί να αναγκάσει το πλήρωμα σε επανεκτέλεση μέρους της έρευνας.

Επεξεργασία Δεδομένων FTG

Η επεξεργασία των δεδομένων FTG απαιτεί μια σειρά από βήματα ώστε να μετρηθεί τελικά η κλίση της βαρύτητας που χρησιμοποιείται για επεξήγηση. Οι μέθοδοι επεξεργασίας μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το είδος της έρευνας, τις καιρικές συνθήκες, και άλλους παράγοντες που επιδρούν στα δεδομένα.

High Rate Post Mission Compensation

Τα πρώτα δεδομένα που καταγράφονται από το όργανο αποτελούνται από δυο σήματα προερχόμενα από τα τρία όργανα Βαρυτικά Κλισίμετρα (GGI). Αυτά αναφέρονται ως cross και inline σήματα. Τα σέτ από τα σήματα τρέχουν σε κατάλληλο λογισμικό (HRPMC). Το HRPMC αντισταθμίζει τα δεδομένα που επιδρούν περισσότερο, λόγω επιδράσεων, στην απόκτηση του σήματος. Μια σειρά από σύνθετους αλγορίθμους χρησιμοποιούνται για να παραχθούν οι απαραίτητοι συντελεστές που θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα για διορθώσεις της κίνησης του αεροσκάφους και της θέσης του οργάνου κατά τη διάρκεια της πτήσης. Διορθώσεις πραγματοποιούνται επίσης για την αφαίρεση των κλίσεων λόγω των κεντρομόλων επιταχύνσεων που επιδρούν στην κατεύθυνση του καθενός από το κάθε βαρυτικό κλισίμετρο. Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας από το HRPMC, τα δεδομένα οδηγούνται στο SAR, εκεί αναδιαμορφώνονται σε 24-στηλο δυαδικό αρχείο. Τα αρχεία SAR αποτελούνται από καθημερινές μετρήσεις δεδομένων. Δεδομένου ότι τα στοιχεία FTG καταγράφονται συνεχώς, τα αρχεία SAR περιέχουν επίσης δεδομένα εκτός των γραμμών της έρευνας. Τα δεδομένα που καταγράφονται σε αυτές τις περιπτώσεις αφαιρούνται ενώ παράλληλα η πλοήγηση τους αεροσκάφους και η βαρύτητα ενσωματώνονται στα δεδομένα.

Μέθοδος διόρθωσης εδάφους

Οι διορθώσεις του εδάφους υπολογίζονται από ένα λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Ο υπολογισμός υποθέτει μια πυκνότητα της τάξης των 1.0 gm/cc και υπολογίζει την απόκριση της βαρύτητας. Οι διορθώσεις του εδάφους πρέπει να επεξεργαστούν επίσης με FTNR. Αυτό γιατί το FTNR υπολογίζει τα δεδομένα στο ύψος της επιφανείας.

FTG-Specific Line Correction

Η επόμενη διαδικασία που αναφέρεται ως FTG-Specific Line Corrections. Σ' αυτό το βήμα υπολογίζει τα συστατικά του τανυστή και αφαιρεί μαζικά τα σφάλματα χαμηλών συχνοτήτων. Αυτή η διαδικασία υποθέτει ότι δε υπάρχει συσχετισμός μεταξύ του σφάλματος που θέλουμε να αφαιρέσουμε και του σήματος, που θέλουμε να κρατήσουμε. Το DGPS παρέχει με υψηλή ακρίβεια την θέση και τις μετρήσεις της ταχύτητας του αεροσκάφους. Η ακριβής θέση του κάθε GGI σχετίζεται με τους σερβοκινητήρες που προκαλούν τις περιστροφές, και από τα γυροσκόπια της σταθεροποιημένης πλατφόρμας. Από αυτές τις

πληροφορίες, οι μετρημένες επιταχύνσεις από κάθε GGI μπορούν να μετατραπούν στις κατευθυντικές κλίσεις και παρέχει τις συνιστώσες του τανυστή, T_{xx} , T_{xy} , T_{xz} , T_{yy} , T_{yz} και T_{zz} .

