

Εισαγωγή .....	555
Συστατικά μέρη ενός ΣΓΠ .....	558
2.2.1 Γεωγραφικά δεδομένα .....	559
2.2.2 Είδη γεωγραφικών δεδομένων .....	559
2.2.3 Μοντέλα χωρικών δεδομένων .....	568
2.2.4 Πηγές εισαγωγής γεωγραφικών δεδομένων .....	572
Επεξεργασία και ανάλυση ψηφιακού χάρτη στο ΣΓΠ .....	572
Βασικές λειτουργίες ενός ΣΓΠ .....	573
4.1 Σύνδεση χωρικών δεδομένων με περιγραφικά δεδομένα .....	573
4.2 Οργάνωση της πληροφορίας σε επίπεδα .....	573
4.3 Τοπολογική δομή .....	574
4.4 Χωρική Ανάλυση .....	575
Δορυφορική τηλεπισκόπηση και ΣΓΠ .....	576
5.1 Εφαρμογή Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών και δορυφορικής τηλεπισκόπησης .....	578

Γεωγραφία .....	583
-----------------	-----

Επιμέληματα .....	593
-------------------	-----

Πρόλογο .....	601
---------------	-----

1

## Αρχές της Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης

### 1.1 Εισαγωγή

Ο όρος *τηλεπισκόπηση ή τηλεανίχνευση (remote sensing)* χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διαδικασίας λήψης πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μία περιοχή ή φαινόμενο, με την χρήση ανιχνευτικών συσκευών που δεν βρίσκονται σε επαφή με το αντικείμενο παρατήρησης. Με μια στενότερη έννοια, η τηλεπισκόπηση του περιβάλλοντος σημαίνει απόκτηση πληροφοριών για μια γήινη επιφάνεια με την από απόσταση μέτρηση και αποτύπωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα. Η πληροφορία εξάγεται μέσω του συσχετισμού των μετρήσεων με τη φύση και την κατανομή των υλικών στην επιφάνεια της γης.

Η τηλεπισκόπηση έχει τριπλή διάσταση, που περιλαμβάνει τις ακόλουθες τρεις παραμέτρους:

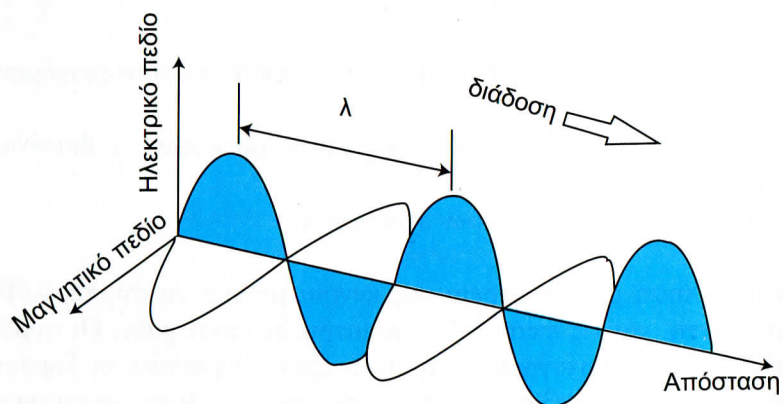
- τους *στόχους*, που συνιστούν τα υπό μελέτη αντικείμενα ή τα φαινόμενα μιας περιοχής,
- την *τεχνική συλλογής* δεδομένων με τη βοήθεια οργάνων που βρίσκονται σε απόσταση από τους στόχους, και
- την *ανάλυση* και την *ερμηνεία* των δεδομένων.

Η τηλεπισκόπηση με την ευρεία της έννοια μπορεί να συμπεριλάβει την ανθρώπινη όραση, και τις ακτίνες X των ιατρικών επιστημών. Οι συμβατικές φωτογραφίες, οι αεροφωτογραφίες, η λήψη εικόνων ραντάρ, οι δορυφορικές εικόνες οι μετρήσεις του πεδίου βαρύτητας της γης κ.α. Οι πιο χαρακτηριστικές και διαδεδομένες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης όμως περιορίζονται στις αεροφωτογραφίες και τη λήψη εικόνων από δορυφόρους. Ιδιαίτερη άνθηση εμφάνισε τις δυο τελευταίες δεκαετίες η *δορυφορική τηλεπισκόπηση (satellite remote sensing)*, δηλαδή η καταγραφή δεδομένων από ανιχνευτές οι οποίοι φέρονται από δορυφόρους.

Οι αισθητήρες των δορυφορικών συστημάτων ανιχνεύουν και καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που είτε ανακλάται ή εκπέμπεται από κάποια επιφάνεια σε διάφορες φασματικές περιοχές. Η ακτινοβολία που καταγράφουν οι δορυφορικοί αισθητήρες έχει διαμορφωθεί από την αλληλεπίδραση της με την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της γης και συνεπώς μεταφέρει πληροφορία για τις χημικές και φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας. Η γνώση λοιπόν των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την αλληλεπίδρασή της με την ύλη αποτελεί το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της επιστήμης της τηλεπισκόπησης.

## 1.2 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Κύμα ονομάζεται κάθε διαταραχή που μεταφέρει ενέργεια με ορισμένη ταχύτητα που λέγεται ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από περιοδικές κινήσεις φορτισμένων σωματιδίων (π.χ ταλαντώσεις και περιστροφή μορίων, μεταπτώσεις ηλεκτρονίων σε διαφορετική τροχιά) οι οποίες δημιουργούν περιοδικές διαταραχές στο ηλεκτρικό τους πεδίο που με τη σειρά τους δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στο ηλεκτρικό (Εικόνα 1.1). Τα δυο αυτά πεδία είναι αλληλένδετα και κάθετα μεταξύ τους και οι περιοδικές διαταραχές που δημιουργούνται σε αυτά διαδίδονται στο χώρο με τη μορφή κύματος στο σχηματιζόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μεταφέροντας ηλεκτρική και μαγνητική ενέργεια με την ταχύτητα του φωτός. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα λοιπόν δεν χρειάζονται ελαστικό μέσο για να διαδοθούν, επηρεάζονται όμως από την παρουσία της ύλης. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ουσιαστικά αποτελεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.



Εικόνα 1.1. Στιγμιότυπο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) και τη συχνότητα ( $\nu$ ). Ακολουθεί ο ορισμός των μεγεθών αυτών για την περίπτωση του γραμμικού κύματος δηλ. για κύμα που διαδίδεται σε μία κατεύθυνση:

Μήκος κύματος ( $\lambda$ ) καλείται η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων του κύματος (Εικόνα 1.1). Μονάδα μέτρησης είναι το m, cm, mm,  $\mu\text{m}$  όπου

$$\begin{aligned} 1 \text{ cm} &= 0,01 \text{ m} = 10^{-2} \text{ m} \\ 1 \text{ mm} &= 0,001 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m} \\ 1 \mu\text{m} &= 0,000001 \text{ m} = 10^{-6} \text{ m} \end{aligned}$$

Συχνότητα ( $\nu$ ) του κύματος εκφράζει τον αριθμό των κορυφών (ή κοιλάδων) ( $N$ ) που διέρχονται σε χρονικό διάστημα ( $t$ ) από ένα σταθερό σημείο:

$$\nu = N/t \quad (1.1)$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Hz = 1/sec.

Το γινόμενο του μήκους κύματος ( $\lambda$ ) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος με την αντίστοιχη συχνότητά της ( $\nu$ ) είναι σταθερό και ισούται με την ταχύτητα του φωτός ( $c$ ):

$$\lambda \nu = c \quad (1.2)$$

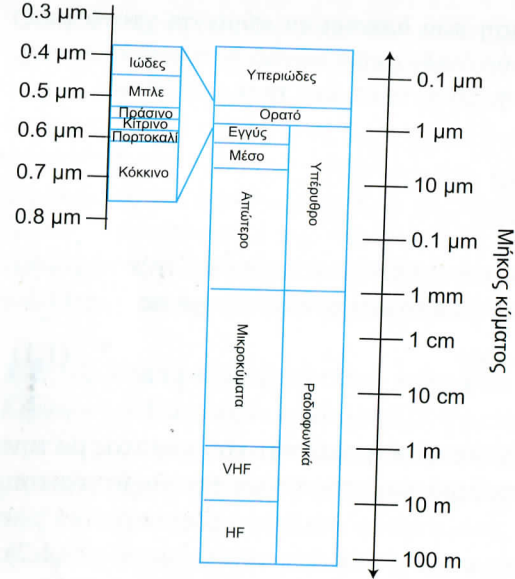
Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από μικρή συχνότητα και αντίστροφα.

## 1.3 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος γης-ατμόσφαιρας είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου. Οι δορυφορικοί αισθητήρες καταγράφουν την ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται από μια γήινη επιφάνεια ή την ακτινοβολία που εκπέμπεται από αυτή. Στην τηλεπισκόπηση, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθορίζεται ποσοτικά από την ένταση ( $I$ ), το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) ή τη συχνότητα ( $\nu$ ) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαιρείται σε περιοχές με βάση το μήκος κύματος ( $\lambda$ ). Το σύνολο των περιοχών αυτών συνιστά το **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα** (Εικόνα 1.2). Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατηγοριοποιείται με βάση τη θέση του μήκους κύματος στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συνίσταται από κύματα με μήκη κύματος από 0.1  $\mu\text{m}$  έως 100 m και χωρίζεται σε περιοχές, όπως το υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, το υπεριώδες, το ορατό κ.ά. (Εικόνα 1.2). Στον Πίνακα 1.1 δίνονται τα όρια των διαφόρων περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης λειτουργούν, κυρίως, στο ορατό και υπέρυθρο φάσμα καθώς και στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Η **ορατή (visible)** περιοχή του φάσματος έχει όρια που καθορίζονται από την ανθρώπινη όραση (0.38  $\mu\text{m}$  έως 0.72  $\mu\text{m}$ ). Η ορατή ακτινοβολία υποδιαιρείται σε τρία βασικά χρώματα, το ιώδες-μπλε (0.4 – 0.5  $\mu\text{m}$ ), το πράσινο (0.5 – 0.6  $\mu\text{m}$ ) και το κόκκινο (0.6 – 0.7  $\mu\text{m}$ ), τα οποία ονομάζονται **πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα (additive primaries)** καθώς κανένα από αυτά τα χρώματα δεν μπορεί να



Εικόνα 1.2. Οι περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

παραχθεί από τη σύνθεση των άλλων δυο. Όλα τα υπόλοιπα χρώματα προκύπτουν από τον κατάλληλο συνδυασμό των τριών πρωτεύοντων χρωμάτων με την κατάλληλη αναλογία.

Το χρώμα ενός σώματος στο ορατό φάσμα ορίζεται από το φάσμα του φωτός που ανακλά. Έτσι για παράδειγμα, ένα αντικείμενο έχει κόκκινο χρώμα επειδή ανακλά ή διαχέει το κόκκινο φως και απορροφά το μπλε και το πράσινο. Τα δευτερεύοντα χρώματα σχηματίζονται όταν ένα αντικείμενο ανακλά δυο ή περισσότερα πρωτεύοντα χρώματα που συνδυαζόμενα μεταξύ τους δίνουν ως αποτέλεσμα ένα δευτερεύον χρώμα. Για παράδειγμα,

το κίτρινο χρώμα προέρχεται από το συνδυασμό του κόκκινου με το πράσινο και ως εκ τούτου ένα σώμα κίτρινου χρώματος θα απορροφά το μπλε και θα ανακλά τα άλλα δυο. Το λευκό χρώμα μπορεί να παραχθεί από το συνδυασμό, σε ίσες αναλογίες, και των τριών πρωτεύοντων χρωμάτων.

Η **υπέρυθρη (infrared)** περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος περιλαμβάνει μήκη κύματος μεγαλύτερα από την περιοχή του κόκκινου τμήματος του ορατού και εκτείνεται από 0.7 μm έως 1000 μm. Διαιρείται σε τρεις ζώνες, αν και τα όριά τους δεν είναι πλήρως καθορισμένα: στο εγγύς, μέσο και απώτερο υπέρυθρο (Πίνακας 1.2). Το εύρος του υπέρυθρου που χρησιμοποιείται στην τηλεπισκόπηση είναι μικρότερο, και εκτείνεται από 0.72 μm έως 15 μm.

Η **εγγύς υπέρυθρη (near infrared)** φασματική ζώνη συνίσταται από μήκη κύματος λίγο μεγαλύτερα από αυτά του ορατού, εκτεινόμενη από το 0.72 μm έως το 1.5 μm. Η **μέση υπέρυθρη (middle infrared)** ακτινοβολία περιλαμβάνει μήκη κύματος από 1.5 μm έως 5.6 μm ενώ η **απώτερη υπέρυθρη (far infrared)** ακτινοβολία καταλαμβάνει μια ευρεία περιοχή του φάσματος με μήκη κύματος από 5.6 μm έως 1000 μm, που εκτείνεται έως την περιοχή των μικροκυμάτων.

Το υπέρυθρο χωρίζεται επίσης σε ανακλώμενο και θερμικό (Πίνακας 1.2). Η υπέρυθρη ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από τον ήλιο και ανακλάται από τη γήινη επιφάνεια, πριν φτάσει στο δορυφορικό ανιχνευτή, ονομάζεται **ανακλώμενη υπέρυθρη (reflected infrared)**. Περιλαμβάνει μήκη κύματος λίγο μεγαλύτερα από αυτά του κόκκινου (0.7 μm έως 3.0 μm) και συμπεριφέρεται με τρόπο ανάλογο με το ορατό φάσμα. Για το λόγο αυτό, στις εφαρμογές της τηλεπισκόπησης

Πίνακας 1.1. Τα όρια, οι ονομασίες και οι πηγές των περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Μήκος Κύματος (μm)	Φασματική Περιοχή	Πηγή
<10 <sup>-5</sup>	ακτίνες γ	πυρηνικές διασπάσεις και διάσπαση β διάσπαση β και μετάπτωση ηλεκτρονίων μετάπτωση ηλεκτρονίων μετάπτωση ηλεκτρονίων
10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-2</sup>	ακτίνες x	
0.01 - 0.38	υπεριώδες	
0.38 - 0.72	ορατό	
0.72 - 1.5	εγγύς υπέρυθρο	
1.5 - 5.6	μέσο υπέρυθρο	ταλάντωση και περιστροφή μορίων
5.6 - 1000	απώτερο υπέρυθρο	ταλάντωση και περιστροφή μορίων
10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup>	μικροκύματα	Radar TV Radio FM -AM
10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>	VHF	
10 <sup>7</sup> - 10 <sup>8</sup>	HF	

Πίνακας 1.2. Τα δυο είδη υποδιαίρεσεων της υπέρυθρου φασματικής περιοχής.

Μήκος Κύματος (μm)	Φασματική Περιοχή
0.72 - 1.5	εγγύς υπέρυθρο
1.5 - 5.6	μέσο υπέρυθρο
5.6 - 1000	απώτερο υπέρυθρο
0.72 - 3.0	ανακλώμενο υπέρυθρο
3.0 - 1000	θερμικό υπέρυθρο

που καταγράφουν στο ανακλώμενο υπέρυθρο χρησιμοποιούνται, πέραν των ειδικών οπτικοηλεκτρονικών ανιχνευτών, και φίλτρα, φιλμ και φωτογραφικές μηχανές με παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά της συμβατικής φωτογραφίας στο ορατό φάσμα. Η υπέρυθρη ακτινοβολία με μήκη κύματος που εκτείνονται από 3 μm έως και 1000 μm (1 mm) εκπέμπεται από τη γη και για αυτό το λόγο καλείται **θερμική υπέρυθρη (thermal infrared)** ακτινοβολία. Το θερμικό υπέρυθρο απορροφάται από τους φακούς των συμβατικών φωτογραφικών μηχανών και κατά συνέπεια δεν μπορεί να ανιχνευτεί με τα συμβατικά φωτογραφικά φιλμ. Χρησιμοποιούνται όμως ειδικοί αισθητήρες η λειτουργία των οποίων βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (βλ. παρακάτω).

Η **μικροκυματική ακτινοβολία** ή αλλιώς **μικροκύματα (microwaves)** περιλαμβάνει μεγάλα μήκη κύματος που εκτείνονται από 1 mm έως 1 m. Η φασματική περιοχή των μικροκυμάτων με τα μικρότερα μήκη κύματος έχει παρόμοιες ιδιότητες με τη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή έχει την ιδιότητα να διαπερνά τα νέφη και να εισχωρεί βαθιά σε μια γήινη επιφάνεια, ανάλογα με το μήκος κύματος της.

### 1.4 Νόμοι και μεγέθη της ακτινοβολίας

#### 1.4.1 Βασικά μεγέθη της ακτινοβολίας

Κάθε σώμα εκπέμπει προς το περιβάλλον, αλλά παράλληλα δέχεται και απορροφά

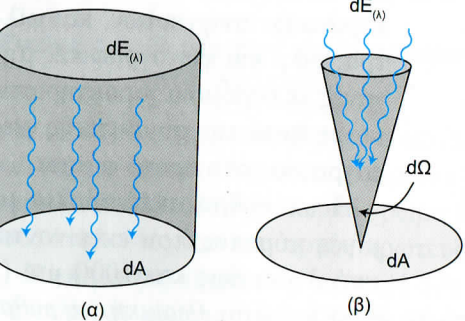
ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Όταν το ενδιαφέρον εστιάζεται στην ακτινοβολία που εκπέμπει το σώμα, τότε αυτό χαρακτηρίζεται ως *πηγή*. Στην αντίθετη περίπτωση χαρακτηρίζεται ως *δέκτης*.

Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται κυρίως τα μεγέθη της *ροής* και της *έντασης* της ακτινοβολίας:

**α. Ροή ακτινοβολίας**

**Ροή ακτινοβολίας,  $F$  (irradiance)** σε μια διεύθυνση ορίζεται το ποσό της ενέργειας  $dE$  ακτινοβολίας από μια δέσμη παράλληλων ακτινών, που διέρχεται σε χρόνο  $dt$  μέσα από μία στοιχειώδη επιφάνεια  $dA$ , η οποία είναι τοποθετημένη κάθετα στη διεύθυνση αυτή (Εικόνα 1.3α) και δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{dE}{dA dt} \tag{1.3}$$



**Εικόνα 1.3.** (α) Παράλληλη δέσμη ακτινών που διέρχονται από μια στοιχειώδη επιφάνεια  $dA$  η οποία είναι τοποθετημένη κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. (β) Ακτινοβολία η οποία διέρχεται μέσα σε στερεά γωνία  $d\Omega$ , μέσα από μία στοιχειώδη επιφάνεια  $dA$  τοποθετημένη κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας.

