

Το δορυφορικό πρόγραμμα Landsat

Μαρία Α. Λαζαρίδου

Αναπλ. Καθηγήτρια, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής,
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας – Τηλεπισκόπησης
lazamari@civil.auth.gr

Περίληψη: Οι δορυφόροι του προγράμματος Landsat λαμβάνουν από το διάστημα εικόνες της γήινης σφαίρας, από το 1972. Έχουν γίνει επτά επιτυχείς αποστολές δορυφόρων ως σήμερα, τα δεδομένα των οποίων έχουν δημιουργήσει ένα πολύτιμο αρχείο για τη Γη, στο οποίο μεταξύ άλλων καταγράφονται οι μεταβολές που έχει υποστεί από φυσικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες. Στην εργασία αυτή γίνεται μια κριτική θεώρηση των χαρακτηριστικών των δορυφόρων του προγράμματος, των οργάνων - αισθητήρων απεικόνισής τους, καθώς και των κατευθύνσεων εφαρμογών των δεδομένων τους.

1. Εισαγωγή

Οι πρώτες προσπάθειες απεικόνισης της γήινης σφαίρας από το διάστημα έγιναν κατά τη διάρκεια των αποστολών Explorer-6 (1959), TIROS (Television Infrared Operational Satellites), Gemini και Apollo τη δεκαετία του 1960. Οι πειραματικές αυτές προσπάθειες έδειξαν ότι η απεικόνιση της γης από το διάστημα είναι εφικτή (Lowman, 1999) και οδήγησαν στο σχεδιασμό του προγράμματος Landsat.

Το πρόγραμμα Landsat αναπτύχθηκε από την NASA (National Aeronautics and Space Administration) και την USGS (U.S. Geological Survey) των Η.Π.Α. Ο

Πίνακας 1. Οι δορυφόροι του προγράμματος Landsat

Δορυφόρος	Έτος εκτόξευσης	Τέλος λειτουργίας	Αισθητήρες
Landsat 1	1972	1978	MSS/RBV
Landsat 2	1975	1983	MSS/RBV
Landsat 3	1978	1983	MSS/RBV
Landsat 4	1982	2001	MSS/TM
Landsat 5	1984	2013	MSS/TM
Landsat 6	1993	Δεν μπήκε σε τροχιά	ETM
Landsat 7	1999	–	ETM+
Landsat 8	2013	–	OLI/TIRS

πρώτος δορυφόρος λήψης δεδομένων από την επιφάνεια της γης ήταν ο δορυφόρος ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellites), ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 23 Ιουλίου του 1972 και λειτούργησε ως τις 6 Ιανουαρίου του 1978. Πριν από την εκτόξευση του ERTS-2, 22 Ιανουαρίου 1975, η NASA μετονόμασε τα προγράμματα ERTS σε Landsat. Ο ERTS-1 μετονομάστηκε σε Landsat 1 και ο ERTS-2 σε Landsat 2. Έχουν εκτοξευτεί μέχρι σήμερα, οκτώ δορυφόροι του προγράμματος Landsat (USGS, 2013), οι οποίοι παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

2. Χαρακτηριστικά του προγράμματος Landsat

Οι δορυφόροι Landsat (land satellite) μεταφέρουν κατάλληλους αισθητήρες, οι οποίοι παρατηρούν τη Γη, μεταδίδουν τις πληροφορίες με κατάλληλα σήματα σε σταθμούς στο έδαφος, οι οποίοι λαμβάνουν και επεξεργάζονται τα δεδομένα για να τα προωθήσουν στους εκάστοτε χρήστες (Cambell, 2002).