Η ανατροφοδότηση, από τα γυροσκόπια και το GPS επιτρέπει στους σερβοκινητήρες να κρατήσουν κάθε GGI στον ίδιο οριζόντιο και κάθετο προσανατολισμό του εδάφους σε όλη την έρευνα. Το αρχείο των δεδομένων FTG και ο χρόνος είναι συγχρονισμένος με το GMT χρόνο. Η κλίση GGI δημιουργεί ένα ιδιαίτερο πρόβλημα, επειδή δεν είναι γραμμική, έτσι οι παραδοσιακές τεχνικές είναι ανεπαρκείς να διορθώσουν αυτό το λάθος, και, δεδομένου ότι η κλίση GGI είναι χρονικά εξαρτημένη, πρέπει να γίνει ο χρονικός συντονισμός. Λόγω της φύσης των στοιχείων της διαβάθμισης των δεδομένων και της εξίσωσης Laplace ($T_{xx} + T_{yy} + T_{zz} = 0$), οι περίπλοκες διαδικασίες πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να διατηρηθούν οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του τανυστή.

Τελικό επίπεδο Εξομάλυνσης

Αφ' ότου τα στοιχεία έχουν διαβαθμιστεί σε επίπεδα FTG και διορθωθεί μαζικά, γίνονται μερικές μικρές παρεισφρήσεις παραμένουν λόγω του θορύβου και των μη γραμμικών σφαλμάτων. Σε αυτό το σημείο, μια συνηθισμένη μέθοδος επεξεργασίας εφαρμόζεται για να παραχθούν τα τελικά στοιχεία, που είναι κατάλληλα για τη χαρτογράφηση. Για να αξιολογήσουμε καλύτερα το θόρυβο, ένα φίλτρο Butterworth μήκους 0.5-1km εφαρμόζεται και υπολογίζονται οι παρεισφρήσεις σε κάθε γραμμή. Οι παρεισφρήσεις του θορύβου στα φιλτραρισμένα στοιχεία αναλύονται γραμμή με γραμμή. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι μεγαλύτερες παρεισφρήσεις οφείλονται σε μια τυχαία σφάλμα. Συνήθως οι παρεισφρήσεις εμφανίζονται σε πολύ λίγα σημεία των δεδομένων αλλά μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα. Οι παρεισφρήσεις αυτές αφαιρούνται χειροκίνητα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου αφαιρούνται ουσιαστικά όλα τα σφάλματα. Οι διορθώσεις, που υπολογίζονται από το φιλτραρισμένο ίχνος εφαρμόζονται επίσης στα αφιλτράριστα δεδομένα. Αυτή η διαδικασία ολοκληρώνεται έπειτα από αρκετά περάσματα, έως ότου οι παρεισφρήσεις είναι πλησίον του μηδέν. Μετά από κάθε πολυωνυμική προσαρμογή, τα δεδομένα μπορούν να σχηματίσουν χάρτη ώστε να επανεξεταστούν και να προκύψουν οι τελικοί χάρτες επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία. Οι τανυστές υπολογίζονται από τα εξομαλυσμένα GGI δεδομένα και εξετάζονται για τα τυχόν σφάλματα.

Αν και αυτό τα δεδομένα παράγουν αξιολογους χάρτες, πρόσθετες βελτιώσεις μπορούν μερικές φορές να επιτευχθούν μέσω της μικρο-εξομαλύνσεων. Ο χρήστης μπορεί να διευκρινίσει διάφορα μήκη φίλτρων, ανοχές, και άλλες παραμέτρους για να καθορίσει με ακρίβεια τη διαδικασία. Αυτή η διαδικασία προσπαθεί να αφαιρέσει ή να μειώσει τις διάφορες συχνότητες σε κάθε γραμμή που δεν εμφανίζονται σε γειτονικές. Αυτή η τεχνική είναι λιγότερο αποτελεσματική όταν το διάστημα γραμμών ποικίλλει ή είναι πάρα πολύ μεγάλο. Γενικά, γραμμές με μήκος μεγαλύτερο των 500 μέτρων παρουσιάζουν οριακή βελτίωση, κυρίως στις χαμηλότερες συχνότητες. Όλο το φιλτράρισμα, η εξομάλυνση και η χαρτογράφηση γίνονται στο λογισμικό πακέτο της Geosoft, Oasis Montaj.