Η ροή έχει μονάδα ισχύος στη μονάδα της επιφάνειας και εκφράζεται συνήθως σε  $W/m^2$ .

Ο προηγούμενος ορισμός αναφέρεται σε ροή ακτινοβολίας για όλα τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας, για το λόγο αυτό η ροή αυτή  $F$  καλείται και **ολική ή ολοφασματική ροή (total irradiance)**. Αν θεωρήσουμε ακτινοβολία μήκους κύματος μεταξύ  $\lambda$  και  $d\lambda$  τότε το προηγούμενο μέγεθος αναφέρεται ως **φασματική ροή ακτινοβολίας,  $F_{(\lambda)}$  (spectral irradiance)**:

$$F_{(\lambda)} = \frac{dE_{(\lambda)}}{dA dt d\lambda} \tag{1.4}$$

Η μονάδα μέτρησης το  $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ .

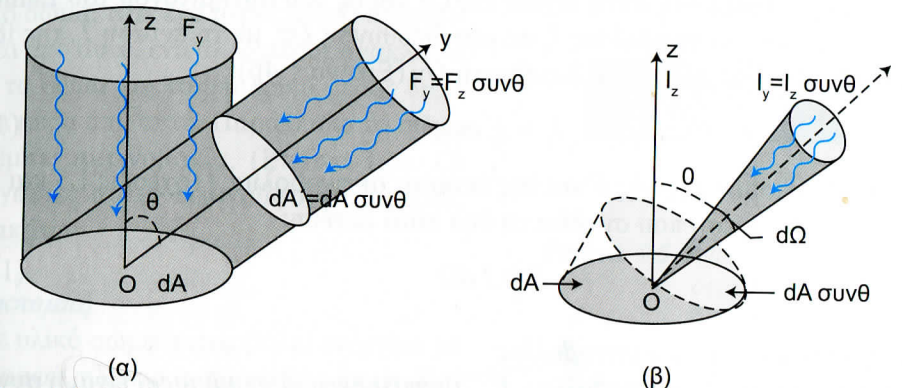
Η ολοκλήρωση της φασματικής ροής ακτινοβολίας  $F_{(\lambda)}$  για όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μας δίνει την **ολική ή ολοφασματική ροή  $F$** :

$$F = \int_0^{\infty} F_{(\lambda)} d\lambda \tag{1.5}$$

Γενικά η ροή σε ένα σημείο  $O$  για διάφορες διευθύνσεις είναι διαφορετική. Ο **νόμος του συνημιτόνου του Lambert** συνδέει τη ροή της ακτινοβολίας  $F_z$  σε μια διεύθυνση  $Oz$ , με τη ροή  $F_y$  της ίδιας ακτινοβολίας σε μια τυχαία διεύθυνση  $Oy$ . (Εικόνα 1.4α). Δίνεται από τη σχέση:

$$F_y = F_z \cos\theta \tag{1.6}$$

όπου  $\theta$  η γωνία μεταξύ των δυο διευθύνσεων  $Oy$  και  $Oz$ .



**Εικόνα 1.4.** (α) Η σχέση της ροής ακτινοβολίας  $F_z$  σε μια διεύθυνση  $Oz$ , με τη ροή  $F_y$  της ίδιας ακτινοβολίας σε μια τυχαία διεύθυνση  $Oy$ . (β) Η αντίστοιχη σχέση για τις εντάσεις ακτινοβολίας  $I_z$  και  $I_y$ . Η επιφάνεια  $dA' = dA \cos\theta$  αποτελεί την προβολή της  $dA$  στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας.

Ο ορισμός της ροής είναι επαρκής για την εκτίμηση της ενέργειας που μεταφέρεται από μια δέσμη παράλληλων ακτινών. Όταν όμως η ακτινοβολία διαδίδεται σε διάφορες διευθύνσεις τότε χρησιμοποιείται το μέγεθος της έντασης ακτινοβολίας.

**β. Ένταση ακτινοβολίας**

**Ένταση ακτινοβολίας,  $I$  (radiative intensity or radiance)** σε μια διεύθυνση ορίζεται το ποσό της ενέργειας  $dE$  ακτινοβολίας που διέρχεται σε χρόνο  $dt$  μέσα σε στερεά γωνία  $d\Omega$ , μέσα από μία στοιχειώδη επιφάνεια  $dA$ , η οποία είναι τοποθετημένη κάθετα στη διεύθυνση αυτή (Εικόνα 1.3β). Δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{dE}{dt d\Omega dA} \tag{1.7}$$

με μονάδα μέτρησης το  $Wm^{-2}sr^{-1}$ .

Ο προηγούμενος ορισμός αναφέρεται στην **ολική ή ολοφασματική ένταση ακτινοβολίας  $I$  (total radiance)**, δηλ. στην ένταση ακτινοβολίας για όλα τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Αν θεωρήσουμε ακτινοβολία μήκους κύματος μεταξύ  $\lambda$  και  $d\lambda$  τότε το προηγούμενο μέγεθος αναφέρεται ως **φασματική ή ειδική ένταση ακτινοβολίας,  $I_{(\lambda)}$  (specific radiative intensity or spectral radiance)**:

$$I_{(\lambda)} = \frac{dE_{(\lambda)}}{dt d\Omega dA d\lambda} \quad (1.8)$$

Η μονάδα μέτρησης το  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ .

Η ένταση ακτινοβολίας εξαρτάται από τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή ισχύει πάλι ο νόμος του συνημίτονου του Lambert. Η ένταση ακτινοβολίας  $I_z$  σε μια διεύθυνση  $Oz$ , με τη ένταση  $I_y$  της ίδιας ακτινοβολίας σε μια τυχαία διεύθυνση  $Oy$  (Εικόνα 1.4β):

$$I_y = I_z \cos\theta \quad (1.9)$$

Από τον ορισμό της ροής  $F$  και της έντασης ακτινοβολίας  $I$  (σχέσεις 1.3 και 1.7) προκύπτει η σχέση που συνδέει τα δυο αυτά μεγέθη:

$$F = I d\Omega \quad (1.10)$$

### Ημισφαιρική ροή ακτινοβολίας

Η **ημισφαιρική ροή ακτινοβολίας,  $F_{\eta\mu}$  (hemispherical irradiance)** είναι η συνολική ροή ακτινοβολίας  $F$  η οποία διέρχεται από μία στοιχειώδη επιφάνεια  $dA$  από όλες τις διευθύνσεις (μέσα σε ένα ημισφαίριο με βάση  $dA$ ). Δίνεται από το ολοκλήρωμα της έντασης ακτινοβολίας  $I$  ως προς όλες τις στερεές γωνίες  $d\Omega$  που προέρχονται από την επιφάνεια  $dA$ :

$$F_{\eta\mu} = \int_{\Omega} I \cos\theta d\Omega \quad (1.11)$$

Για τον υπολογισμό της χρειάζεται η αναλυτική ένταση της ακτινοβολίας στις διαφορετικές διευθύνσεις (ως προς τη ζενιθιακή γωνία  $\theta$  και αζιμουθιακή γωνία  $\varphi$ ). Στην περίπτωση που η ακτινοβολία είναι ομογενής και ισότροπη, δηλ. όταν σε κάθε σημείο του πεδίου η ένταση ακτινοβολίας είναι ίδια και σταθερή προς όλες τις διευθύνσεις, τότε η ένταση της ακτινοβολίας  $I$  είναι σταθερή και ανεξάρτητη των γωνιών  $\varphi$  και  $\theta$ . Τότε εύκολα αποδεικνύεται από τη σχέση (1.11) ότι η ημισφαιρική ροή δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\eta\mu} = \pi I \quad (1.12)$$

Για παράλληλη δέσμη ακτινοβολίας ισχύει:

$$F_{\eta\mu} = I \cos\theta \quad (1.13)$$

όπου  $\theta$  η ζενιθιακή γωνία της διεύθυνσης διάδοσης της ακτινοβολίας δηλ. η γωνία που σχηματίζεται από την κάθετη στην επιφάνεια και τη διεύθυνση της δέσμης.

### 1.4.2 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη

Όταν μια ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα υλικό σώμα, τότε ένα μέρος αυτής απορροφάται από αυτό, ένα άλλο μέρος ανακλάται από το σώμα και το υπόλοιπο μέρος διέρχεται μέσα από αυτό. Παράλληλα το σώμα εκπέμπει ακτινοβολία. (Εικόνα 1.5). Οι διεργασίες αυτές περιγράφονται αμέσως παρακάτω:

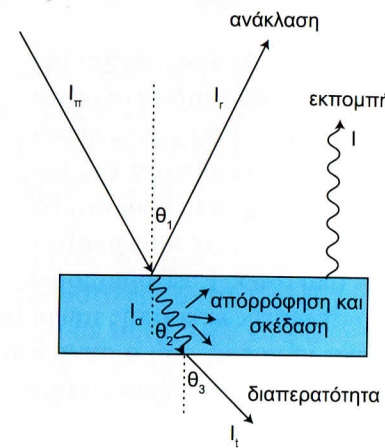
#### α. Εκπομπή

Κάθε υλικό σώμα ακτινοβολεί ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό καλείται **εκπομπή (emission)** ακτινοβολίας. Η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από τη **θερμοκρασία** του σώματος. Όσο πιο θερμό είναι ένα σώμα τόσο πιο έντονα ακτινοβολεί και μάλιστα σε πιο μικρά μήκη κύματος. Εκτός όμως από τη θερμοκρασία η ένταση της ακτινοβολίας ενός σώματος εξαρτάται και από τη **φύση** του σώματος.

Για τη μελέτη της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα υλικό σώμα χρησιμοποιείται η έννοια του μέλανος (μαύρου) σώματος. **Μέλαν σώμα (blackbody)** είναι το υποθετικό σώμα το οποίου η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, σε κάθε μήκος κύματος και σε κάθε θερμοκρασία, είναι η μέγιστη δυνατή. Το μέλαν σώμα απορροφά πλήρως την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος που προσπίπτει σε αυτό και είναι ισότροπη πηγή δηλ. εκπέμπει σταθερή ένταση ακτινοβολίας προς όλες τις διευθύνσεις.

Τα περισσότερα υλικά σώματα δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα. Για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια του συντελεστή εκπομπής, ο οποίος εκφράζει την ικανότητα του πραγματικού σώματος να εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε σχέση με αυτή του μέλανος σώματος.

Ο **συντελεστής εκπομπής  $\epsilon_{(\lambda)}$  (emissivity)** ενός πραγματικού σώματος για ένα ορισμένο μήκος κύματος  $\lambda$ , ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας  $I_{(\lambda)}$



Εικόνα 1.5. Ανάκλαση, εκπομπή, απορρόφηση και διαπερατότητα της ακτινοβολίας.

του ίδιου μήκους κύματος που εκπέμπει το μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία, δηλαδή:

$$\alpha_{(\lambda)} = \frac{I_{(\lambda)}}{I_{M(\lambda)}} \quad (1.14)$$

Ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος, το μήκος κύματος και τη διεύθυνση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Το εύρος των τιμών του κυμαίνεται από 0 έως 1. Εξ ορισμού ο συντελεστής εκπομπής του μέλανος σώματος είναι ίσος με τη μονάδα για όλα τα μήκη κύματος, ενώ ο συντελεστής εκπομπής ενός πραγματικού σώματος είναι συνάρτηση του μήκους κύματος και έχει τιμή μικρότερη της μονάδας (Εικόνα 1.6).

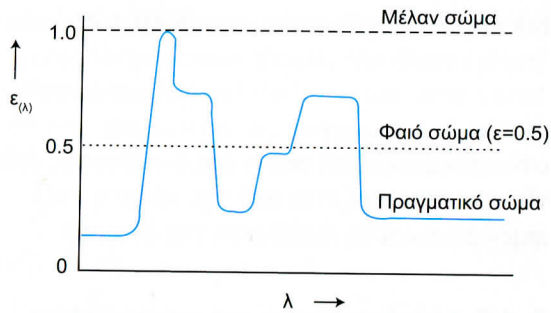
Ο ολικός ή ολοφασματικός συντελεστής εκπομπής  $\epsilon_{ολ}$  αναφέρεται στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα πραγματικό σώμα θερμοκρασίας  $T$  σε όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon_{ολ} = \frac{\int_0^{\infty} I_{(\lambda)} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{M(\lambda)} d\lambda} = \frac{I}{I_M} \quad (1.15)$$

όπου  $I$  η ολική ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει το πραγματικό σώμα δηλ. για όλα τα μήκη κύματος σε θερμοκρασία  $T$ , και  $I_M$  η ολική ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα, στην ίδια θερμοκρασία.

Στην πραγματικότητα τα υλικά σώματα δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα, καθώς έχουν συντελεστή εκπομπής η τιμή του οποίου είναι μικρότερη της μονάδας σε διάφορα μήκη κύματος (Εικόνα 1.6). Ανάλογα όμως με την περίπτωση μπορούν να γίνουν ορισμένες προσεγγίσεις. Για παράδειγμα, ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί μέλαν σώμα.

Ένα πραγματικό όμως σώμα μπορεί να συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα σε ορισμένα μόνο μήκη κύματος. Για παράδειγμα, τα περισσότερα σώματα στη γη συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου (10-12  $\mu\text{m}$ ). Ορίζουμε ως **φαιό σώμα** (graybody) ένα πραγματικό σώμα το οποίο έχει σταθερή ικανότητα εκπομπής  $\epsilon_{(\lambda)}$  για όλα τα μήκη κύματος, με τιμή μικρότερη της μονάδας (Εικόνα 1.6).



**Εικόνα 1.6.** Η φασματική κατανομή της ικανότητας εκπομπής  $\epsilon_{(\lambda)}$  μέλανος, πραγματικού και φαιού σώματος (Πηγή: Lillesand and Kiefer, 1979).

### β. Απορρόφηση

Όταν η ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα σώμα, τότε ένα μέρος αυτής απορροφάται με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του σώματος αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό καλείται **απορρόφηση (absorption)** της ακτινοβολίας.

Το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος, τη φύση του υλικού και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Το μέλαν σώμα απορροφά πλήρως την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος. Τα πετρώματα της γης είναι καλοί απορροφητές σε αντίθεση με το χιόνι και τον πάγο. Ιδιαίτερα, το χρώμα του σώματος παίζει σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση της ακτινοβολίας στο ορατό φάσμα. Είναι γνωστό ότι τα σώματα με σκούρο χρώμα είναι καλύτεροι απορροφητές της ορατής ακτινοβολίας από τα σώματα με ανοικτά χρώματα.

Ο **συντελεστής απορρόφησης  $\alpha_{(\lambda)}$**  (absorptivity) ενός πραγματικού σώματος, για ένα ορισμένο μήκος κύματος  $\lambda$ , εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφά το σώμα, όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε αυτό. Ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας  $I_{\alpha(\lambda)}$  που απορροφά το σώμα, προς την ένταση της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας  $I_{\pi(\lambda)}$ :

$$\alpha_{(\lambda)} = \frac{I_{\alpha(\lambda)}}{I_{\pi(\lambda)}} \quad (1.16)$$

Κατ' αναλογία με τον ολικό συντελεστή εκπομπής ορίζεται και ο ολικός ή ολοφασματικός συντελεστής απορρόφησης  $\alpha_{ολ}$  ο οποίος αναφέρεται στο ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα πραγματικό σώμα σε όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος:

$$\alpha_{ολ} = \frac{\int_0^{\infty} I_{\alpha(\lambda)} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\pi(\lambda)} d\lambda} = \frac{I_{\alpha}}{I_{\pi}} \quad (1.17)$$

όπου  $I_{\pi}$  η ολική ένταση ακτινοβολίας που προσπίπτει στο σώμα δηλ. για όλα τα μήκη κύματος, και  $I_{\alpha}$  η ολική ένταση ακτινοβολίας που απορροφά το σώμα.

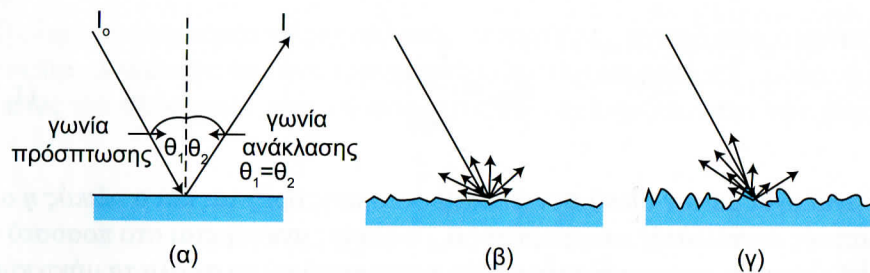
### γ. Ανάκλαση

Όταν μια ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα υλικό σώμα, τότε ένα μέρος αυτής απορροφάται, ενώ το υπόλοιπο μέρος της ανακλάται σε άλλη κατεύθυνση χωρίς να

μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας (Εικόνα 1.6). Το φαινόμενο αυτό καλείται **ανάκλαση** (*reflection*). Ουσιαστικά, η ανάκλαση είναι η αντίθετη διεργασία της απορρόφησης καθώς εάν μια ακτινοβολία ανακλάται δεν απορροφάται και αντίστροφα. Αυτό για παράδειγμα συμβαίνει με το χιόνι καθώς αυτό ανακλά το μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ορατής ακτινοβολίας και απορροφά ελάχιστη από αυτή.

Η διεργασία της ανάκλασης συνίσταται στην αλλαγή της διεύθυνσης της ακτινοβολίας κατά την πρόσπτωση της σε μια αδιαφανή επιφάνεια και εξαρτάται από την **τραχύτητα** της επιφάνειας σε σχέση με το **μήκος κύματος** της ακτινοβολίας.

Εάν η επιφάνεια είναι ομαλή και λεία σε σχέση με το μήκος κύματος, τότε όλη ή μέρος της ακτινοβολίας επιστρέφει σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση και η ανάκλαση ονομάζεται **κατοπτρική** (*specular*). Στην περίπτωση αυτή η γωνία ανάκλασης είναι ίση με την γωνία πρόσπτωσης (Εικόνα 1.7α). Εάν η επιφάνεια είναι ανώμαλη σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας τότε η ακτινοβολία διασκορπίζεται προς όλες τις διευθύνσεις και η ανάκλαση ονομάζεται **διάχυση** (*diffusion*) (Εικόνα 1.7β,γ).