Οι δορυφόροι Landsat 1,2,3 είχαν ύψος τροχιάς 920 km. Έκαναν μια περιφορά γύρω από τη Γη σε 103 min, συμπληρώνοντας έτσι 14 περιφορές (τροχιές) την ημέρα. Ο χρόνος για μια πλήρη κάλυψη της γήινης επιφάνειας ήταν 18 ημέρες, με εδαφικό πεδίο κάλυψης εύρους 185 km. Μετέφεραν δυο όργανα απεικόνισης: το σύστημα RBV (Return Beam Vidicon) και τον πολυφασματικό σαρωτή MSS (Multi Spectral Scanner). Ο πολυφασματικός σαρωτής, ο οποίος ήταν το κύριο σύστημα απεικόνισης, είχε χωρική ανάλυση περίπου 80m, με τέσσερις φασματικές περιοχές (bands), από το ορατό πράσινο ως το εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο πολυφασματικός σαρωτής MSS στον Landsat 3 περιελάμβανε και μια πέμπτη φασματική περιοχή στο θερμικό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Οι δορυφόροι Landsat 4 και 5 είχαν ύψος τροχιάς 705 km και μετέφεραν τον MSS και τον θεματικό χαρτογράφο TM (Thematic Mapper). Οι πολυφασματικοί σαρωτές των Landsat 4 και 5 ήταν ακριβώς ίδιοι με αυτούς του Landsat 3. Ο θεματικός χαρτογράφος TM περιελάμβανε και άλλες φασματικές περιοχές στο εγγύς υπέρυθρο SWIR (Short Wave Infrared) και βελτιωμένη χωρική ανάλυση 120 m για το θερμικό-υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και 30 m για τις άλλες έξι φασματικές περιοχές.

Οι δορυφόροι Landsat 7 και 8 που λειτουργούν σήμερα έχουν τροχιά σε ύψος 705 km. Κάθε δορυφόρος έχει κύκλο επανόδου 16 ημερών, αλλά και οι δυο επιτρέπουν την επανάληψη κάλυψης σε 8 ημέρες (USGS, 2013). Είναι σχεδιασμένοι για να συλλέγουν δεδομένα από ένα εδαφικό πεδίο 185 km. Ο Landsat 7 μεταφέρει τον ETM+, με χωρική ανάλυση 30 m στο ορατό και στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, χωρική ανάλυση 60 m στο θερμικό και 15 m στο παγ-χρωματικό. Ο Landsat 8 μεταφέρει τους αισθητήρες OLI (Operational Land Imager) και TIRS (Thermal Infrared Sensor). Ο αισθητήρας OLI συλλέγει δεδομέ-

να σε 9 φασματικές περιοχές μικρού εύρους: 8 φασματικές περιοχές με χωρική ανάλυση 30m και μια παγχρωματική με ανάλυση 15m. Ο αισθητήρας TIRS συλλέγει δεδομένα σε δυο θερμικές φασματικές περιοχές με χωρική ανάλυση 100m .

Ειδικότερα χαρακτηριστικά των αισθητήρων απεικόνισης των δορυφόρων Landsat αναφέρονται παρακάτω.

2.1 Το σύστημα RBV

Οι δορυφόροι Landsats 1, 2, 3 μετέφεραν το σύστημα RBV (Return Beam Vidicon). Το σύστημα αυτό στους δυο πρώτους δορυφόρους αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες κάμερες τοποθετημένες σε κοινή βάση, οι οποίες λειτουργούσαν ταυτόχρονα, η κάθε μια όμως σε διαφορετική φασματική περιοχή, **Πίνακας 2**, (Sanchez J., 1998) με ανάλυση 80m., καλύπτοντας την ίδια περιοχή με τον πολυφασματικό σαρωτή MSS. Στον Landsat 3 το σύστημα RBV αποτελείται από δυο κάμερες, οι οποίες λειτουργούσαν σε μια ευρεία φασματική περιοχή, με βελτιωμένη χωρική ανάλυση 40m. Η εικόνα που προέκυπτε από κάθε κάμερα κάλυπτε το ένα τέταρτο της αντίστοιχης εικόνας του πολυφασματικού σαρωτή.