Υπολογίζοντας τη βαρύτητα - T_z

Το πεδίο βαρύτητας μπορεί να υπολογιστεί από τανυστές κλίσης με τη βοήθεια της ολοκλήρωσης. Αυτό μπορεί εύκολα να γίνει με μια από τις δύο μεθόδους: ολοκλήρωση κατά μήκος των γραμμών ή κάθετη ολοκλήρωση των περιοχών-Fourier. Το αποτέλεσμα οποιασδήποτε διαδικασίας ολοκλήρωσης στερείται μιας άγνωστης σταθεράς της ολοκλήρωσης, επομένως, το μέγεθος του βαρυτικού πεδίου δεν μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση του τανυστή. Μπορεί όμως να υπολογιστεί αν είναι γνωστό το βαρυτικό πεδίο

της περιοχής που εξετάζεται. Συγκεκριμένα, ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων και ένα υψίπεδο φίλτρο εφαρμόζονται. Τα δύο φιλτραρισμένα σήματα προστίθενται, υπολογίζοντας την παραγωγή Tz.

Μείωση θορύβου πλήρους τανυστή (FTNR)

Η φύση ενός τρισδιάστατου πλήρους τανυστή σε ένα κλισίμετρο επιτρέπει τη μείωση θορύβου. Η FTG μέθοδος καταγράφει πέντε ανεξάρτητες μετρήσεις της γεωλογίας από τις διαφορετικές προοπτικές. Αυτές οι μετρήσεις είναι σχετικές, διότι καταγράφουν τα δεδομένα από την ίδια γεωλογική πηγή. Εάν ένα σήμα ενός τανυστή δεν υποστηρίζεται από τους άλλους τανυστές, τότε αφαιρείται από τα δεδομένα. Αυτή η διαδικασία παράγει ένα βελτιωμένο πακέτο δεδομένων με πολύ καλύτερη αναλογία σήματος/διαταραχής. Τα τελικά προϊόντα των τανυστών περιέχουν πολύ μικρό λανθάνων θόρυβο και είναι δυνατόν να χαρτογραφηθούν ανωμαλίες με μεγάλη αξιοπιστία σε όλο το φάσμα της συχνότητας. Μια από τις βασικές παραμέτρους ελέγχου FTNR είναι η μείωση του μήκους κύματος της συχνότητας.

Σχόλια

Η Bell Geospace καθορίζει με ακρίβεια συνεχώς τις παραμέτρους της συλλογής και επεξεργασίας Air-FTG® δεδομένων. Η διαδικασία που περιγράφεται εδώ παράγει πολύτιμα και αξιόπιστα δεδομένα, κατάλληλα για τους επιδιωκόμενους σκοπούς. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πολλές διαδικασίες, που περιγράφονται στην παρόν εργασία, συνεχίζουν να βελτιώνονται δεδομένου ότι συνεχίζουμε να μαθαίνουμε περισσότερα για την απόδοση των οργάνων στα δυναμικά περιβάλλον των αερομεταφορών. Τα Air-FTG® δεδομένα μπορούν να ανιχνεύσουν τους ρηχά σώματα, που εκτείνονται 300m ή λιγότερο, με εύρος ακρίβειας λιγότερης από 7 Εδτνδς. Δεδομένου ότι καθαρίζουμε περαιτέρω τις μεθόδους επεξεργασίας και συλλογής, ακόμα αναμένεται υψηλότερη ανάλυση.

Τελικοί χάρτες και ψηφιακά δεδομένα

Το τελικό βήμα στην επεξεργασία δεδομένων είναι η εφαρμογή του πλέγματος και της χάραξης περιγράμματος της αεροπορικής γραμμής. Χαρακτηριστικά, ένα ελάχιστο πλέγμα κυρτότητας με μια αύξηση του 1/3 έως 1/2 διαστήματος χρησιμοποιείται. Βέβαια, η υπολογισμένη βαρύτητα, δηλαδή το αποτέλεσμα της κάθετης ολοκλήρωσης του μετρημένου τμήματος της Tzz συνιστώσας ελεύθερου-αέρα, μπορεί να παραχθεί για λόγους σύγκρισης και αναφοράς. Οι χάρτες παρέχονται σε ψηφιακή μορφή και είναι διαθέσιμοι σε διάφορες μορφές. Χαρακτηριστικά παρέχονται τυπικοί χάρτες από το Geosoft Oasis.