**Εικόνα 1.7.** Ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες (α) κατοπτρική ανάκλαση, (β) διάχυση σε επιφάνεια μικρής τραχύτητας, (γ) διάχυση σε επιφάνεια μεγάλης τραχύτητας.

Κατ' αναλογία με το συντελεστή απορρόφησης, ορίζεται ο **συντελεστής ανάκλασης ή ανακλαστικότητα**  $r_{(\lambda)}$  (*reflectivity*) ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας σε ένα σώμα ακτινοβολίας που ανακλάται από αυτό. Ο συντελεστής ανάκλασης ενός πραγματικού σώματος, για ένα ορισμένο μήκος κύματος  $\lambda$ , ορίζεται από το λόγο της έντασης της ανακλώμενης ακτινοβολίας  $I_{r(\lambda)}$  προς την ένταση της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας  $I_{\pi(\lambda)}$ :

$$r_{(\lambda)} = \frac{I_{r(\lambda)}}{I_{\pi(\lambda)}} \quad (1.18)$$

Η ανακλαστικότητα ενός σώματος εξαρτάται εκτός από το **μήκος κύματος** της ακτινοβολίας και από τη **διεύθυνση** της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλλά και

από τη **φύση** και το **είδος** της επιφάνειας του σώματος. Εκφράζεται επί τοις εκατό και μπορεί να αναφέρεται σε ολόκληρο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας ή μόνο στην ορατή περιοχή του φάσματος.

#### δ. Σκέδαση

Η διαδικασία απομάκρυνσης των φωτονίων από την αρχική δέσμη και η μεταβολή της διεύθυνσης κίνησής τους κατά την πρόσκρουση της ακτινοβολίας στα αιωρούμενα σωματίδια ή στα μόρια ενός ρευστού καλείται **σκέδαση** (*scattering*). Η ένταση της σκέδασης εξαρτάται από το **μέγεθος** των σωματιδίων αυτών, τη **συγκέντρωσή τους**, το **μήκος κύματος** της ακτινοβολίας και το **μήκος διαδρομής** της ακτινοβολίας στο ρευστό.

#### ε. Διαπερατότητα

Στην περίπτωση που το σώμα είναι διαφανές στην προσπίπτουσα ακτινοβολία τότε ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διέρχεται μέσα από το σώμα (Εικόνα 1.5). Το φαινόμενο αυτό καλείται **διαπερατότητα** (*transmission*).

Η διαπερατότητα ενός σώματος μετράται με το **συντελεστή διαπερατότητας**  $t_{(\lambda)}$  ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που διαπερνά ένα σώμα, σε σχέση με την ακτινοβολία που δέχεται. Ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας  $I_{t(\lambda)}$  που διαπερνά το σώμα, προς την ένταση της ακτινοβολίας που αυτό δέχεται:

$$a_{(\lambda)} = \frac{I_{t(\lambda)}}{I_{\pi(\lambda)} - I_{r(\lambda)}} \quad (1.19)$$

όπου  $I_{\pi(\lambda)}$  η προσπίπτουσα στο σώμα ακτινοβολία και  $I_{r(\lambda)}$  η ανακλώμενη ακτινοβολία.

Η διαπερατότητα ενός σώματος εξαρτάται εκτός από τη **φύση** του σώματος και από το **μήκος κύματος** της ακτινοβολίας. Η ατμόσφαιρα, για παράδειγμα, είναι αρκετά διαπερατή στην ηλιακή ακτινοβολία ενώ αντίθετα η διαπερατότητα της σε ορισμένα μήκη κύματος στην περιοχή του θερμικού υπερύθρου είναι μηδενική.

Κατά τη διέλευση της ακτινοβολίας από ένα μέσο στο άλλο με διαφορετική οπτική πυκνότητα, η διεύθυνση της ακτινοβολίας αλλάζει ως αποτέλεσμα της διαφορετικής ταχύτητας διάδοσης της ακτινοβολίας στα δυο μέσα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **διάθλαση** (*defraction*). Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από το συντελεστή διάθλασης  $n$ :

$$n = c/c_n \quad (1.20)$$

όπου  $c$  και  $c_n$  η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας στο κενό και στο συγκεκριμένο υλικό αντίστοιχα.

Η συχνότητα της ακτινοβολίας  $\nu$  δεν αλλάζει κατά τη διέλευση αυτής από το

ένα μέσο στο άλλο. Σύμφωνα με τη σχέση (1.2)  $\lambda \nu = c$ , αφού η συχνότητα  $\nu$  παραμένει σταθερή, θα πρέπει να αλλάξει το μήκος κύματος  $\lambda$ . Κατά συνέπεια ο προηγούμενος ορισμός του συντελεστή διάθλασης μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

$$n = \lambda/\lambda_n \quad (1.21)$$

όπου  $\lambda$  και  $\lambda_n$  το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο κενό και στο συγκεκριμένο υλικό αντίστοιχα.

**στ. Σχέση μεταξύ των συντελεστών εκπομπής, διαπερατότητας και ανάκλασης**

Οι συντελεστές εκπομπής  $\epsilon$ , διαπερατότητας  $t$  και ανάκλασης  $r$  συνδέονται με τη σχέση:

$$\epsilon = (1 - t) (1 - r) \quad (1.22)$$

Για πλήρως αδιαφανή σώματα, όπως είναι η επιφάνεια της γης, είναι  $t = 0$ , οπότε με βάση τη σχέση (1.22), ισχύει:

$$\epsilon = 1 - r \quad (1.23)$$

Η προηγούμενη σχέση ερμηνεύεται ως εξής: ένας καλός ανακλαστήρας είναι κακός πομπός ακτινοβολίας και αντίστροφα.

**1.4.3 Νόμοι της ακτινοβολίας**

Για την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα ισχύουν οι εξής νόμοι:

**α. Ο νόμος του Planck**

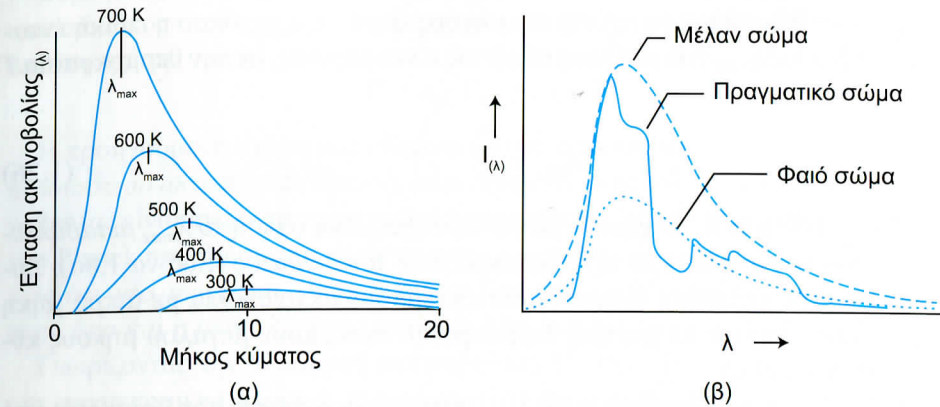
Ο νόμος του Planck δίνει τη σχέση της ειδικής έντασης ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ( $I_{(\lambda)M}$ ) με την θερμοκρασία του  $T$  και το μήκος κύματος  $\lambda$  της ακτινοβολίας. Ο νόμος του Planck εκφράζεται από τη σχέση:

$$I_{(\lambda)M} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (1.24)$$

όπου  $c_1 = 3.7 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$  και  $c_2 = 1.43 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$ .

Στην Εικόνα 1.8α παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του νόμου του Planck με βάση την προηγούμενη σχέση. Για κάθε θερμοκρασία υπάρχει ένα μήκος κύματος  $\lambda_{max}$  για το οποίο το μέλαν σώμα ακτινοβολεί με την μέγιστη ένταση  $I_{max}$ . Παρατηρείται ότι το  $\lambda_{max}$  μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος. Το εμβαδό της επιφάνειας που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη εκφράζει την ολική ροή ακτινοβολίας.

Τα πραγματικά σώματα, όπως η γη και τα περισσότερα σώματα στη γη, δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα διότι η ικανότητα εκπομπής της μεταβάλλεται με το μήκος κύματος, επηρεάζοντας έτσι την ολική ροή της ακτινοβολίας



**Εικόνα 1.8.** (α) Η γραφική παράσταση του νόμου του Planck για μέλαν σώμα σε διάφορες θερμοκρασίες. (β) Ο νόμος του Planck για συγκεκριμένη θερμοκρασία  $T$  για τα τρία σώματα: μέλαν, πραγματικό και φαϊό σώμα (Πηγή: Lillesand and Kiefer, 1979).

Γ. Συγκεκριμένα, η ειδική ένταση της ακτινοβολίας  $I_{(\lambda)}$  ενός πραγματικού σώματος, με μήκος κύματος  $\lambda$ , εξαρτάται από την θερμοκρασία  $T$ , το μήκος κύματος  $\lambda$  της ακτινοβολίας και την ικανότητα εκπομπής  $\epsilon_{(\lambda)}$  στο συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda$ , σύμφωνα με την σχέση:

$$I_{(\lambda)} = \epsilon_{(\lambda)} I_{(\lambda)M} = \epsilon_{(\lambda)} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (1.25)$$

Η φασματική κατανομή της έντασης ακτινοβολίας μέλανος, φαϊού και ενός πραγματικού σώματος παρουσιάζεται ποιοτικά στην Εικόνα 1.8β.

Αξίζει να τονιστεί ότι η ικανότητα εκπομπής  $\epsilon_{(\lambda)}$  ενός σώματος, για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda$ , αλλάζει με τη θερμοκρασία του. Το έδαφος της γης δεν συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα γιατί η ικανότητα εκπομπής του  $\epsilon_{(\lambda)}$  διαφέρει στα διάφορα μήκη κύματος, με αποτέλεσμα η ολική ικανότητα εκπομπής  $\epsilon_{(ολ)}$  να είναι διάφορη της μονάδας. Για τα μήκη κύματος από 8 έως 14  $\mu\text{m}$ , τα οποία, κυρίως, ανιχνεύουν οι δορυφορικοί αισθητήρες, η επιφάνεια της γης, εκτός των αστικών πλεγμάτων, καθώς και τα πυκνά νέφη, έχουν ικανότητα εκπομπής που προσεγγίζει την τιμή της μονάδας, με αποτέλεσμα τα σώματα να συμπεριφέρονται ως φαϊά σώματα. Υπάρχουν όμως ορισμένες εξαιρέσεις, όπως το χιόνι και η βλάστηση των οποίων οι ικανότητες εκπομπής και απορρόφησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος και συνεπώς οι επιφάνειές τους δεν συμπεριφέρονται ως αληθινά φαϊά σώματα. Το χιόνι απορροφά, σχετικά, ασθενώς στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα και έντονα στις υπόλοιπες περιοχές της υπέρυθρης ακτινοβολίας.



κύματος όταν βρεθεί σε κατάσταση διέγερσης. Επίσης, μια άλλη ερμηνεία του νόμου αυτού είναι ότι το σώμα απορροφά τα μήκη κύματος ακτινοβολίας τα οποία μπορεί να εκπέμψει, όταν βρεθεί σε κατάσταση διέγερσης.

**ε. Ο νόμος του Beer-Lambert**

Όταν μια ακτινοβολία προσπέσει σε ένα υλικό που δεν είναι τέλειο σώμα, τότε ένα μέρος της θα σκεδαστεί, ένα μέρος θα απορροφηθεί και το υπόλοιπο θα περάσει μέσα από το σώμα. Σύμφωνα με το **νόμο του Beer-Lambert**, η μείωση της ειδικής έντασης της ακτινοβολίας  $dI_{(\lambda)}$  λόγω απορρόφησης κατά τη διέλευσή της μέσα από ένα ρευστό είναι ανάλογη της έντασης  $I_{(\lambda)}$  της εισερχόμενης ακτινοβολίας, της πυκνότητας  $\rho$  του ρευστού και του μήκους διαδρομής  $dx$  μέσα στο ρευστό και εκφράζεται από τη σχέση:

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} k_{\lambda}^{ap} \rho dx \tag{1.30}$$

όπου  $k_{\lambda}^{ap}$  ο συντελεστής εξασθένησης λόγω απορρόφησης του ρευστού ο οποίος εξαρτάται από τη φύση του υλικού και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ισούται με  $\sigma/m$ , όπου  $\sigma$  η ενεργός διατομή των σωματιδίων και  $m$  η μάζα των σωματιδίων του ρευστού, και μετράται σε  $m^2/Kgr$ .

Αν πέραν της απορρόφησης υπάρχει και σκέδαση δηλ. απομάκρυνση των φωτονίων από την αρχική δέσμη και μεταβολή της διεύθυνσης κίνησής τους, τότε κατ' αναλογία προς τη σχέση 1.30 ο νόμος του Beer-Lambert θα δίνεται από τη σχέση:

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} (k_{\lambda}^{ap} + k_{\lambda}^{σκ}) \rho dx \tag{1.31}$$

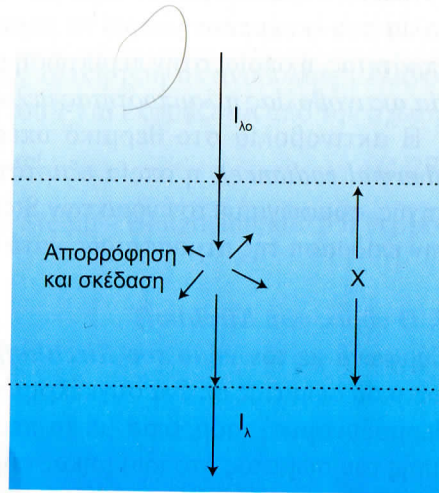
όπου  $k_{\lambda}^{σκ}$  ο συντελεστής εξασθένησης λόγω σκέδασης.

Αν σε ένα υλικό συμβαίνει και σκέδαση και απορρόφηση, τότε ο νόμος του Beer-Lambert εκφράζεται από τη σχέση:

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} (k_{\lambda}^{ap} + k_{\lambda}^{σκ}) \rho dx \tag{1.32}$$

Οι προηγούμενες σχέσεις παίρνουν τη μορφή:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda_0} e^{-k_{\lambda} \rho x} \tag{1.33}$$



**Εικόνα 1.10.** Η εξασθένηση ακτινοβολίας έντασης  $I_{\lambda_0}$  κατά τη διέλευσή της μέσα από ρευστό με μήκος διαδρομής  $x$ .

όπου  $I_{\lambda_0}$  η αρχική ένταση ακτινοβολίας,  $I_{\lambda}$  η ένταση ακτινοβολίας μετά τη διέλευση απόστασης  $x$  μέσα στο υλικό,  $k_{\lambda}$  ο συντελεστής εξασθένησης λόγω σκέδασης ή απορρόφησης ή και των δυο και  $\rho$  η μέση πυκνότητα του στρώματος  $x$  (Εικόνα 1.10).

Η προηγούμενη σχέση πολλές φορές εκφράζεται ως:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda_0} e^{-u} \tag{1.34}$$

όπου  $u$  το *οπτικό πάχος* (optical depth) του ρευστού, το οποίο εξαρτάται από τη φύση του υλικού ( $k_{\lambda}$ ), την περιεκτικότητα του σε σωματίδια ( $\rho$ ) και το γεωμετρικό πάχος ( $x$ ) του στρώματος.

**στ. Ο νόμος του Snell**

Ο **νόμος του Snell** περιγράφει τη σχέση της αλλαγής της διεύθυνσης της ακτινοβολίας κατά τη διέλευση της από ένα μέσο σε ένα άλλο:

$$n_1 \eta \mu \theta_1 = n_2 \eta \mu \theta_2 \tag{1.35}$$

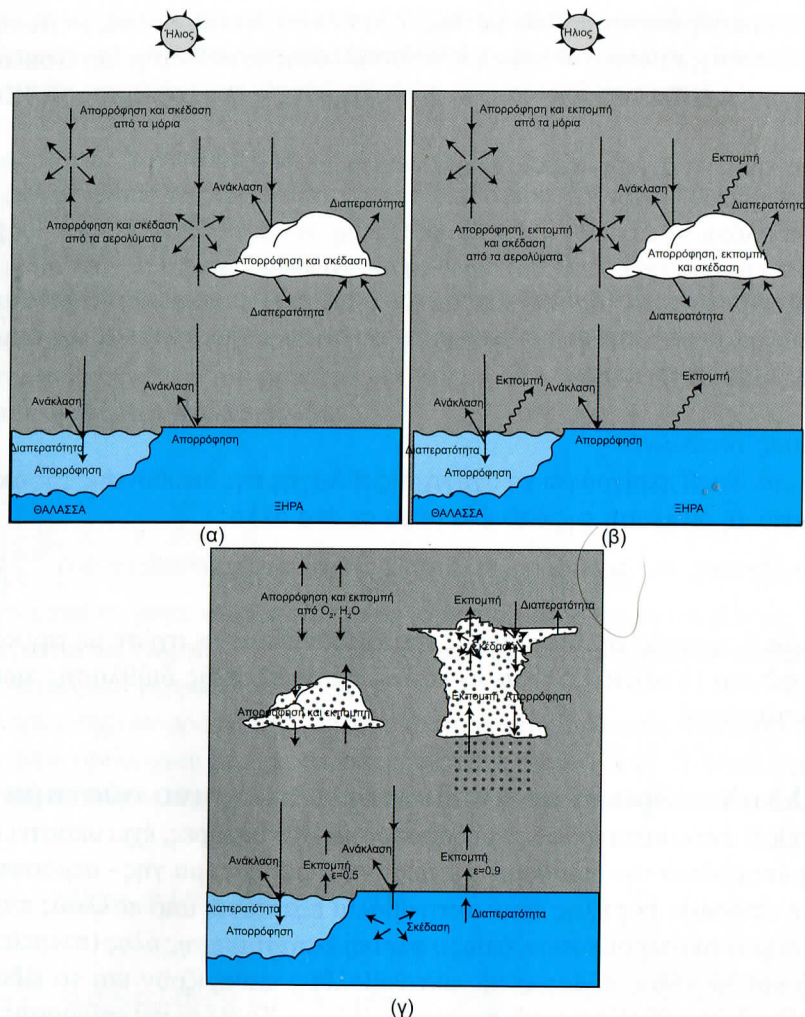
όπου  $\theta_1$  και  $\theta_2$  η γωνία της διεύθυνσης της ακτινοβολίας σε σχέση με την κάθετη στην επιφάνεια (Εικόνα 1.5) και  $n_1$  και  $n_2$  ο συντελεστής διάθλασης των δυο μέσων αντίστοιχα.