Πίνακας 2. Φασματικές περιοχές του συστήματος RBV

Δορυφόρος	Μήκος κύματος (σε μm)	Ανάλυση (σε m)
Landsat 1 και 2	0.476 – 0.575	80
	0.580 – 0.680	80
	0.890 – 0.830	80
Landsat 3	0.505 – 0.750	40

2.2 Ο Πολυφασματικός Σαρωτής MSS (MultiSpectral Scanner)

Ο πολυφασματικός σαρωτής MSS ήταν ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα σάρωσης, το οποίο κατέγραφε την ανακλώμενη από τη γήινη επιφάνεια ηλιακή ακτινοβολία. Η καταγραφή γινόταν σε τέσσερις φασματικές περιοχές για τους Landsat 1,2 τις 4-7, σε πέντε φασματικές περιοχές για τον Landsat 3, τις 4-8 και σε τέσσερις φασματικές περιοχές, τις 1-4, για τους Landsat 4-5. Η ακτινοβολία κατευθυνόταν σε ένα σύνολο έξι ανιχνευτών, σε κάθε μια από τις 4 φασματικές περιοχές, επιτρέποντας τη συλλογή 6 γραμμών δεδομένων σε κάθε σάρωση. Η ακτινοβολία μετατρεπόταν σε ψηφιακό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταδιδόταν στους εδαφικούς σταθμούς λήψης δεδομένων. Η ραδιομετρική ανάλυση ήταν 6 bit (δηλαδή 64 δυνατά επίπεδα γκρίζου σε μια εικόνα).

Ο παρακάτω **Πίνακας 3** παρουσιάζει τις φασματικές περιοχές (μπάντες) του MSS και αντίστοιχες ενδεικτικές εφαρμογές.

Πίνακας 3. Φασματικές περιοχές του πολυφασματικού σαρωτή (MSS)

Φασματικές περιοχές		Μήκος κύματος (σε μm)	Ανάλυση (σε m)	Ενδεικτικές εφαρμογές
Landsat 1-3	Landsat 4-5			
4	1	0.5-0.6 (ορατό πράσινο)	80	Κίνηση νερού με ιζήματα και ανίχνευση περιοχών αβαθών υδάτων.
5	2	0.6-0.7 (ορατό κόκκινο)	80	Πολιτιστικά χαρακτηριστικά, όπως αστικές περιοχές.
6	3	0.7-0.8 (εγγύς υπέρυθρο)	80	Βλάστηση, όρια μεταξύ γης και νερού και μορφές γης.
7	4	0.8-0.11 (εγγύς υπέρυθρο)	80	Βλάστηση, όρια μεταξύ γης και νερού και μορφές γης.
8		10.41-12.6 (θερμικό)		Έμφαση στις διαφορές θερμοκρασίας. <i>Μόνο στον Landsat 3</i>

2.3 Ο Θεματικός χαρτογράφος και ο Βελτιωμένος Θεματικός Χαρτογράφος

Ο θεματικός χαρτογράφος TM είχε βελτιωμένη φασματική και χωρική ανάλυση σε σχέση με τον πολυφασματικό σαρωτή MSS. Ο βασικός τρόπος λειτουργίας ήταν ίδιος, αλλά η χρήση πιο ευαίσθητων ανιχνευτών, οι βελτιωμένες οπτικές διατάξεις και η πιο χαμηλή τροχιά, κατέστησαν δυνατή τη συλλογή ακτινοβολίας σε 7 φασματικές περιοχές, με βελτιωμένη χωρική και ραδιομετρική ανάλυση 8 bit (δηλαδή 256 δυνατά επίπεδα γκριζου σε μια εικόνα). Τα δεδομένα συλλέγονταν από 16 ανιχνευτές σε κάθε φασματική περιοχή και 16 γραμμές δεδομένων συλλέγονταν κατά τις πρόσθιες και οπίσθιες σαρώσεις του περιστρεφόμενου κατοπτρικού συστήματος.

Ο βελτιωμένος θεματικός χαρτογράφος ETM+ έχει τις δυνατότητες του θεματικού χαρτογράφου TM, αλλά και επιπρόσθετα χαρακτηριστικά, όπως παγχρωματική φασματική περιοχή με ανάλυση 15 m, που τον καθιστούν ένα πιο ευέλικτο και αποτελεσματικό όργανο για μελέτες μεταβολών σε παγκόσμιο επίπεδο, παρακολούθησης και αποτίμησης κάλυψης γης και χαρτογράφησης μεγάλων περιοχών. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το 2003 παρουσιάστηκε πρόβλημα στη διάταξη SLC (Scan Line Corrector) που διατηρεί τις γραμμές σάρωσης παράλληλες μεταξύ τους (USGS, 2013). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την απώλεια δεδομένων στην εικόνα, η οποία αντιμετωπίζεται με διάφορες διαδικασίες από την USGS.