Οι μετρήσεις ελεύθερου-αέρα και οι διορθωμένες συνιστώσες των τανυστών συμπεριλαμβάνονται μαζί με τις διορθώσεις του εδάφους σε 1.00 gm/cc για να διευκολύνουν τον επαναυπολογισμό σε διάφορες πυκνότητες.

Το λογισμικό

Το λογισμικό "Oasis processing" αποτελείται από τις εξής διαδικασίες:

- Επεξεργασία των εσφαλμένων τιμών και των δεδομένων χαμηλό σήμα θορύβου.
- Γραμμική εξομάλυνση, καθώς και μικρο εξομάλυνση σε ορισμένες περιπτώσεις.
- Πλέγμα και παραγωγή χάρτη.

- Εφαρμογή διόρθωσης εδάφους.

Εφαρμογή των εδαφικών διορθώσεις

Η έρευνα Sudbury βρίσκεται στα δυτικά του Sudbury Greater Division και του Sudbury District. Η περιοχή έρευνας εκτείνεται σε γεωγραφικό πλάτος μεταξύ τεταγμένων 46.43° και 46.47° , τετμημένων Βόρεια με 81,59° και 81,54 ° Δυτικά . Η έρευνα με Air-FTG® πραγματοποιήθηκε στην περιοχή στις 4-5 Ιουνίου το 2010. Συνολικά καλύφθηκε μια περιοχή 134,3 km σε ευθεία γραμμή, καλύπτοντας μια έκταση περίπου 33sq km από την Bell Geospace Incorporated.

Καιρός

Κατά τη διάρκεια της έρευνας, ο καιρός ήταν γενικά πολύ καλός, με αποτέλεσμα η συλλογή των δεδομένων να μην σταματήσει ή η καθυστερήσει λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών. Τα περισσότερα από τα στοιχεία αποκτήθηκαν γύρω ή κάτω από 50 milli-g κάθετης επιτάχυνσης. Τα δεδομένα της βαρυτικής κλισιμετρίας δεν επηρεάζονται τόσο, όσο τα στοιχεία της συμβατικής βαρύτητα στον άσχημο καιρό, αλλά επηρεάζονται από τον ακραίο καιρό. Η απόκτηση δεδομένων σταματάει, όταν οι κάθετες επιταχύνσεις είναι κοντά στα 100 Milli-g στο αεροσκάφος BT-67. Το όριο είναι χαμηλότερο για μικρότερα αεροσκάφη. Οι γραμμές, που αποκτιούνται σε δύσκολα καιρικά φαινόμενα, εξετάζονται και ανακτούνται, αν και μόνο αν, η ποιότητα των στοιχείων είναι κάτω του μετρίου. Η κάθετη επιτάχυνση δεν είναι ο μόνος δείκτης της ποιότητας των στοιχείων.

Περίληψη Διαδικασιών

Το πλήρωμα και ο εξοπλισμός διέμεινε στο Sudberry, στο Οντάριο. Το προσωπικό του BGI, που συμμετείχε σε αυτήν την έρευνα, ήταν ο Stefan Kuna, ο Mark Deugaw, και ο Kenny Burnett. Η έρευνα άρχισε στις 4 Ιουνίου και ολοκληρώθηκε στις 5 Ιουνίου 2010. Τα στοιχεία αποκτήθηκαν με BGI ftg-2 από το αεροσκάφος BT67. Το αεροσκάφος λειτουργεί και συντηρείται από Enterprise Airlines. Οι πιλότοι ήταν ο Brad Burchartz και ο Chris Dennison. Μηχανικός αεροσκάφους ήταν ο Miro Budzinski.

Το σχέδιο ερευνών και η απόκτηση των δεδομένων

Η διεύθυνση των πτήσεων ήταν από τον βορρά στο νότο και συνολικά πραγματοποιήθηκαν 13 γραμμές μελέτης απόστασης 300μέτρων. Οι γραμμές των ερευνών είχαν μήκος 10.3 km. Γενικά το έδαφος δεν παρουσίασε σοβαρές ιδιαιτερότητες. Το σχέδιο ερευνών καθόρισε μια πορεία πτήσης, όπου διατηρήθηκε μια σταθερή απόσταση από το έδαφος για ολόκληρο το μήκος κάθε γραμμής έρευνας. Εντούτοις, δεν ήταν πάντα δυνατό να διατηρηθεί σταθερή λόγω μικρών διαβαθμίσεων του εδάφους στις κοιλάδες ή άλλες χαμηλές περιοχές η απόσταση αυτή ήταν μεταβλητή.