**1.5 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με το γήινο σύστημα**

Η ακτινοβολία που καταγράφουν οι δορυφορικοί αισθητήρες, έχει υποστεί αρκετές επιδράσεις κατά την διαδρομή της μέσα από το σύστημα γης - ατμόσφαιρας. Γενικά, η επίδραση της ύλης στην ακτινοβολία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι σημαντικότεροι αυτών, όπως η φυσική κατάσταση της ύλης (στερεά, υγρά ή αέρια) και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, καθορίζουν και το είδος της επίδρασης π.χ. σκέδαση, απορρόφηση και ανάκλαση. Το είδος της επίδρασης εξαρτάται από την φασματική περιοχή της διαδιδόμενης ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.11.

**1.5.1 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με επιφάνειες στο έδαφος**

Η γήινη επιφάνεια ανακλά και απορροφά την ηλιακή (μικρού μήκους κύματος) και ατμοσφαιρική (υπέρυθρη) ακτινοβολία που δέχεται και παράλληλα εκπέμπει η ίδια υπέρυθρη ακτινοβολία (γήινη ακτινοβολία) (Εικόνα 1.11). Οι αισθητήρες των δορυφόρων καταγράφουν την ακτινοβολία που προέρχεται από την υπό διερεύνηση επιφάνεια και αποτελεί το αποτέλεσμα όλων των προηγούμενων διεργασιών. Το ποσοστό της καταγραφόμενης ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε κάθε μια από τις παραπάνω διεργασίες εξαρτάται από τη φύση της προσπίπτουσας επιφάνειας, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τη γωνία πρόσπτωσης.



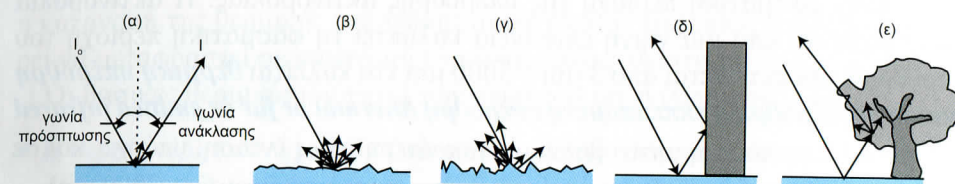
**Εικόνα 1.11.** Οι πιο σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ακτινοβολίας α) στο ορατό φάσμα β) στο υπέρυθρο φάσμα και (γ) στην περιοχή των μικροκυμάτων και της επιφάνειας της γης, της ατμόσφαιρας και των νεφών (τροποποιημένο σχήμα από Rao et al., 1990).

**1. Ανάκλαση**

Η **ανάκλαση (reflection)** αξιοποιείται από τη δορυφορική τηλεπισκόπηση κυρίως για την καταγραφή του ορατού ή υπέρυθρου φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ανάκλαση χρησιμοποιείται επίσης και για την καταγραφή της μικροκυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται προς την επιφάνεια της γης από δορυφορικές συσκευές τύπου ραντάρ.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διεργασία της ανάκλασης σε μια γήινη επιφάνεια εξαρτάται από την **τραχύτητα** της επιφάνειας σε σχέση με το **μήκος κύματος** της ακτινοβολίας.

Εάν η επιφάνεια είναι ομαλή και λεία σε σχέση με το μήκος κύματος, τότε η ανάκλαση είναι **κατοπτρική (specular)**. Στην περίπτωση αυτή όλη ή μέρος της ακτινοβολίας επιστρέφει σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση με τη γωνία ανάκλασης να είναι ίση με την γωνία πρόσπτωσης (Εικόνα 1.12α). Στην **κατοπτρική ανάκλαση** η ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στον παρατηρητή δηλ. στο δορυφόρο εξαρτάται μόνο από τη **γωνία πρόσπτωσης**, τη **γωνία παρατήρησης**, και την **απόσταση του παρατηρητή** από την επιφάνεια. Στο ορατό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας η κατοπτρική ανάκλαση εμφανίζεται σε λείες επιφάνειες όπως π.χ. σε ήρεμες υδάτινες επιφάνειες. Ανάκλαση μπορεί να λάβει χώρα και μεταξύ επιφανειών που βρίσκονται υπό γωνία και τότε καλείται **διπλής αναπήδησης ανά-**



**Εικόνα 1.12.** Ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες (α) κατοπτρική ανάκλαση, (β) διάχυση σε επιφάνεια μικρής τραχύτητας, (γ) διάχυση σε επιφάνεια μεγάλης τραχύτητας, (δ) και (ε) γωνιακή ανάκλαση.

**κλαση ή γωνιακή ανάκλαση (double-bounce reflection or corner reflection)** (Εικόνα 1.12δ,ε).

Εάν η επιφάνεια είναι ανώμαλη σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας τότε έχουμε **διάχυση (diffusion)** με την ακτινοβολία να διασκορπίζεται προς όλες τις διευθύνσεις (Εικόνα 1.12β,γ). Υπάρχουν πολλές επιφάνειες που προκαλούν διάχυση της ορατής ακτινοβολίας όπως π.χ. επιφάνειες καλυμμένες με γρασίδι και τα νέφη.

Μια επιφάνεια η οποία διαχέει την ακτινοβολία ισόποσα προς όλες τις κατευθύνσεις ονομάζεται **ισότροπη ή Λαμπερτιανή επιφάνεια**. Μια τέτοια επιφάνεια έχει την ίδια λαμπρότητα με οποιαδήποτε γωνία παρατήρησης. Στην περίπτωση αυτή η ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στον παρατηρητή δηλ. στο δορυφόρο εξαρτάται μόνο από τη **γωνία πρόσπτωσης** και την **απόσταση του παρατηρητή** από την επιφάνεια.

Λόγω της απλότητας του μοντέλου αυτού, η έννοια της ισότροπης επιφάνειας χρησιμοποιείται συχνά ως μια προσέγγιση της οπτικής συμπεριφοράς των αντικειμένων που παρατηρούνται με τη βοήθεια της τηλεπισκόπησης. Το Λαμπερτιανό όμως μοντέλο σε πολλές περιπτώσεις απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα. Οι πραγματικές επιφάνειες ανακλούν με σύνθετο τρόπο την ακτινοβολία ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας π.χ. σχήμα, μέγεθος και

προσανατολισμός της επιφάνειας (Campbell, 2002). Μερικές επιφάνειες συμπεριφέρονται ως ισότροποι ανακλαστήρες σε συγκεκριμένες γωνίες πρόσπτωσης αλλά παρουσιάζουν ιδιότητες μη ισότροπης επιφάνειας σε άλλες γωνίες. Υπάρχει μια συνάρτηση για κάθε επιφάνεια η οποία περιγράφει τις οπτικές της ιδιότητες σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και τη γωνία παρατήρησης και για αυτό το λόγο λέγονται *διευθυνσιακές συναρτήσεις κατανομής της ανάκλασης (bidirectional reflectance distribution function, BRDF)*.

### β. Εκπομπή

Η επιφάνεια της γης απορροφά τη μικρού μήκους ηλιακή ακτινοβολία (ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο) και την επανεκπέμπει σε μεγαλύτερο όμως μήκος κύματος, στην φασματική περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια γήινη επιφάνεια καλύπτει τη φασματική περιοχή του υπέρυθρου που εκτείνεται από 3  $\mu\text{m}$  – 3000  $\mu\text{m}$  και καλείται *θερμική υπέρυθρη ή μακρινή υπέρυθρη ή εκπεμπόμενη υπέρυθρη (thermal or far dr emitted infrared radiance)*. Εκπεμπόμενη ακτινοβολία, με μικρότερη όμως ένταση, υπάρχει και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος δηλ. στην περιοχή των μικροκυμάτων ( $\lambda > 3000 \mu\text{m}$ ).

Οι διαφορές στην εκπεμπόμενη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία των σωμάτων εκφράζουν τις αντίστοιχες διαφορές στην ικανότητα των σωμάτων και των επιφανειών να απορροφούν μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία (0.3 – 3  $\mu\text{m}$ ) και ακολούθως να την επανεκπέμπουν με τη μορφή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου. Έτσι, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, πυρκαγιές και ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας (π.χ. εργοστάσια), η κύρια πηγή της εκπεμπόμενης θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία.

Η ένταση της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας εξαρτάται άμεσα από τη *θερμοκρασία* και το *συντελεστή εκπομπής* του σώματος. Καταγράφοντας την εκπεμπόμενη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία είναι δυνατόν να υπολογιστεί η θερμοκρασία λαμπρότητας του σώματος σύμφωνα με τον νόμο των Stefan – Boltzmann (Σχέση 1.28), με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η ικανότητα εκπομπής του υλικού.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της μέσα από την ατμόσφαιρα θα υποστεί σημαντική απορρόφηση από αέριες χημικές ενώσεις. Η απορρόφηση περιορίζεται στις περιοχές του θερμικού υπέρυθρου που καλούνται ατμοσφαιρικά παράθυρα (βλ. παρακάτω) όπως αυτές που εκτείνονται από 3 έως 5  $\mu\text{m}$  και από 10 έως 12  $\mu\text{m}$ . Η περιοχή αυτή χρησιμοποιείται ιδιαίτερα από τους δορυφορικούς αισθητήρες και για ένα άλλο λόγο. Το έδαφος της γης και η θάλασσα γενικά δεν εκπέμπουν ως μέλανα σώματα. Ειδικότερα όμως στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου που εκτείνεται από 10 έως 12  $\mu\text{m}$ , η επιφάνεια της γης, εκτός των αστικών πλεγμάτων, καθώς και τα πυκνά νέφη, έχουν ικανότητα εκπομπής που προσεγγίζει την τιμή της μονάδας, με αποτέλεσμα, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής για ακρίβεια, να θεωρούνται μέλανα σώματα.

Η θερμοκρασία των σωμάτων στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από:

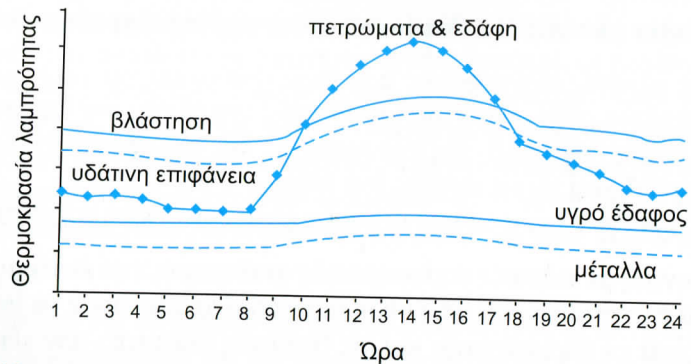
- το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμο για τη θέρμανση του σώματος το οποίο είναι συνάρτηση του ύψους του ήλιου, των ατμοσφαιρικών συνθηκών (νέφη, υγρασία), της τοπογραφίας και του προσανατολισμού της επιφάνειας σε σχέση με τις ακτίνες του ήλιου.
- τις θερμικές ιδιότητες του σώματος οι οποίες είναι συνάρτηση της σύστασής του.

Καταγράφοντας με ειδικούς δορυφορικούς αισθητήρες την εκπεμπόμενη από την επιφάνεια της γης θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για τη θερμοκρασία και τις θερμικές ιδιότητες των εδαφών, των πετρωμάτων, της βλάστησης και των ανθρωπογενών κατασκευών. Στη συνέχεια η κατανομή της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας της επιφάνειας της γης μπορεί να μεταφραστεί σε κατανομή υγρασίας, είδος βλάστησης, είδος υλικών κ.α. Οι βασικές θερμικές ιδιότητες των σωμάτων είναι (Campbell, 2002):

- **Η θερμοχωρητικότητα (c) (Thermal capacity)**. Εκφράζει τον αριθμό των θερμίδων που απαιτούνται για να αυξηθεί η θερμοκρασία σώματος 1 gr κατά 1 °C και μετριέται σε cal/gr °C. Ουσιαστικά είναι η ικανότητα του σώματος να αποθηκεύει θερμότητα. Το νερό έχει πολύ μεγάλη θερμοχωρητικότητα σε σχέση με τα περισσότερα υλικά (Πίνακας 1.3).
- **Η θερμική αγωγιμότητα (K) (Thermal conductivity)**. Αποτελεί ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο ένα υλικό μεταφέρει θερμότητα. Εκφράζεται σε cal ανά cm, ανά sec και ανά °C ( $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ) δηλ. μετράει τις θερμίδες που απαιτούνται για να μεταφερθεί μια μεταβολή στη θερμοκρασία σε συγκεκριμένο διάστημα και χρόνο.
- **Η θερμική αδράνεια (P) (Thermal inertia)**. Μετράει την τάση ενός υλικού να ανθίσταται σε αλλαγές της θερμοκρασίας του και εκφράζεται σε cal ανά  $\text{cm}^2$  ανά  $\text{sec}^{1/2}$  και ανά °C. Η θερμική αδράνεια σχετίζεται με τις προηγούμενες θερμικές παραμέτρους με τη σχέση:

$$P=(K c \rho)^{1/2} \quad (1.36)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού. Από τις τρεις αυτές παραμέτρους  $K$ ,  $c$  και  $\rho$  η σημαντικότερη είναι η πυκνότητα του  $\rho$  υλικού. Ξηρά και πορώδη υλικά, όπως πετρώματα και εδάφη, έχουν μικρή πυκνότητα και θερμοχωρητικότητα και συνεπώς παρουσιάζουν μικρή θερμική αδράνεια (Πίνακας 1.3). Τα υλικά αυτά εμφανίζουν τη μέγιστη θερμοκρασία τις πρώτες μεταμεσημβρινές ώρες και την ελάχιστη τη νύχτα, λίγο πριν την ανατολή του ήλιου και χαρακτηρίζονται από μεγάλο ημερήσιο θερμομετρικό εύρος (HΘΕ) (Εικόνα 1.13). Αντίθετα, υλικά με υψηλή θερμική αδράνεια, όπως υγρό έδαφος και μεταλλικές επιφάνειες, παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στις μεταβολές της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα οι διαφορές μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας κατά το μεσημέρι και της ελάχιστης αργά τη



**Εικόνα 1.13.** Καμπύλες της ενδοημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας λαμπρότητας για διάφορες επιφάνειες (τροποποιημένο σχήμα από Sabins, 1996).

**Πίνακας 1.3.** Τιμές των θερμικών ιδιοτήτων μερικών υλικών της γήινης επιφάνειας

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα (K) (cal cm <sup>-1</sup> sec <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	Πυκνότητα (ρ) (gr cm <sup>-3</sup> )	Θερμοχωρητικότητα (c) (Cal gr <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	Θερμική διαχυτικότητα (κ) (cm <sup>2</sup> sec <sup>-1</sup> )	Θερμική αδράνεια (P) (cal cm <sup>-2</sup> sec <sup>-1/2</sup> °C <sup>-1</sup> )
Βασάλτης	0.0050	2.8	0.20	0.008	0.053
Ασβεστόλιθος	0.0048	2.5	0.17	0.011	0.045
Γρανίτης	0.0065	2.6	0.16	0.018	0.052
Σχιστόλιθος	0.0042	2.3	0.17	0.011	0.040
Αμμώδες έδαφος	0.0014	1.8	0.24	0.003	0.024
Αργιλικό έδαφος	0.0030	1.7	0.35	0.005	0.042
Νερό	0.0013	1.0	1.01	0.001	0.036
Χαλκός	0.941	8.93	0.09	1.149	0.879
Σίδηρος	0.18	7.86	0.11	1.17	0.389
Γυαλί	0.002	2.4	0.12	0.007	0.024
Ξύλο	0.0005	0.82	0.33	0.018	0.012

νύχτα να είναι μικρές δηλ. να εμφανίζουν μικρό ΗΘΕ. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν, επίσης, περισσότερο ομοιόμορφη επιφανειακή θερμοκρασία και συνεπώς ομοιόμορφη λαμπρότητα στην εικόνα σε σχέση με τα αντικείμενα με χαμηλή αδράνεια.

• **Θερμική διαχυτικότητα κ (Thermal diffusivity).** Η παράμετρος αυτή εκφράζει την ικανότητα των υλικών να μεταφέρουν θερμότητα από την επιφάνεια του εδάφους στο υπέδαφος κατά τη διάρκεια μιας θερμής ημέρας και από το υπέδαφος στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια της νύχτας. Δίνεται από τη σχέση:

$$\kappa = K/(c \rho) \quad (1.37)$$

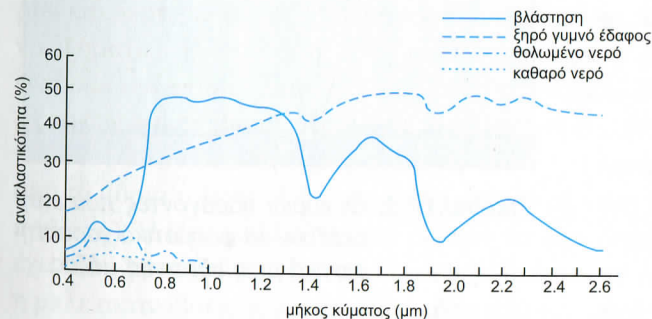
και εκφράζεται σε cm<sup>2</sup>/sec.

Για παράδειγμα ο γρανίτης έχει μεγαλύτερη θερμική διαχυτικότητα (0.018) από τα αργιλικά εδάφη (0.005) και έτσι μεταφέρει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους κατά τη διάρκεια της ημέρας (Πίνακας 1.3).

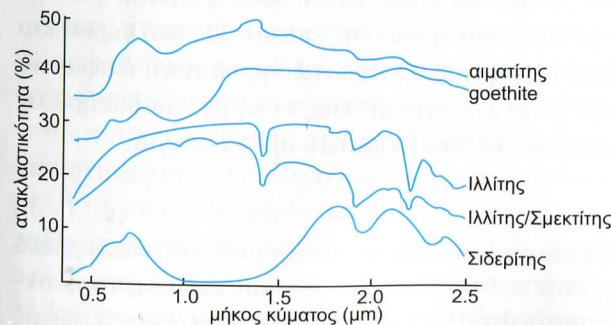
**γ. Φασματικές ιδιότητες των επιφανειών**

Με τη βοήθεια της δορυφορικής τηλεπισκόπησης μπορούμε να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των διαφόρων επιφανειών εξετάζοντας την ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από αυτές. Το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται στα διάφορα μήκη κύματος επηρεάζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τη σύσταση κάθε αντικειμένου, με το δικό του χαρακτηριστικό τρόπο. Με τη χρήση ειδικών αισθητήρων, κυρίως φασματόμετρων, μπορούμε να μελετήσουμε τη φασματική απόκριση των επιφανειών στα διάφορα μήκη κύματος. Με τον όρο *φασματική απόκριση* εννοούμε την κατανομή της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από μια επιφάνεια σε σχέση με το μήκος κύματος λ.

Κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική φασματική απόκριση, η μελέτη της οποίας μας επιτρέπει τη διάκριση μιας επιφάνειας από κάποια άλλη και την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με το σχήμα, το μέγεθος, τις φυσικές ακόμη και χημικές ιδιότητες της. Η μορφή της καμπύλης της φασματικής απόκρισης μιας επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος λ καλείται *φασματική υπογραφή (spectral signature)* της επιφάνειας και είναι μοναδική για κάθε επιφάνεια. Η φασματική υπογραφή της κάθε επιφάνειας αποτελεί τη βάση για την αναγνώριση και τον μεταξύ τους διαχωρισμό. Για παράδειγμα στην Εικόνα 1.14 είναι χαρακτηριστική η φασματική υπογραφή της υδάτινης επιφάνειας η οποία ανακλά ελάχιστα και μόνο στο ορατό φάσμα (0.4 – 0.7 μm) με μέγιστο στο πράσινο. Παρατηρείστε επίσης τη διαφορά στην ανακλαστικότητα του εδάφους με τη βλάστηση στο κόκ-



**Εικόνα 1.14.** Φασματικές υπογραφές τριών βασικών επιφανειών (έδαφος, βλάστηση, υδάτινη επιφάνεια).



**Εικόνα 1.15.** Φασματικές υπογραφές πέντε μεταλλευμάτων (Πηγή: Spectral International Inc.).

κινο (0.61 – 0.69 μm) και το εγγύς υπέρυθρο (0.76 – 0.90 μm). Συγκεκριμένα η βλάστηση παρουσιάζει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο από ότι το έδαφος. Το αντίθετο παρατηρείται στο κόκκινο. Διαφοροποιήσεις όμως στη φασματική υπογραφή παρουσιάζουν και τα διάφορα είδη πετρωμάτων (Εικόνα 1.15).

### 1.5.2 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με υδάτινες επιφάνειες

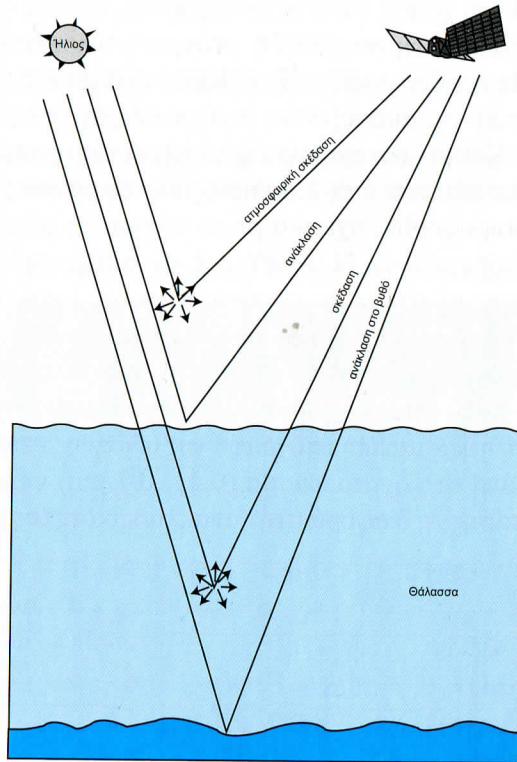
Και οι υδάτινες επιφάνειες ανακλούν και απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται και εκπέμπουν θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία, αλλά με διαφορετικό τρόπο από τις γήινες επιφάνειες. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος που φτάνει στον δορυφορικό αισθητήρα είναι η *ανάκλαση από την υδάτινη επιφάνεια*, η *απορρόφηση* από τα μόρια του νερού και το φυτοπλαγκτόν, η *σκέδαση* από τα μόρια του νερού και τα αιωρούμενα σωματίδια, η *ατμοσφαιρική σκέδαση* και σε ορισμένες περιπτώσεις η *σκέδαση από το βυθό* (Εικόνα 1.16).

#### α. Ανάκλαση

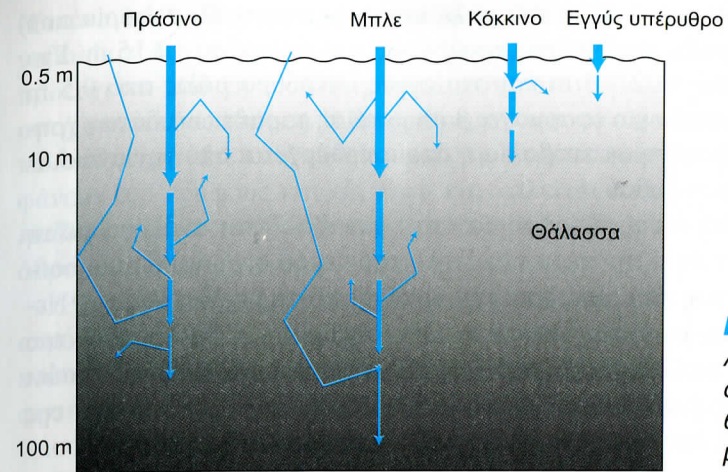
Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια του νερού είναι μικρό (< 9%) και εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης, μεταφέρει δε μικρό ποσό πληροφορίας για το ίδιο το νερό. Είναι όμως χρήσιμο για την άντληση πληροφορίας σχετικά με την κατάσταση της επιφάνειας του νερού και κατ' επέκταση για τον άνεμο και τα κύματα. Η κυματώδης υδάτινη επιφάνεια ανακλά μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας προς τον αισθητήρα σε σχέση με την ήρεμη και ομαλή επιφάνεια, ιδιαίτερα στο ορατό φάσμα.

#### β. Απορρόφηση

Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την υδάτινη μάζα με δυο τρόπους: από τα μόρια του νερού, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του, και από το φυτοπλαγκτόν κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Η απορρόφηση του ορατού φωτός



**Εικόνα 1.16.** Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά μιας υδάτινης μάζας.



**Εικόνα 1.17.**

Απορρόφηση και σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορα βάθη μέσα στη θάλασσα.

εξαρτάται από το μήκος κύματος. Συγκεκριμένα, το μπλε και το πράσινο απορροφούνται ελάχιστα στα καθαρά νερά ενώ από το πορτοκαλί προς το κόκκινο και το υπέρυθρο η απορρόφηση είναι σημαντική. Αυτό σημαίνει ότι το μπλε έχει τη μεγαλύτερη διεισδυτικότητα ενώ το κόκκινο και περισσότερο το υπέρυθρο απορροφώνται στα πρώτα μέτρα διάδοσής τους μέσα στο νερό (Εικόνα 1.17).

#### γ. Σκέδαση

Παράλληλα, η ηλιακή ακτινοβολία σκεδάζεται πρωτίστως από τα μόρια του νερού και δευτερευόντως από διάφορα αιωρούμενα σωματίδια (κυρίως αιωρούμενα ιζήματα). Η σκέδαση αυτή καλείται και ως *ανάκλαση της υδάτινης μάζας (volume reflection)*. Στην περίπτωση αυτή το μπλε σκεδάζεται έντονα σύμφωνα με τη θεωρία σκέδασης Rayleigh. Η εξάρτηση της σκέδασης αυτής από το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του  $\lambda^4$ , δηλαδή τη μεγαλύτερη σκέδαση από τα μόρια του νερού θα υποστεί η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (μπλε-πράσινο). Η ίδια αιτία κάνει τον ουρανό να φαίνεται γαλάζιος. Η θάλασσα όμως έχει πιο έντονο μπλε χρώμα από τον ουρανό, όχι μόνο γιατί σκεδάζεται περισσότερο η μπλε ακτινοβολία αλλά και γιατί κάτω από μερικά μέτρα βάθος δεν υπάρχει άλλη διαθέσιμη ακτινοβολία να σκεδαστεί εκτός από τη μπλε (βλ. Εικόνα 1.17).

Όπως αναφέρθηκε, η ανάκλαση του ηλιακού φωτός από μια υδάτινη επιφάνεια είναι πολύ μικρή και εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης. Έτσι σε μια δορυφορική εικόνα που καταγράφει την ορατή ακτινοβολία, η θάλασσα διακρίνεται πιο σκοτεινή από τη ξηρά. Ουσιαστικά η ακτινοβολία που καταγράφει ο αισθητήρας είναι κυρίως η σκεδαζόμενη από την υδάτινη επιφάνεια στα διάφορα μήκη κύματος. Η ακτινοβολία αυτή μεταφέρει πληροφορία για τα φασματικά χαρακτηριστικά του νερού (π.χ. χρώμα). Κάθε μήκος κύματος όμως προέρχεται από διαφορετικό στρώμα της θάλασσας καθώς, όπως είδαμε προηγουμένως, η διείσδυση του φωτός μέσα στο νερό εξαρτάται από το μήκος κύματος. Έτσι, σε

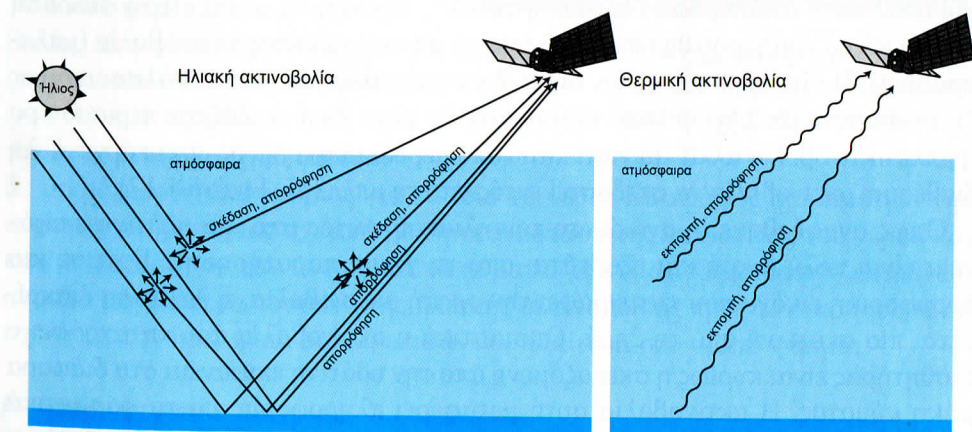
καθαρά νερά, στη φασματική ζώνη του μπλε και πράσινου η πληροφορία που καταγράφει ο δορυφορικός αισθητήρας προέρχεται από τα πρώτα 10-15 m. Στο κόκκινο προέρχεται από τα 2 - 5 m και στο εγγύς υπέρυθρο μόλις από 0.5 m (Εικόνα 1.17). Συχνά λοιπόν για εφαρμογές βαθυμετρίας παράκτιων υδάτων χρησιμοποιείται η μπλε-πράσινη ακτινοβολία η οποία προέρχεται από την ανάκλαση της στον πυθμένα του βυθού.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πληροφορία αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με τη θολερότητα των νερών δηλ. την περιεκτικότητα του νερού σε διάφορα αιωρούμενα σωματίδια, γεγονός που επιτρέπει την καταγραφή της ποιότητας των νερών, την κατανομή του φυτοπλαγκτόν κ.α. Όσο αυξάνεται η θολερότητα του νερού αυξάνεται και η σκέδαση του ορατού φωτός και έτσι η υδάτινη μάζα παύει να συμπεριφέρεται ως ένα “μαύρο” αντικείμενο. Παράλληλα, το μέγιστο της σκέδασης μετακινείται από την περιοχή του μπλε στην περιοχή του πράσινου.

### 1.5.3 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από μια επιφάνεια στη γη, για να καταγραφεί από το δορυφορικό αισθητήρα θα πρέπει πρώτα να διαπεράσει την ατμόσφαιρα της γης, η οποία επιδρά με διάφορους τρόπους σε αυτή. Τα σώματα που βρίσκονται σε υγρή ή στερεά κατάσταση στην ατμόσφαιρα (υδροσταγόνες και παγοκρύσταλλοι) σκεδάζουν, απορροφούν και εκπέμπουν σε μία ευρεία περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Εικόνα 1.11). Οι αισθητήρες των δορυφόρων καταγράφουν την ακτινοβολία που αποτελεί το αποτέλεσμα όλων των επιδράσεων της ύλης από την οποία αποτελούνται τα προς διερεύνηση σώματα.

Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται σε μια επιφάνεια της γης έχει ως αποτέλεσμα μέρος της ακτινοβολίας να σκεδαστεί, να απορροφηθεί ένα άλλο και το υπόλοιπο να φτάσει στο δορυφορικό αισθητήρα



**Εικόνα 1.18.** Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία που φτάνει στον δορυφορικό αισθητήρα.

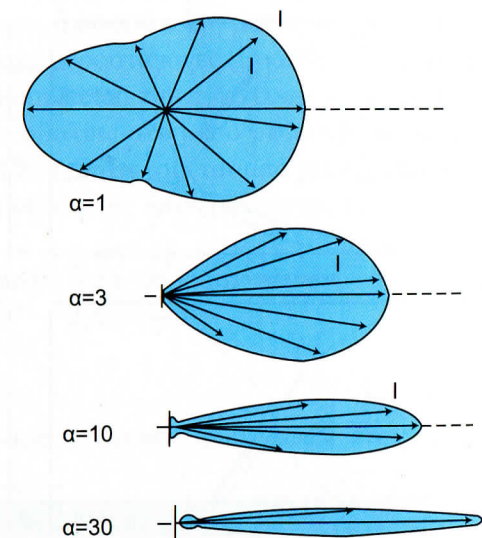
(Εικόνα 1.18). Η επιφάνεια του εδάφους δεν δέχεται όμως μόνο την άμεση ακτινοβολία του ήλιου αλλά και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (*sky light*) η οποία προέρχεται από τη σκέδαση της άμεσης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα πριν αυτή φτάσει στο έδαφος. Η διάχυτη αυτή ακτινοβολία θα φτάσει στον δορυφορικό αισθητήρα είτε κατ' ευθείαν από την ατμόσφαιρα είτε ανακλώμενη στην επιφάνεια του εδάφους και σε νέφη και καλείται **ακτινοβολία διαδρομής (path radiance)**. Η ακτινοβολία που φτάνει στο δορυφορικό αισθητήρα, αποτελεί το άθροισμα όλων αυτών των ακτινοβολιών.

Η θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο από την ατμόσφαιρα καθώς η σκέδαση από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είναι μικρή ενώ αντίθετα η απορρόφηση από αυτά είναι σημαντική σε σχέση με την απορρόφηση της μικρού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 1.18).

#### α. Επίδραση των νεφών

Τα νέφη στην ατμόσφαιρα επηρεάζουν ισχυρά την ακτινοβολία που διαδίδεται στην ατμόσφαιρα ή εκπέμπεται από τα ίδια τα νέφη. Η επίδραση των νεφών, στην ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία, εξαρτάται άμεσα από το πάχος τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για την πλήρη περιγραφή της επίδρασης ενός νεφικού στρώματος στην διερχόμενη ακτινοβολία, πρέπει να ληφθεί υπόψη πέραν του μεγέθους των υδροσταγόνων και το οπτικό πάχος του νέφους. Η έννοια του οπτικού πάχους συνδυάζει το γεωμετρικό πάχος με το περιεχόμενο σε νερό του νέφους.

Στην περιοχή του ορατού φάσματος, η ακτινοβολία η οποία διαδίδεται μέσα από τα νέφη και ανακλάται από αυτά, προέρχεται κυρίως από την πολλαπλή σκέδαση της ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της μέσα από το νέφος η οποία εξαρτάται από το μέγεθος  $R$  των υδροσταγόνων και το οπτικό πάχος  $\tau$  του νέφους. Για μία σφαιρική υδροσταγόνα, η κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας υπολογίζεται με την θεωρία του Mie. Στην Εικόνα 1.19 δίνεται η κατανομή στον χώρο της σχετικής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, με βάση το σχετικό μέγεθος των υδροσταγόνων  $R$  ως προς το μήκος κύματος  $\lambda$  ( $a = 2\pi R/\lambda$ ).



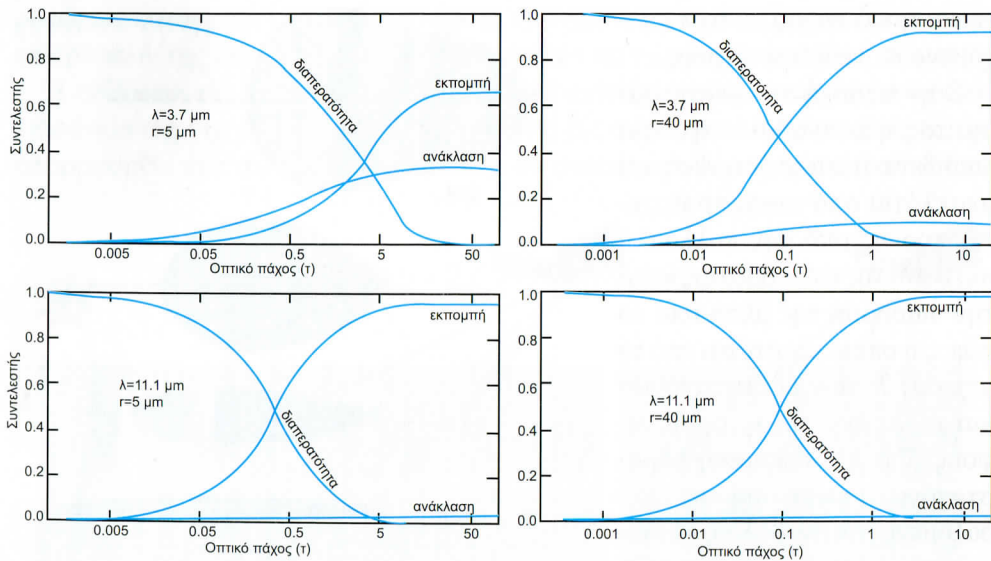
**Εικόνα 1.19.**

Κατανομή στον χώρο της σχετικής έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, με βάση το σχετικό μέγεθος των υδροσταγόνων  $R$  ως προς το μήκος κύματος  $\lambda$  ( $a = 2\pi R/\lambda$ ).