Ο παρακάτω **Πίνακας 4** παρουσιάζει τις φασματικές περιοχές των TM και ETM+.

Πίνακας 4. Φασματικές περιοχές θεματικού χαρτογράφου (TM) και βελτιωμένου θεματικού χαρτογράφου +(ETM+)

Φασματικές περιοχές	Μήκος Κύματος (μm)	Ανάλυση (m)	Ενδεικτικές εφαρμογές
1	0.45-0.52 (ορατό μπλε)	30	Βαθυμετρική χαρτογράφηση, διάκριση εδάφους από βλάστηση, φυλλοβόλων από κωνοφόρα.
2	0.52-0.61 (ορατό πράσινο)	30	Θέματα βλάστησης.
3	0.63-0.69 (ορατό κόκκινο)	30	Θέματα βλάστησης.
4	0.76-0.90 (εγγύς υπέρυθρο)	30	Βιομάζα και ακτογραμμές.
5	1.55-1.75 (μέσο υπέρυθρο)	30	Διάκριση υγρασίας εδάφους και βλάστησης, διαπέραση νεφών μικρού πάχους.
6	10.40-12.50 (θερμικό υπέρυθρο)	120	Θερμική χαρτογράφηση και εκτίμηση εδαφικής υγρασίας.
7	2.08-2.35 (μέσο υπέρυθρο)	30	Διάκριση τύπων πετρωμάτων και υδροθερμική χαρτογράφηση.
8	0.52-0.90	15	Λεπτομέρειες υφής και χρήσιμη για “sharpening” πολυφασματικών εικόνων, (μόνο για τον Landsat-7)

2.4 Οι αισθητήρες OLI και TIRS

Ο δορυφόρος Landsat 8, ο οποίος εκτοξεύτηκε το Φεβρουάριο του 2013 μεταφέρει τα όργανα OLI (Operational Land Imager) και TIRS (Thermal Infrared Sensor). Οι φασματικές περιοχές του αισθητήρα OLI είναι παρόμοιες με αυτές του αισθητήρα ETM+ του δορυφόρου Landsat 7, με την προσθήκη όμως δυο επιπλέον φασματικών περιοχών: της φασματικής περιοχής 1, που έχει σχεδιαστεί ειδικά για υδάτινους πόρους και έρευνα παράκτιων ζωνών και της φασματικής περιοχής 9 για την ανίχνευση νεφών, **Πίνακας 5**. Η ραδιομετρική ανάλυση του OLI είναι 12 bit (δηλαδή 4096 δυνατά επίπεδα γκριζου σε μια εικόνα). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο θερμικός υπέρυθρος αισθητήρας TIRS έχει δυο θερμικές φασματικές περιοχές με χωρική ανάλυση 100m, **Πίνακας 5**.

Πίνακας 5. Φασματικές περιοχές των OLI/TIRS (Landsat 8)

Φασματικές περιοχές	Μήκος Κύματος (μm)	Ανάλυση (m)	Ενδεικτικές εφαρμογές
1	0.43-0.45	30	Παρατηρήσεις παράκτιων ζωνών
2	0.45-0.51	30	Βαθμετρική χαρτογράφηση, διάκριση εδάφους από βλάστηση, φυλλοβόλων από κωνοφόρα.
3	0.53-0.59	30	Θέματα βλάστησης.
4	0.64-0.67	30	Θέματα βλάστησης.
5	0.85-0.88	30	Βλάστηση, όρια γης νερού και μορφές γης
6	1.57-1.65	30	Ανίχνευση πυρκαγιών και της καμένης βλάστησης.
7	2.11-2.29	30	Ανίχνευση ξηρασίας και καμένων περιοχών.
8	0.50-0.68	15	Λεπτομέρειες υψής και χρήσιμη για “sharpening” πολυφασματικών εικόνων.
9	1.36-1.38	30	Ανίχνευση νεφών cirrus.
10-TIRS 1	10.60-11.19	100	Χαρτογράφηση θερμικών διαφορών σε υδάτινα ρεύματα, παρακολούθηση πυρκαγιών και εκτίμηση εδαφικής υγρασίας.
11-TIRS 2	11.50-12.51	100	Χαρτογράφηση θερμικών διαφορών σε υδάτινα ρεύματα, παρακολούθηση πυρκαγιών και εκτίμηση εδαφικής υγρασίας.