Ο πίνακας A1 περιλαμβάνει τις πληροφορίες για την έκταση, το ύψος πτήσης, και άλλα χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα του εδάφους παραχωρήθηκαν από τον πελάτη και παρείχαν ανάλυση 20 μέτρων.

11.Συμπεράσματα

Οι επενδύσεις που γίνονται στην έρευνα και ανάπτυξη UAVs, παρά την ελλιπή νομοθεσία για τις πτήσεις, δείχνουν τη μεγάλη δυναμική που μπορεί να έχει αυτή η αγορά. Οι υλοποιήσεις που πραγματοποιούν έρευνες για μέτρηση του πλήρους τανυστή της βαρύτητας από αέρα είναι αεροσκάφη σταθερού πτερυγίου, ελικόπτερα και ζέπελιν που συνδυάζονται με ένα από τα τρία διαφορετικά εμπορικά συστήματα μέτρησης FALCON, air-FTG, BlueQuebe.

Μέχρι τώρα δεν έχει πραγματοποιηθεί η είσοδος των UAVs στο χώρο της Airborne FTG, λόγω του μεγάλου βάρους του εξοπλισμού των GGI. Τελευταία, νέα χαμηλού βάρους αισθητήρων βαρύτητας παρουσιάζονται, με έντονο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα έτσι, λοιπόν δίνεται η δυνατότητα στην ανάπτυξη UAVs που θα εκπονούν διασκοπήσεις καθώς μπορούν να συνδυάζουν χαμηλή ταχύτητα πτήσης, σε χαμηλό υψόμετρο, (υψηλότερης ποιότητας δεδομένα) με μικρό κόστος, με το μόνο εμπόδιο να είναι η νομοθεσία του αέρα. Η βαρυτική κλισιμετρία (βαθμίδα βαρυτικού πεδίου) από αέρα εξελίσσεται συνεχώς και πλέον έχει αρχίσει η ευρεία χρήση της, με επιτυχείς έρευνες κοιτασμάτων πετρελαίου και άλλων ορυκτών. Αναμένεται σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες σεισμικές έρευνες να χρησιμοποιηθεί η FTG στον Ελλαδικό χώρο.

Βιβλιογραφία

Λουής Ι. 2004, *Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική*, Σύγχρονες Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Γεωφυσικής

Βαφείδης Α., 2001, *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική 2*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης

Τσούμπελης Δ., 2010, *Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις Τόμος Β΄*, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών

Τόγκας Α., 2008, *Σημειώσεις στις κατανομές και τις συναρτήσεις Green με εφαρμογές στην επίλυση προβλημάτων συνοριακών τιμών σε μια διάσταση*, Ηράκλειο: Πανεπιστήμιο Κρήτης

DeGarmo M., Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace, 2004

Dr Joseph Barnard, The use of Unmanned Aircraft in Oil, Gas and Mineral Exploration and Production activities. April 2008

Beiki, M. 2011. New Techniques for Estimation of Source Parameters Applications to Airborne Gravity and Pseudo- Gravity Gradient Tensor, Acta Universitatis Upsaliensis. *Digital Comprehensive Summaries of Upsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 800, 80pp. Upsala

Alberts BA, September 2009 *Regional gravity field modeling using airborne gravimetry data*, Publications on Geodesy 70, Delft, The Netherlands

Barnard J., 2008, The use of Unmanned Aircraft in Oil, Gas and Mineral Exploration and Production activities, eds. *23rd Bristol International UAV Systems Conference*, 7 April 2008, London, U.K.

Kaerye P., Brooks M., Hill I. 2002, *An Introduction to Geophysical Exploration*, Australia: Blackwell Science Pty Ltd

Alberts BA, Ditmar P, and Klees R (2007a). A new methodology to process airborne gravimetry data: advances and problems. In: Tregoning P and Rizos C, (eds.), *Proceedings of Dynamic Planet - Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools*, volume 130 of *IAG Symposia*, pages 251–258, Cairns, Australia.