τικό μέγεθος των υδροσταγόνων  $R$  ως προς το μήκος κύματος  $\lambda$ , για  $0.1 < 2\pi R/\lambda < 50$ . Παρατηρείται ότι η ακτινοβολία σκεδάζεται κυρίως προς την κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας όσο αυξάνει το μέγεθος της υδροσταγόνας ή μικραίνει το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση των υδροσταγόνων, η εξάρτηση της σκεδαζόμενης και απορροφούμενης ορατής ακτινοβολίας από το μήκος κύματος είναι πολύ μικρή. Για παράδειγμα, ο συντελεστής σκέδασης για την σκέδαση Mie δίνεται από την σχέση  $S_{(2)} = \beta \lambda^{-\gamma}$ , όπου  $\beta$  συντελεστής που εξαρτάται από την πυκνότητα των σωματιδίων και  $\gamma$  παράμετρος που ελαττώνεται όταν αυξάνεται το μέγεθος των σωματιδίων (για κανονικές συνθήκες  $\gamma = 1.3$ ). Σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση, η σκέδαση της ορατής ακτινοβολίας στα νέφη δεν εξαρτάται ισχυρά από το μήκος κύματος  $\lambda$  και κατά συνέπεια τα νέφη συνήθως εμφανίζονται λευκά ή γκριζα.

Στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου η μέγιστη ικανότητα εκπομπής εξαρτάται αποκλειστικά από το οπτικό πάχος του νέφους καθώς το μέγεθος των υδροσταγόνων δεν επηρεάζει σημαντικά την εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία (Εικόνα 1.20). Συγκεκριμένα, η ικανότητα εκπομπής του νέφους αυξάνεται με την αύξηση του οπτικού πάχους και τείνει προς την μονάδα για τα πολύ πυκνά νέφη (Rao et al., 1990). Κατά συνέπεια τα πυκνά νέφη εκπέμπουν στο θερμικό υπέρυ-



**Εικόνα 1.20.** Συντελεστής διαπερατότητας, ανακλαστικότητα και ικανότητα εκπομπής σε σχέση με το οπτικό πάχος ( $\tau$ ) για δυο διαφορετικά μεγέθη σφαιρικών υδροσταγόνων ( $r$ ) και μήκη κύματος  $\lambda = 3.75 \mu\text{m}$  (επάνω) και  $\lambda = 11.14 \mu\text{m}$  (κάτω) (τροποποιημένο σχήμα από Rao et al., 1990).

θρο ως μέλανα σώματα στην θερμοκρασία των υδροσταγόνων ή των παγοκρυστάλλων που βρίσκονται στις κορυφές τους. Το μεγάλο εύρος των θερμοκρασιών, που παρουσιάζουν οι κορυφές των νεφών, έχει ως αποτέλεσμα η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στο ατμοσφαιρικό παράθυρο (10.5 - 12 $\mu\text{m}$ ) να εξαρτάται άμεσα από το ύψος της κορυφής τους. Λεπτομερέστερη περιγραφή για την εξάρτηση αυτή δίδεται στο Κεφάλαιο 8. Όσον αφορά την ανακλαστικότητα της θερμικής ακτινοβολίας αυτή είναι ασήμαντη (Εικόνα 1.20α). Παρατηρείται, τέλος, μείωση της διαπερατότητας με την αύξηση του οπτικού πάχους.

Στην περιοχή του μέσου υπέρυθρου τα νέφη, ακόμη και τα πυκνά, δεν εκπέμπουν ως μέλανα σώματα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.20 η μέγιστη ικανότητα εκπομπής αυξάνεται με την αύξηση του οπτικού πάχους, αλλά πάντοτε είναι μικρότερη της μονάδας ακόμη και για τα πιο πυκνά νέφη, ενώ αυξάνεται επίσης με το μέγεθος των υδροσταγόνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία λαμπρότητας του μέλανος σώματος που υπολογίζεται εφαρμόζοντας το νόμο του Stefan-Boltzmann στην ακτινοβολία ενός νέφους που καταγράφει ο δορυφορικός αισθητήρας χρησιμοποιώντας συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  ίσο με τη μονάδα, να μην είναι η ίδια για την περιοχή του μέσου και του θερμικού υπέρυθρου.

Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία λαμπρότητας για την περιοχή του μέσου υπέρυθρου θα είναι μικρότερη αυτής που υπολογίζεται στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου. Η διαφορά αυτή γίνεται μικρότερη όσο πιο πυκνό είναι το νέφος και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των υψηλών λεπτών νεφών κύριος από τα υπόλοιπα νέφη. Επίσης, η διαφορά αυτή μεγιστοποιείται σε νέφη που αποτελούνται από μικρού μεγέθους υδροσταγόνες (Εικόνα 1.20, αριστερά), ιδιότητα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση νεφών αυτού του είδους. Η ανακλαστικότητα της ακτινοβολίας στο μέσο υπέρυθρο παρουσιάζει σημαντικές τιμές, ιδιαίτερα για νέφη που αποτελούνται από μικρές υδροσταγόνες. Παρατηρείται, τέλος, και εδώ, μείωση της διαπερατότητας με την αύξηση του οπτικού πάχους.

Στον Πίνακα 1.4 παρουσιάζεται συνοπτικά η επίδραση των νεφών στην ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία.

**Πίνακας 1.4.** Συνοπτική περιγραφή της επίδρασης των νεφών στην ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία.

Ορατό	Υπέρυθρο
Ανακλάται και διαδίδεται μέσα από το νέφος μέσω πολλαπλών σκεδάσεων οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος των υδροσταγόνων και το οπτικό πάχος $\tau$ του νέφους. Η σκέδαση και η απορρόφηση της ορατής ακτινοβολίας εξαρτώνται ελάχιστα από το μήκος κύματος.	Τα πυκνά νέφη εκπέμπουν ως μέλανα σώματα στην θερμοκρασία των κορυφών τους. Η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στο ατμοσφαιρικό παράθυρο (10.5 - 12 $\mu\text{m}$ ) εξαρτάται άμεσα από το ύψος των κορυφών τους. Η ανακλαστικότητα της θερμικής ακτινοβολίας είναι ασήμαντη.

### β. Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τις αέριες χημικές ενώσεις της ατμόσφαιρας

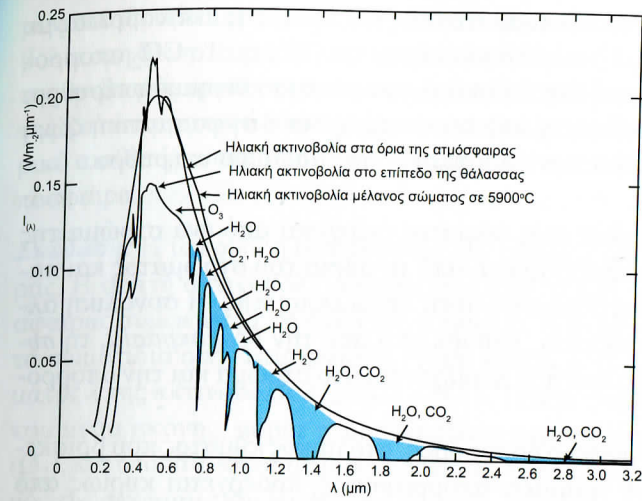
Η ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από μια επιφάνεια της γης διέρχεται από την ατμόσφαιρα πριν φτάσει στο δορυφορικό αισθητήρα. Αν η ακτινοβολία είναι στο ορατό φάσμα, τότε ένα ποσό αυτής απορροφάται και ένα άλλο σκεδάζεται από άτομα, μόρια, ιόντα της ατμόσφαιρας (Εικόνα 1.18). Αν είναι υπέρυθρη ακτινοβολία τότε ένα ποσό αυτής απορροφάται από τα μόρια της ατμόσφαιρας και ένα άλλο ποσό προστίθεται σε αυτή λόγω εκπομπής (Εικόνα 1.18).

**Απορρόφηση.** Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία απορροφάται κυρίως από το  $\text{CO}_2$ , το  $\text{H}_2\text{O}$  και το  $\text{O}_3$ , ανάλογα με το μήκος κύματος  $\lambda$ . Τα μόρια των αέριων χημικών ενώσεων αλληλεπιδρούν με την ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος ή περιοχές του φάσματος, σε αντίθεση με τα μόρια των στερεών και των υγρών που αλληλεπιδρούν με το σύνολο σχεδόν του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

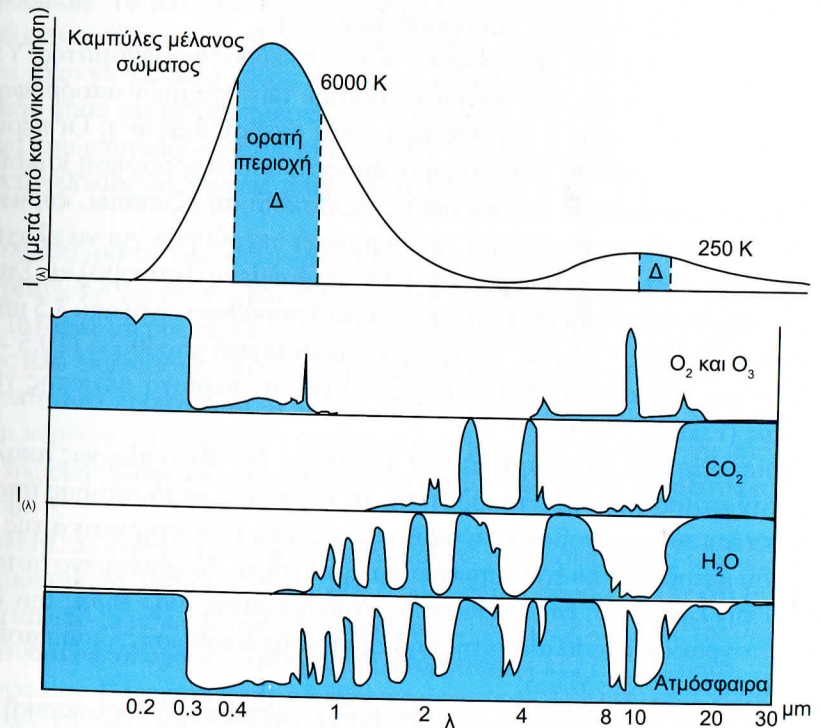
Λόγω της απορροφούμενης ή εκπεμπόμενης ενέργειας, τα μόρια των αέριων χημικών ενώσεων μεταπίπτουν σε διακριτές επιτρεπόμενες ενεργειακές καταστάσεις, οι οποίες καθορίζονται από την δομή του μορίου. Η θερμοκρασία ενός αερίου καθορίζεται από την μέση ταχύτητα των μορίων. Η αλληλεπίδραση των μορίων και της ακτινοβολίας έχει σαν αποτέλεσμα την μεταφορά ενέργειας από το πεδίο ακτινοβολίας στα μόρια, η οποία αλλάζει τόσο την ενεργειακή κατάσταση των μορίων όσο και την ίδια την ακτινοβολία. Όταν απορροφάται ακτινοβολία, τότε το άτομο διεγείρεται με την απορρόφηση ενός ή περισσότερων φωτονίων. Το μόριο τότε μετατρέπει την ενέργεια σε θερμότητα, η οποία μεταφέρεται μέσω των συγκρούσεων διαδοχικά στα υπόλοιπα μόρια. Ακολούθως, τα μόρια που θερμάνθηκαν απελευθερώνουν ενέργεια εκπέμποντας φωτόνια. Στην περίπτωση που απορροφάται ένα υψηλής ενέργειας φωτόνιο, τότε εκπέμπονται αρκετά φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Αντιθέτως, στη σκέδαση 'εκπέμπεται' ακτινοβολία στο ίδιο μήκος κύματος με αυτό της ακτινοβολίας την οποία δέχτηκε αρχικά το μόριο.

Τα μήκη κύματος, στα οποία συμβαίνει απορρόφηση ενέργειας, αντιστοιχούν σε **γραμμές απορρόφησης (absorption bands)**. Στην Εικόνα 1.21 δίνεται η φασματική κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας και στην επιφάνεια της γης. Στο ίδιο σχήμα δίνεται η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος για  $5900^\circ\text{C}$ , όπου διακρίνονται οι ζώνες απορρόφησης από το  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{CO}_2$ . Η απορρόφηση εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  (βλ. Εικόνα 1.22):

- Η ορατή ακτινοβολία ( $0.38 < \lambda < 0.72 \mu\text{m}$ ) απορροφάται ασθενώς κυρίως από το όζον ( $\text{O}_3$ ) και το οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ).
- Η υπέρυθρη ακτινοβολία ( $\lambda > 0.72$ ) απορροφάται κυρίως από τους υδρατμούς ( $\text{H}_2\text{O}$ ) και δευτερευόντως από το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) ενώ το όζον ( $\text{O}_3$ ) απορροφά ελάχιστη από αυτή (γύρω στα  $10 \mu\text{m}$ ). Η ατμοσφαιρική υγρα-



**Εικόνα 1.21.** Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, στην επιφάνεια της θάλασσας, καθώς και για μέλαν σώμα θερμοκρασίας  $5900^\circ\text{C}$ .



**Εικόνα 1.22.** Οι καμπύλες του Planck για τη γη και τον ήλιο σε σχέση με τα φάσματα απορρόφησης του  $\text{O}_3$ , του  $\text{CO}_2$ , του  $\text{H}_2\text{O}$  και συνολικά της ατμόσφαιρας. Η σκιασμένη φασματική περιοχή  $\Delta$  χρησιμοποιείται κυρίως από την δορυφορική τηλεπισκόπηση.



σία ( $H_2O$ ) συγκρατεί ένα μεγάλο ποσοστό (έως και 80%) της ακτινοβολίας με μήκη κύματος από 5.5 έως 7  $\mu m$  αλλά και πέραν των 13  $\mu m$ . Το  $CO_2$  απορροφά μήκη κύματος μεγαλύτερα των 2  $\mu m$  δηλ στο μέσο και θερμικό υπέρυθρο. Η μεγαλύτερη όμως απορρόφηση από αυτό επέρχεται στη φασματική ζώνη με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 15  $\mu m$ , δηλ. στο απώτερο υπέρυθρο.

Όταν η υπέρυθρη ακτινοβολία ενός σώματος διέρχεται από ένα στρώμα της ατμόσφαιρας, τότε ένα ποσό απορροφάται από τα μόρια του στρώματος και παράλληλα, ένα άλλο ποσό προστίθεται σε αυτή λόγω εκπομπής. Η συνολική αλλαγή, που θα υποστεί η ακτινοβολία, καθορίζεται από την *θερμοκρασία*, τη *συγκέντρωση* και το *είδος των αερίων* που περιέχονται στο στρώμα και την απορροφούν ή τη σκεδάζουν.

Η ακτινοβολία, που καταγράφει ο δορυφόρος, στο μήκος κύματος που βρίσκεται στο κέντρο των μεγάλων γραμμών απορρόφησης, προέρχεται κυρίως από την κορυφή της ατμόσφαιρας. Αντιθέτως, η αντίστοιχη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (κυρίως από τα νέφη) και την επιφάνεια της γης, συνήθως απορροφάται πλήρως.

Τα αέρια της ατμόσφαιρας απορροφούν σε όλο το εύρος του φάσματος. Υπάρχουν όμως μερικές περιοχές του φάσματος μεταξύ των γραμμών απορρόφησης, κυρίως στο υπέρυθρο, όπου η ατμόσφαιρα είναι σχεδόν διάφανη. Οι περιοχές του φάσματος που παρουσιάζουν μικρή ατμοσφαιρική απορρόφηση καλούνται *ατμοσφαιρικά παράθυρα*. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση αξιοποιεί, κυρίως, τα ατμοσφαιρικά παράθυρα στο φάσμα του θερμικού υπέρυθρου για να ελαχιστοποιήσει την επίδραση της ατμόσφαιρας στην μετρούμενη ακτινοβολία. Στο φάσμα του υπέρυθρου τα πιο σημαντικά ατμοσφαιρικά παράθυρα είναι από 3.5  $\mu m$  έως 4.1  $\mu m$  και από 10.5 έως 12.5  $\mu m$ . Το δεύτερο ατμοσφαιρικό παράθυρο (10.5 - 12.5  $\mu m$ ) είναι το πιο σημαντικό επειδή ταυτίζεται με την περιοχή μέγιστης γήινης ακτινοβολίας (Εικόνα 1.22).

Στην περίπτωση που τα ατμοσφαιρικά παράθυρα δεν είναι πλήρως απαλλαγμένα από την ατμοσφαιρική απορρόφηση, τα αέρια της ατμόσφαιρας απορροφούν και εκπέμπουν ακτινοβολία, η οποία αλλάζει τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας που μετράται από τον δορυφορικό αισθητήρα. Το φαινόμενο αυτό, συχνά απαιτεί την εφαρμογή της διαδικασίας *ατμοσφαιρικής διόρθωσης* των δορυφορικών καταγραφών στα πλαίσια της ραδιομετρικής διόρθωσης, διαδικασία που περιγράφεται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η δορυφορική τηλεπισκόπηση αξιοποιεί ειδικότερες περιοχές του φάσματος όπου η απορρόφηση από κάποιο αέριο είναι έντονη για να εκτιμήσει τη χωρική κατανομή του. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα στη ζώνη απορρόφησης των υδρατμών μεταξύ 5.3 και 7  $\mu m$  την οποία αξιοποιεί ο δορυφόρος Meteosat για να καταγράψει την κατανομή των υδρατμών στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα επειδή ένα αέριο *εκπέμπει*

μόνο σε μήκη κύματος που μπορεί να απορροφήσει, οι υδρατμοί εκπέμπουν ακτινοβολία στη ζώνη απορρόφησης των υδρατμών (5.3-7  $\mu m$ ). Βέβαια επειδή οι υδρατμοί της ανώτερης τροπόσφαιρας απορροφούν ισχυρά την ακτινοβολία των υδρατμών της κατώτερης τροπόσφαιρας η ακτινοβολία αυτή δεν φτάνει ποτέ στο δορυφορικό αισθητήρα παρά μόνο η ακτινοβολία που προέρχεται από την ανώτερη τροπόσφαιρα.