3. Εφαρμογές του προγράμματος Landsat

Το πρόγραμμα Landsat οδήγησε κατ’ αρχήν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και στην χαρτογράφηση των φυσικών πόρων. Παράλληλα όμως, η πρώτη δεκαετία του προγράμματος χαρακτηρίστηκε και από τη διεύρυνση των εφαρμογών που περιελάμβαναν μεταξύ άλλων (Draeger et al., 1997) θέματα γεωργίας, ερευνών για πετρέλαιο και μελετών περιβάλλοντος.

Τα δεδομένα Landsat σήμερα έχουν ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών (<http://landsat.gsfc.nasa.gov>) που αφορά θέματα γεωργίας, δασολογίας, γεωλογίας, υδρολογίας, γεωγραφίας, χαρτογράφησης, διαχείρισης φυσικών πόρων, έρευνας μεταβολών σε παγκόσμιο επίπεδο, ποιότητας νερού και ωκεανογραφίας.

Η συνέχεια των δεδομένων Landsat για πάνω από τέσσερις δεκαετίες δίνει τη δυνατότητα διαχρονικής σύγκρισης μεταβολών στην κάλυψη γης (Wulder M. A. et al, 2008). Είναι ακόμη χρήσιμα για περιπτώσεις έκτακτων αναγκών και ειδικότερα φυσικών καταστροφών.

Το αρχείο των δεδομένων Landsat τα τελευταία χρόνια είναι διαθέσιμο και χωρίς κόστος μέσω του Διαδικτύου (Loveland T.R., et al 2012).

4. Συζήτηση

Το δορυφορικό πρόγραμμα Landsat άρχισε το 1972 και συνεχίζεται ως σήμερα. Οι επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις που συνέβησαν στο διάστημα αυτό, οδήγησαν στη βελτίωση των χαρακτηριστικών των αισθητήρων απεικόνισης των δορυφόρων του προγράμματος και στη διεύρυνση του πεδίου εφαρμογών των δεδομένων τους από επιστήμονες και ερευνητές διαφόρων επιστημονικών κλάδων.

Η συνεχής και συστηματική συλλογή των δεδομένων μέσης χωρικής ανάλυσης Landsat έχει δημιουργήσει ένα πολύτιμο αρχείο για τη Γη, το οποίο συνεχώς επεκτείνεται με νέες απεικονίσεις και από το οποίο μπορεί να αντληθούν πληροφορίες για ευρύ πεδίο θεμάτων.

Βιβλιογραφία

- Campbell J.B., 2002. *Introduction to Remote Sensing*, The Guilford Press, New York, 620 pp.
- Draeger W.C., Holm T.M., Lauer D.T., Thomson R.J., 1997. *The Availability of Landsat Data: Past, Present and Future*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 63, No 7: 869-875.
- Lowman P.D. Jr., 1999. *Landsat and Apollo: The Forgotten Legacy*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 65, No 10: 1143-1147.
- Loveland T.R., Dwyer J.L., 2012. Landsat: Building a strong future. *Remote Sensing of Environment*, 122: 22-29.
- Sanchez J., Canton M. P., 1998. *Space Image Processing*. CRC Press, 400 pp.
- Wulder M.A., White J.C., Goward S.N., Masek J.G., Irons J.R., Herold M., Cohen W.B., Loveland T.R., Woodcock C.E., 2008. *Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring*. *Remote Sensing of Environment*, 112: 955-969.
- USGS, 2013. *Landsat: A Global Land-Imaging Mission*. Fact Sheet 2012-3072, Revised May 2013.
- <http://landsat.gsfc.nasa.gov> (Δεκέμβριος 2014)