Alberts BA, Gunter BC, Muis A, Chu QP, Giorgi G, Huisman L, Buist PJ, Tiberius CCJM, and Lindenburg H (2008). Correcting strapdown GPS/INS gravimetry estimates with GPS attitude data. In: *IAG International Symposium on Gravity, Geoid & Earth Observation (GGEO2008)*, Chania, Crete, Greece.

Alberts BA and Klees R (2004). A comparison of methods for the inversion of airborne gravity data. *Journal of Geodesy*, 78: 55–65. Alberts BA, Klees R, and Ditmar P (2005). A new strategy for processing

airborne gravity data. In: Jekeli C, Bastos L, and Fernandes J, (eds.), *Proceedings of the IAG International Symposium on Gravity, Geoid and Space Missions (GGSM2004)*, volume 129 of *IAG Symposia*, pages 161–166, Porto, Portugal.

Alberts BA, Klees R, and Ditmar P (2007b). Gravity field modelling from airborne gravimetry using fundamental solutions of Laplace's equation in Cartesian coordinates. In: *Harita Dergisi, Proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service 'Gravity field of the Earth'*, pages 283–288, Istanbul, Turkey.

Dransfield, M. , Airborne Gravity Gradiometry in the Search for Mineral Deposits, Paper 20, 2008

Christensen, A.N., A.M Mahanta, D.B Boggs, and M.H Dransfield,2001, *Falcon gravity gradiometer survey results over the Cannington Ag-Pb-Zn deposit*: Preview, 93, 85.

Nelson, A., D. Holland, O. Yogi, and D. Heidron, 2004, Integrated use of Seismic, Ground and Airborne Gravity/Gravity Gradiometer and Ground Geological Mapping Methods in the Eastern Papuan Basin, PNG: Preview, 111, 84.

Dransfield, M.H., A.N. Christensen, G. Liu, and M. Rose, 2001b, Airborne gravity gradiometry in mineral exploration: presented at the Gravity Gradiometry Workshop, SEG Conference, San Antonio, September 2001

Rose, M., Y. Zeng, and M.H. Dransfield, 2006, Applying Falcon gravity gradiometry to hydrocarbon exploration in the Gippsland Basin, Victoria: *Exploration Geophysics*, 37, 180-190.

Jekeli, C., 1988, The gravity gradiometer survey system (GGSS): *Eos*, 69, 105 and 116-117.

Christensen, A.N., A.M Mahanta, D.B Boggs, and M.H Dransfield,2001, *Falcon gravity gradiometer survey results over the Cannington Ag-Pb-Zn deposit*: Preview, 93, 85.

Murphy, C., J. Brewster, and J. Robinson, 2007, Evaluating Air-FTG® survey data: bringing value to the full picture: Preview, 126, 24- 28.

Nelson

Hatch, D., C. Murphy, G. Mumaw, and J. Brewster, 2006b, Performance of the Air-FTG® system aboard an airship platform: Preview, 127, 17-22.

Wei M (1999). From airborne gravimetry to airborne geoid mapping - Report of SSG 3.164. In: Forsberg R, (ed.), *Determination of the gravity field*. Report of IAG section III, pages 25–32. Danish National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen.

Jackson et al (2013) The Sky Above, the Ice Floes, and the Earth Below. *Geo ExPro* February 2013

K. Zuidweg, G.R. Mumaw Bell Geospace Ltd, Airborne Gravity Gradiometry For Exploration Geophysics – The First 5 Years

Pavlis NK, Holmes SA, Kenyon SC, and Factor JK(2008). An Earth Gravitational Model to degree 2160: EGM2008. In: EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria.

NRC (National Research Council) (1995). Airborne geophysics and precise positioning: scientific issues and future directions. National Academy Press, Washington, D.C.

Van Kann F (2004). Requirements and general principles of airborne gravity gradiometers for mineral exploration. In: Lane RJJ, (ed.), Airborne Gravity 2004 - Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, volume 2004/18 of Geoscience Australia Record, pages 1–5.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Gradient>

http://en.wikipedia.org/wiki/Potential_gradient