**Σκέδαση.** Η υπέρυθρη ακτινοβολία δεν σκεδάζεται από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Η ορατή ακτινοβολία σκεδάζεται από τα *άτομα*, *μόρια* και *ιόντα* της ατμόσφαιρας σύμφωνα με τη σκέδαση Rayleigh. Η σκέδαση Rayleigh απαντάται όταν τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα έχουν ακτίνα  $R$  πολύ μικρότερη του μήκους κύματος  $\lambda$  της ακτινοβολίας ( $2\pi R/\lambda < 0.1$ ). Τέτοια σωματίδια μπορεί να είναι μικρά κομμάτια σκόνης, μόρια ατμοσφαιρικών αερίων, όπως άζωτο ( $N_2$ ) και οξυγόνο ( $O_2$ ), και άτομα ή ιόντα ατμοσφαιρικών αερίων, όπως ατομικό οξυγόνο ( $O$ ). Ο βαθμός της σκέδασης Rayleigh μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του  $\lambda^4$ , δηλαδή τη μεγαλύτερη σκέδαση από την ατμόσφαιρα θα υποστεί η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία. Το μπλε είναι η μικρότερου μήκους ορατή ακτινοβολία, συνεπώς το μπλε σκεδάζεται έντονα στην ατμόσφαιρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ουρανός να αποκτά γαλάζιο χρώμα σε όποια κατεύθυνση και αν στραφούμε κατά τη διάρκεια μιας ανέφελης ημέρας. Το φαινόμενο αυτό επιδρά και τις δορυφορικές εικόνες που αποτυπώνουν την ακτινοβολία στην περιοχή της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας και κυρίως του μπλε (0.45 - 0.52  $\mu m$ ).

#### γ. Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα αερολύματα

Τα *αερολύματα* (*aerosols*) βρίσκονται στην ατμόσφαιρα σε τρεις κατηγορίες μεγέθους: (α) πολύ μικροί πυρήνες Aitken, μικρότεροι από 0.1  $\mu m$ , οι οποίοι προέρχονται κυρίως από διαδικασίες καύσης, (β) μικρά σωματίδια τα οποία προέρχονται από τη συνένωση των προηγούμενων ή από φωτοχημικές αντιδράσεις, με μεγέθη μεταξύ 0.1 και περίπου 3  $\mu m$  και, (γ) μεγάλα σωματίδια που προέρχονται από το έδαφος μέσω της διάβρωσης και μηχανικών διεργασιών με μεγέθη μεγαλύτερα των 4  $\mu m$ , περίπου.

Η αλληλεπίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας με τα σωματίδια των αερολυμάτων της ατμόσφαιρας καθορίζεται από τη σωματιδιακή απορρόφηση και σκέδαση και εξαρτάται από το μέγεθος των αερολυμάτων και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η παρουσία αερολυμάτων αυξάνει την απορρόφηση και την σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η σωματιδιακή σκέδαση περιγράφεται από τη θεωρία του Mie η οποία αν και γενικά αποτελεί μια επιλεκτική διεργασία (δηλ. εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας), συμπεριφέρεται όμως μη επιλεκτικά όταν προκαλείται από σωματίδια το μέγεθος των οποίων είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στις φασματικές περιοχές του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου, τα οπτικά ενεργά σωματίδια των αερολυμάτων που αλληλεπιδρούν έντονα με την ακτινοβολία είναι αυτά της δεύτερης κατηγορίας μεγέθους δηλ. αυτά

με μέγεθος μεταξύ 0.1 και 3  $\mu\text{m}$  περίπου. Η μέγιστη σκέδαση για τα σωματίδια αυτού του είδους συμβαίνει στη φασματική περιοχή του πράσινου (0.5 – 0.6  $\mu\text{m}$ ). Το τμήμα του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας από 0.3 έως 0.9  $\mu\text{m}$  απορροφάται ελάχιστα από την ατμόσφαιρα, όταν αυτή δεν περιέχει αερολύματα. Οι συντελεστές εξασθένησης λόγω σωματιδιακής απορρόφησης και σκέδασης,  $k_{\sigma}^{\text{απορ}}$  και  $k_{\sigma}^{\text{σκέδ}}$  αντίστοιχα, μπορούν να εκτιμηθούν με μεθόδους τηλεπισκόπησης και να χρησιμοποιηθούν ως εκτιμητές της ποσότητας των αερολυμάτων και συνεπώς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Έχει διαπιστωθεί ότι η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία σε κατακόρυφο άξονα πάνω από ωκεάνιες επιφάνειες αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του οπτικού πάχους των αερολυμάτων. Το μέγεθος της αύξησης εξαρτάται από το μήκος κύματος, το ύψος του ηλίου και το μέγεθος των σωματιδίων. Για μεγάλες ποσότητες αερολυμάτων, όπως για στρώμα ηφαιστειακής σκόνης, η καταγραφή των ιδιοτήτων της επιφάνειας της γης στο ορατό και υπέρυθρο φάσμα, όπως η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και το χρώμα των ωκεανών, χρειάζεται διόρθωση. Συγκεκριμένα, αερολύματα όπως η ξηρά αχλύς, καπνός και παρασυρόμενη σκόνη, αυξάνουν την ανάκλαση και την σκέδαση της ορατής ακτινοβολίας με χαμηλό ύψος ήλιου, ενώ σημαντική απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας της επιφάνειας της γης από τα αερολύματα συμβαίνει μόνο όταν η ποσότητα των αερολυμάτων είναι πολύ μεγάλη.

#### 1.5.4 Αλληλεπίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας με την ύλη

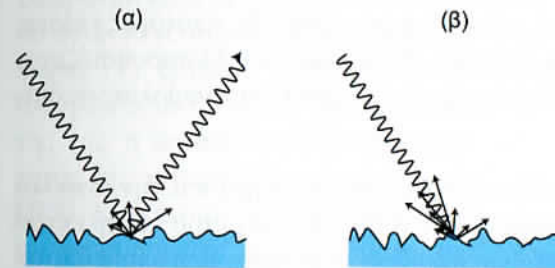
Τα μικροκύματα αποτελούν μια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που περιλαμβάνει μήκη κύματος από 1mm έως 1m, δηλ. μεγαλύτερα του υπέρυθρου. Η μικροκυματική ακτινοβολία χρησιμοποιείται από τη δορυφορική τηλεπισκόπηση για την ανίχνευση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους και της ατμόσφαιρας. Η αλληλεπίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας με τα στερεά και τα υγρά σώματα είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με αυτή της ορατής και υπέρυθρης ακτινοβολίας καθώς οι μεταβολές στην ακτινοβολία των μικροκυμάτων προέρχονται από την αλληλεπίδρασή της τόσο με την επιφάνεια του εδάφους και των υδάτινων επιφανειών όσο και με τα βαθύτερα στρώματα. Γενικά, τα σώματα στη γη ανακλούν και απορροφούν τη μικροκυματική ακτινοβολία που δέχονται και παράλληλα εκπέμπουν τα ίδια ακτινοβολία μικροκυμάτων (Εικόνα 1.11γ).

##### α. Ανάκλαση στην επιφάνεια της γης

Το ποσό και η διεύθυνση της ανακλώμενης στην επιφάνεια της γης μικροκυματικής ακτινοβολίας εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα του εδάφους), τις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών, και τα χαρακτηριστικά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (συχνότητα, πόλωση, γωνία πρόσπτωσης) (CCRS/CSA, 1998). Την αλληλεπίδραση αυτή αξιο-

ποιούν τα ενεργητικά δορυφορικά συστήματα τύπου ραντάρ (βλ. επόμενη παράγραφο) για την καταγραφή των ιδιοτήτων του γήινου περιβάλλοντος. Τα συστήματα αυτά εκπέμπουν ακτινοβολία μικροκυμάτων σε συγκεκριμένη συχνότητα προς την επιφάνεια της γης, και καταγράφουν το ποσό της ακτινοβολίας που επιστρέφει στον αισθητήρα λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια της γης (οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία). Τα χαρακτηριστικά του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος που καταγράφει το ραντάρ έχουν τροποποιηθεί κατά τη διεργασία της ανάκλασης στην επιφάνεια της γης και φέρουν έτσι πληροφορία για τα φυσικά χαρακτηριστικά της.

• **Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.** Γενικά, το ποσοστό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από τη σχέση του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με την τραχύτητα της επιφάνειας. Αν η επιφάνεια είναι ομαλή σε σχέση με το μήκος κύματος τότε αυτή λειτουργεί ως κάτοπτρο και η ανάκλαση ονομάζεται *κατοπτρική (specular reflection)* (Εικόνα 1.23α). Στην περίπτωση αυτή



Εικόνα 1.23.

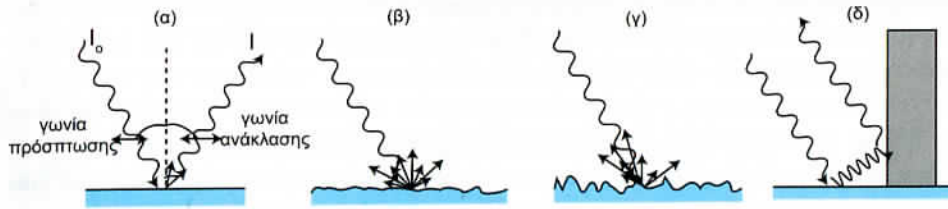
(α) Η επιφάνεια της γης φαίνεται λεία σε μικροκυματική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος.  
(β) Η ίδια επιφάνεια φαίνεται ανώμαλη σε μικροκυματική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος.

η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης και το ποσό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι πολύ μικρό. Αν η επιφάνεια είναι τραχεία σε σχέση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας τότε συμβαίνει *διάχυση (diffused reflection)* της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε πολλές και τυχαίες διευθύνσεις, με συνέπεια μέρος της ακτινοβολίας να οπι-

σθοσκεδαάζεται προς το ραντάρ (Εικόνα 1.23β).

Η τραχύτητα λοιπόν μίας επιφάνειας αποτελεί σχετική έννοια, γιατί εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, μια επιφάνεια συμπεριφέρεται ως λεία σε μικροκυματική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος και ως τραχεία σε μικροκυματική ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (Εικόνα 1.23). Η τραχύτητα της επιφάνειας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη ένταση του σήματος που επιστρέφει σε ένα ραντάρ και μία αποδεκτή σχέση που προσδιορίζει προσεγγιστικά τη παράμετρο της τραχύτητας είναι το κριτήριο του Rayleigh. Σύμφωνα με αυτό μία επιφάνεια θεωρείται λεία όταν το μέσο ύψος των επιφανειακών ανωμαλιών  $\Delta h$  είναι μικρότερο από το κριτήριο του Rayleigh σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8} \eta \mu \theta \quad (1.38)$$



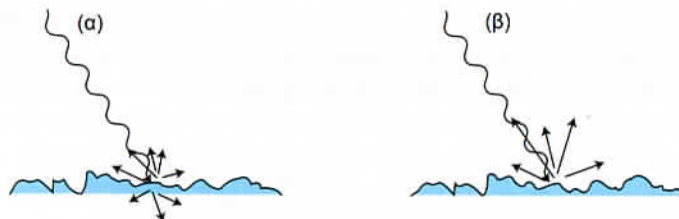
**Εικόνα 1.24.** (α) Κατοπτρική ανάκλαση της μικροκυματικής ακτινοβολίας. (β) Διάχυση σε επιφάνεια μικρής

όπου  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης ως προς την επιφάνεια και  $\lambda$  το μήκος κύματος.

**Γωνιακή ανάκλαση (corner reflection)** συμβαίνει όταν διαδοχικές κατοπτρικές ανακλάσεις σε δύο η και παραπάνω επιφάνειες έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να οπισθοσκεδαστεί. Γωνιακή ανάκλαση είναι δυνατόν να συμβεί σε κτίρια, μεταλλικές κατασκευές, απότομες κλίσεις της τοπογραφίας και πτυχώσεις του εδάφους. Στην Εικόνα 1.24 παρουσιάζεται εποπτικά το φαινόμενο της ανάκλασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες στη γη.

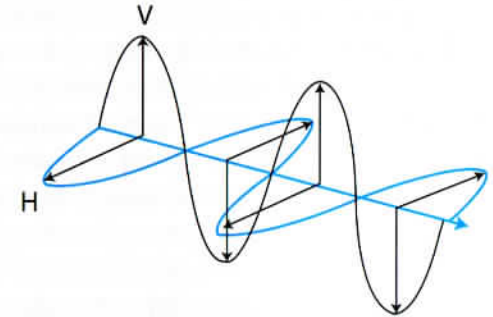
• **Διηλεκτρικές ιδιότητες.** Αυτές επιδρούν στη διαπερατότητα και την ανακλαστικότητα ενός υλικού στη μικροκυματική ακτινοβολία. Ένα μέτρο των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός σώματος είναι η **διηλεκτρική σταθερά**, η οποία αποτελεί μια ένδειξη της ανακλαστικότητας και της αγωγιμότητας του σώματος. Στη φασματική περιοχή των μικροκυμάτων, τα περισσότερα σώματα παρουσιάζουν τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς που κυμαίνεται από 3 έως 8 όταν αυτά περιέχουν πολύ μικρή υγρασία. Αντιθέτως, η διηλεκτρική σταθερά του νερού έχει τιμή περίπου 80. Συνεπώς, η παρουσία υγρασίας είτε στο έδαφος είτε στη βλάστηση μπορεί να αυξήσει σημαντικά την οπισθοσκεδαζόμενη μικροκυματική ακτινοβολία (Εικόνα 1.25). Στην πραγματικότητα, οι μεταβολές του σήματος του ραντάρ σε μια σκηνή συχνά οφείλονται περισσότερο σε μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας παρά σε αλλαγή των υπόλοιπων χαρακτηριστικών της επιφάνειας. Κατά συνέπεια, η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους είναι ανάλογη της περιεχόμενης υγρασίας.

**Εικόνα 1.25.** Η σκέδαση της μικροκυματικής ακτινοβολίας σε επιφάνεια (α) μικρής και (β) μεγάλης εδαφικής υγρασίας.



• **Χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας.** Το μήκος κύματος, η πολωσιμότητα και η γωνία πρόσπτωσης είναι τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της μικροκυματικής ακτινοβολίας που καθορίζουν την αλληλεπίδρασή της με την επιφάνεια της γης. Το μήκος κύματος δηλ. η συχνότητα της ακτινοβολίας σε σχέση με την τραχύτητα της επιφάνειας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, επηρεάζει το ποσό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

**Πολωσιμότητα (polarization)** της μικροκυματικής ακτινοβολίας ορίζεται η κατεύθυνση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της ακτινοβολίας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο και είναι μια παράμετρος από την οποία εξαρτάται η αλληλεπίδρασή της με το στόχο και το ποσοστό της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Εάν το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται σε διεύθυνση παράλληλη με το οριζόντιο επίπεδο, η ακτινοβολία λέγεται ότι είναι **οριζόντια πόλωσης (H)**, ενώ αν έχει διεύθυνση κάθετη στο οριζόντιο επίπεδο τότε λέγεται ότι είναι **κάθετη πόλωσης (V)** (Εικόνα 1.26). Κατά την αλληλεπίδραση της με την επιφάνεια της γης, η κατάσταση της πολωσιμότητας της ακτινοβολίας μπορεί να αλλάξει. Συγκεκριμένα, η πολωσιμότητα του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος μεταβάλλεται όσο αυξάνεται η τραχύτητα της επιφάνειας.



**Εικόνα 1.26.** Οριζόντια (H) και κάθετη (V) πολωσιμότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας.

Η **γωνία πρόσπτωσης** αναφέρεται στη γωνία που σχηματίζει η προσπίπτουσα ακτινοβολία με την κάθετη διεύθυνση στην επιφάνεια του εδάφους (Εικόνα 1.24a). Η ανάκλαση των μικροκυμάτων με την επιφάνεια εξαρτάται από αυτή τη γωνία.

### β. Διαπερατότητα του εδάφους

Η μικροκυματική ακτινοβολία, κατά τη διάδοση της διαμέσου ενός υλικού, εξασθενεί είτε λόγω σκέδασης είτε λόγω απορρόφησης. Η διαπερατότητα των υλικών εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και τις **διηλεκτρικές ιδιότητές τους**.

Η διαπερατότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας αυξάνει όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και όσο πιο μικρή περιεκτικότητα σε υγρασία έχει το υλικό. Υλικά με μικρό περιεχόμενο σε νερό, όπως το ξηρό έδαφος, το χιόνι και ο πάγος έχουν μικρή απορροφητικότητα στην μικροκυματική ακτινοβολία η οποία εισχωρεί σε βάθος και αλληλεπιδρά με βαθύτερα στρώματα του υλικού. Έτσι, μικροκύματα μεγάλου μήκους κύματος μπορούν να διαπεράσουν ξηρές γήινες επιφάνειες ή παγοκαλυμμένες επιφάνειες σε βάθος, γεγονός το οποίο αξιοποιείται από τη τεχνολογία των ραντάρ για την εξαγωγή πληροφορίας για το έδαφος και τον πάγο σε διάφορα βάθη. Στα πεδία επιστημών και έρευνας

που χρησιμοποιούνται τα ραντάρ είναι σημαντική η γνώση του βαθμού εξασθένησης της ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια ώστε να λαμβάνονται όσο το δυνατό περισσότερο ασφαλή και λεπτομερή στοιχεία από το επιστρεφόμενο σήμα στις κεραίες των ραντάρ.

#### γ. Εκπομπή από γήινες επιφάνειες

Η εκπεμπόμενη από τη γη μικροκυματική ακτινοβολία φέρει πληροφορία ανάλογη με αυτή της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Αν και τα μήκη κύματος των μικροκυμάτων είναι αρκετά μεγαλύτερα από αυτά του θερμικού υπέρυθρου, η εκπομπή της μικροκυματικής ακτινοβολίας εξαρτάται από τη *θερμοκρασία* και την *ικανότητα εκπομπής* των σωμάτων περίπου με τον ίδιο τρόπο με αυτόν της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Η ικανότητα εκπομπής των σωμάτων στη φασματική περιοχή των μικροκυμάτων εξαρτάται σημαντικά, εκτός από το είδος του υλικού, και από την *περιεχόμενη υγρασία*. Υλικά με μικρό περιεχόμενο σε νερό, όπως το ξηρό έδαφος, το χιόνι και ο πάγος αφού έχουν μικρή απορροφητικότητα στην μικροκυματική ακτινοβολία, σύμφωνα με τη σχέση 1.29 και η αντίστοιχη ικανότητα εκπομπής των επιφανειών αυτών θα είναι μικρή. Η προσθήκη έστω ενός μικρού ποσού νερού μπορεί να επιφέρει αύξηση της ικανότητας εκπομπής των σωμάτων έως και την τιμή της μονάδας, όπως συμβαίνει στο λιωμένο χιόνι και το υγρό έδαφος. Κάποιος θα περίμενε η ικανότητα εκπομπής μιας υδάτινης επιφάνειας να είναι περίπου ίση με τη μονάδα. Παρόλα αυτά, επειδή η επιφάνεια του νερού λειτουργεί ως μια ενδιάμεση επιφάνεια και ανακλά μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την υπόλοιπη μάζα νερού προς τα κάτω, ο συντελεστής εκπομπής μειώνεται στο 0.5 (Rao et al, 1990)(Εικόνα 1.11γ).

Η ικανότητα εκπομπής μεταβάλλεται και με το *μήκος κύματος* της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Μικροκύματα με μήκος κύματος περίπου του ίδιου μεγέθους με αυτό των σωματιδίων του υλικού σκεδάζονται μέσα στο υλικό με αποτέλεσμα να εξέρχεται τελικά από την επιφάνεια του μόνο ένα μικρό ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα βαθύτερα στρώματα και έτσι τελικά η ενεργή ικανότητα εκπομπής μειώνεται.

Σε γωνίες παρατήρησης σε διεύθυνση διαφορετική από την κατακόρυφη διεύθυνση, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι συνήθως πολωμένη. Όσο αυξάνει η τραχύτητα της επιφάνειας, η *πολωσιμότητα* της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας περιστρέφεται και γίνεται περισσότερο ανομοιογενής με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακτινοβολία που λαμβάνεται από το δορυφορικό αισθητήρα. Αντιθέτως, μια λεία επιφάνεια εκπέμπει πολωμένη ακτινοβολία σε μια σταθερή κατεύθυνση με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακτινοβολία που καταγράφεται από τον ανιχνευτή. Μετρήσεις της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας σε οριζόντια και κάθετη πολωσιμότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαχθεί πληροφορία για την τραχύτητα της επιφάνειας.

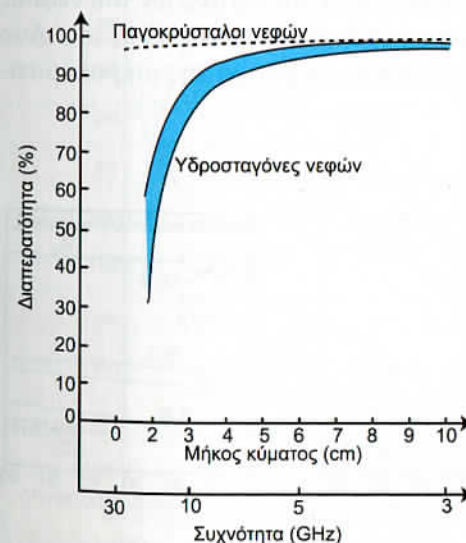
Έτσι, με βάση τα προηγούμενα, η εκπεμπόμενη από την επιφάνεια της γης

μικροκυματική ακτινοβολία μπορεί να δώσει πληροφορία για τη βλάστηση, την υγρασία του εδάφους και γενικά για το είδος κάλυψης του εδάφους. Στο ποσό ακτινοβολίας που τελικά θα φτάσει στο δορυφορικό αισθητήρα συνεισφέρει και η εκπεμπόμενη από την ατμόσφαιρα μικροκυματική ακτινοβολία, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την περιεχόμενη υγρασία της ατμόσφαιρας. Παράλληλα, υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό μικροκυματικής ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης.

#### δ. Επίδραση της ατμόσφαιρας

Λόγω του μεγάλου μήκους κύματος, η μικροκυματική ακτινοβολία επηρεάζεται ελάχιστα από τις αέριες ενώσεις της ατμόσφαιρας και τα αερολύματα. Στις συχνότητες των μικροκυμάτων, ο κύριος απορροφητής από τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας είναι το οξυγόνο και οι υδρατμοί.

Η ικανότητα διείσδυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας στα νέφη αυξάνεται με το μήκος κύματος (Εικόνα 1.27). Χαρακτηριστικό των μικροκυμάτων, επίσης, είναι η ιδιότητά τους να μη σκεδάζονται όταν το μήκος κύματος τους είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος των νεφοσταγόνων. Στην περίπτωση αυτή οι νεφοσταγόνες απορροφούν και εκπέμπουν μικροκυματική ακτινοβολία, αλλά το φαινόμενο αυτό είναι ασήμαντο καθώς το ποσό του νερού που περιέχεται στα νέφη είναι μικρό. Έτσι, για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 3 cm, δηλ. συχνότητας μικρότερης από 10 GHz, τα νέφη είναι διαπερατά, οπότε και δεν επηρεάζουν την προσπίπτουσα σε αυτά μικροκυματική ακτινοβολία. Το γεγονός αυτό οφεί-



Εικόνα 1.27.

Η εξάρτηση της διαπερατότητας των νεφών από τη συχνότητα των μικροκυμάτων (τροποποιημένο διάγραμμα από ESA, 1994).

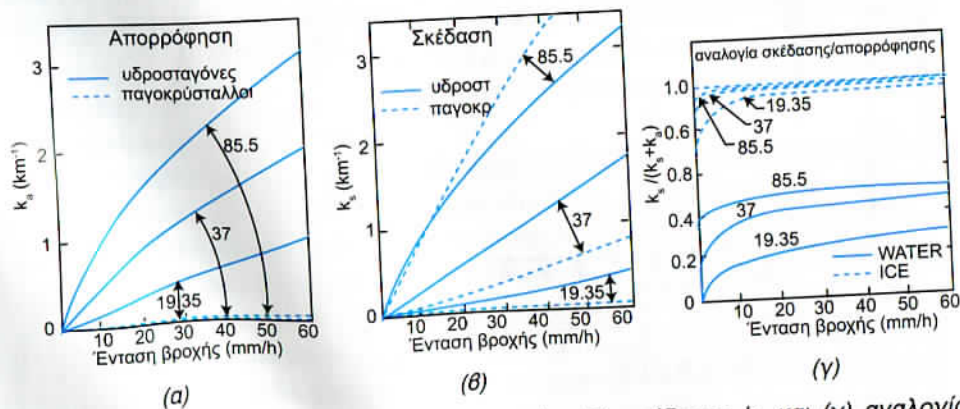
λεται στο ότι οι νεφικές υδροσταγόνες έχουν διάμετρο σαφώς μικρότερη (< 0.1 mm) από τα συγκεκριμένα μήκη κύματος. Η ιδιότητα αυτή των μικροκυμάτων αξιοποιείται από τη δορυφορική τηλεπισκόπηση με τα ραντάρ τα οποία έχουν τη

δυνατότητα να αποτυπώνουν την επιφάνεια της γης ανεξαρτήτως των καιρικών καταστάσεων. Αντιθέτως, η επίδραση των νεφοσταγόνων στα υψηλότερης συχνότητας μικροκύματα ( $> 10$  GHz), δηλ. με μικρό μήκος κύματος ( $< 3$  cm), είναι σημαντική, κυρίως λόγω απορρόφησης (Εικόνα 1.27) ενώ σε ακόμη μεγαλύτερες συχνότητες ( $> 60$  GHz) υπεισέρχεται και η σκέδαση από τους παγοκρυστάλλους του νέφους.

Στην περίπτωση των σταγόνων βροχής, το μέγεθός τους είναι τέτοιο που επιτρέπει την αλληλεπίδρασή τους με τη μικροκυματική ακτινοβολία, τόσο με τη διαδικασία της απορρόφησης όσο και της σκέδασης. Στην Εικόνα 1.28 παρουσιάζονται οι παράμετροι της απορρόφησης και σκέδασης της βροχής για τρεις διαφορετικές συχνότητες. Με βάση τα διαγράμματα αυτά μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα τρία συμπεράσματα:

- Οι παγοκρύσταλλοι ουσιαστικά δεν απορροφούν μικροκυματική ακτινοβολία, παρά μόνο τη σκεδιάζουν.
- Οι βροχοσταγόνες απορροφούν και σκεδιάζουν, με την απορρόφηση να επικρατεί στις χαμηλές συχνότητες ( $< 22$  GHz).
- Τόσο η σκέδαση όσο και η απορρόφηση αυξάνονται με τη συχνότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας και την ένταση της βροχής. Η σκέδαση όμως από τους παγοκρυστάλλους αυξάνεται πολύ πιο γρήγορα με τη συχνότητα από ότι η σκέδαση από τις βροχοσταγόνες.

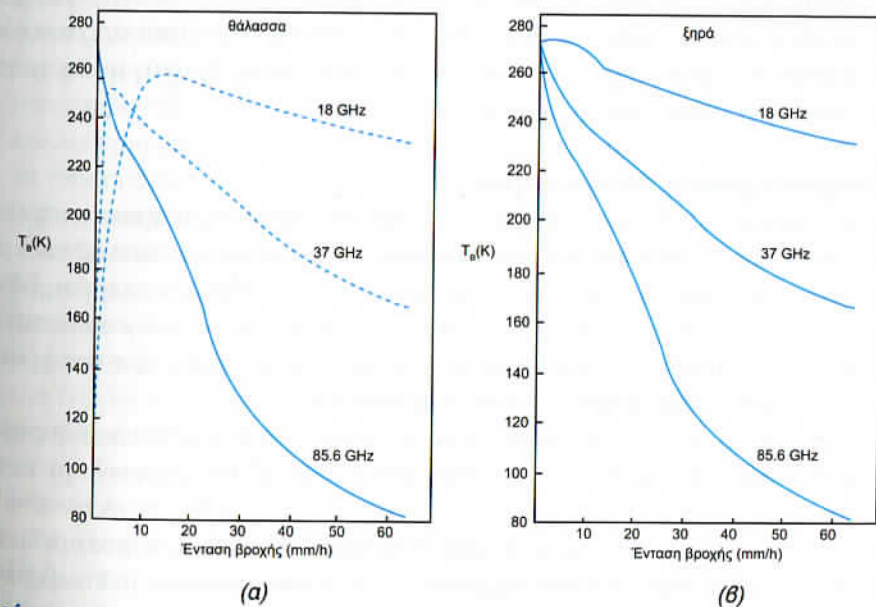
Γενικά η επίδραση των βροχοσταγόνων και των παγοκρυστάλλων του νέφους στην μικροκυματική ακτινοβολία διαφοροποιείται με το μήκος κύματος. Δυο γενικοί κανόνες μπορούν να αναφερθούν. Πρώτον, το φάσμα της μικροκυματι-



**Εικόνα 1.28.** Συντελεστής (α) απορρόφησης  $k_a$ , (β) σκέδασης  $k_s$  και (γ) αναλογία συντελεστών σκέδασης/απορρόφησης για βροχοσταγόνες και παγοκρυστάλλους, για τρεις συχνότητες μικροκυμάτων και για διάφορες εντάσεις βροχής (Spencer et al, 1989).

κής ακτινοβολίας μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη. Δεύτερον σε διαφορετικές συχνότητες, τα μικροκυματικά ραδιόμετρα καταγράφουν πληροφορία για διαφορετικά μέρη της δομής ενός βροχοφόρου νέφους. Συγκεκριμένα:

- **Κάτω από τα 22 GHz**, η απορρόφηση από τις βροχοσταγόνες του νέφους είναι η κύρια διεργασία αλληλεπίδρασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας με το νέφος. Σε αυτά τα μήκη κύματος οι παγοκρύσταλλοι που τυχόν βρίσκονται στην κορυφή του νέφους είναι σχεδόν διάφανοι με αποτέλεσμα τα μικροκυματικά ραδιόμετρα να καταγράφουν άμεσα την επίδραση της βροχής στην ακτινοβολία και συνεπώς να είναι δυνατή η εκτίμηση της έντασης της βροχής με άμεσο τρόπο. Αύξηση της έντασης βροχής (έως 10mm/h) συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση της εκπεμπόμενης ( $< 22$ GHz) από τις βροχοσταγόνες μικροκυματικής ακτινοβολίας (Εικόνα 1.29α). Η αύξηση αυτή είναι σημαντική και ανιχνεύσιμη πάνω από υδάτινες επιφάνειες (Εικόνα 1.29α) επειδή αυτές έχουν μικρή ικανότητα εκπομπής ( $\epsilon_{\text{υδ}} < 0.6$ ) με αποτέλεσμα η διαφορά της ακτινοβολίας της βροχής από αυτή του υποβάθρου να είναι μεγάλη. Στην περίπτωση αυτή η βροχή εντοπίζεται ως μια περιοχή με μεγάλη ακτινοβολία (μεγάλη θερμοκρασία) σε ψυχρό περιβάλλον. Αντιθέτως, πάνω από ξηρό έδαφος ( $\epsilon_{\text{εδ}} \approx 0.9$ ) η εκπεμπόμενη από τις βροχοσταγόνες μικροκυματική ακτινοβολία ελάχιστα διαφοροποιείται από την ακτινοβολία του εδάφους με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολη η διάκριση της βροχής. Επιπλέον δεν υπάρχει αύξηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας με την αύξηση της έντασης της βροχής (Εικόνα 1.29β), όπως συμβαίνει πάνω από τη θάλασσα.



**Εικόνα 1.29.** Θερμοκρασία λαμπρότητας βροχοφόρου νέφους σε σχέση με την ένταση βροχής, για τρεις συχνότητες μικροκυμάτων, πάνω από (α) τη θάλασσα και (β) τη Ξηρά (Spencer et al, 1989).

- **Πάνω από τα 60 GHz**, η σκέδαση από τους παγοκρυστάλλους της κορυφής του νέφους είναι σημαντική με αποτέλεσμα σημαντικό ποσοστό της εκπεμπόμενης από τις βροχοσταγόνες ακτινοβολίας να εξασθενεί καθώς διέρχεται μέσα από τους παγοκρυστάλλους της κορυφής του νέφους. Κατά συνέπεια τα μικροκυματικά ραδιόμετρα καταγράφουν την επίδραση μόνο των παγοκρυστάλλων της κορυφής του νέφους στην ακτινοβολία και δεν μπορούν να «δουν» τη βροχή κάτω από αυτό. Η ακτινοβολία που προέρχεται κάτω από το νέφος εξασθενεί λόγω σκέδασης από τους παγοκρυστάλλους με αποτέλεσμα η περιοχή του νέφους να εμφανίζει χαμηλότερη ακτινοβολία από το υπόβαθρο, ανεξάρτητα αν αυτό είναι έδαφος ή υδάτινη επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή η μείωση της ακτινοβολίας εξαρτάται από την ποσότητα των παγοκρυστάλλων και συνεπώς η βροχόπτωση μπορεί να εκτιμηθεί μόνο με έμμεσο τρόπο, συσχετίζοντας την ποσότητα των παγοκρυστάλλων με τη βροχή που αυτοί παράγουν. Όσο μεγαλύτερη η συχνότητα της ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερη η σκέδαση και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη η μείωση της ακτινοβολίας στην περιοχή της βροχής.

- **Μεταξύ των 22 και 60 GHz**, τόσο η απορρόφηση όσο και η σκέδαση είναι εξίσου σημαντικές.

Πέραν της σκέδασης, οι υδροσταγόνες εκπέμπουν οι ίδιες μικροκυματική ακτινοβολία, μικρής όμως έντασης. Στις χαμηλές συχνότητες (20 έως 40 GHz) η εκπομπή ακτινοβολίας από τις σταγόνες βροχής είναι σημαντική. Στην περίπτωση αυτή μάλιστα, επειδή η ικανότητα εκπομπής των υδροσταγόνων είναι μεγαλύτερη από αυτή της επιφάνειας της γης, η εκπεμπόμενη από τις σταγόνες βροχής μικροκυματική ακτινοβολία συχνά υπερτερεί αυτής της επιφάνειας του εδάφους. Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση βροχής με τη χρήση παθητικών δορυφορικών αισθητήρων.

## 1.6 Δορυφορικοί αισθητήρες

Τα καταγραφικά συστήματα που φέρονται από δορυφόρους ανήκουν στην ευρεία κατηγορία των **ραδιομέτρων (radiometer)**, τα οποία αποτελούν όργανα μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Εάν ο αισθητήρας περιλαμβάνει ένα φράγμα περιθλάσης το οποίο διαχωρίζει την ακτινοβολία, που εκτείνεται σε μια περιοχή του φάσματος, σε μικρότερες φασματικές περιοχές, τότε αυτός ονομάζεται **φασματοραδιόμετρο (spectroradiometer)**.

Η λειτουργία όλων των ραδιομέτρων και συνεπώς των περισσότερων δορυφορικών αισθητήρων βασίζεται στο **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**. Σύμφωνα με αυτό, όταν ένα αρνητικά φορτισμένο φωτοευαίσθητο υλικό εκτεθεί σε ακτινοβολία, παράγονται ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Έτσι, οι μεταβολές στο ηλεκτρικό ρεύμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση των μεταβολών στην ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην πλάκα με το φωτοευαίσθητο υλικό.

### 1.6.1 Κατηγορίες δορυφορικών αισθητήρων

Οι δορυφορικοί αισθητήρες κατατάσσονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τη πηγή της ακτινοβολίας που καταγράφουν: τους **παθητικούς** και τους **ενεργητικούς** (Εικόνα 1.30).

- Οι **παθητικοί αισθητήρες (passive sensors)** αποτελούν συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται από το παρατηρούμενο αντικείμενο - στόχο. Τα συστήματα αυτά ανιχνεύουν το τμήμα του φάσματος που εκτείνεται από την περιοχή των πολύ μικρών μηκών κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας έως την περιοχή του απώτερου υπέρυθρου ( $0.38\mu\text{m} < \lambda < 1000\mu\text{m}$ ) (Πίνακας 1.1). Ανάλογα με την εφαρμογή, επιλέγεται και η αντίστοιχη φασματική περιοχή καταγραφής. Σημειώνεται ότι υπάρχουν διαθέσιμοι αισθητήρες για όλο το φάσμα, από το υπεριώδες έως το μακρινό υπέρυθρο, χωρίς όμως να χρησιμοποιούνται όλοι στην τηλεπισκόπηση. Αυτό συμβαίνει γιατί σε πολλές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος η απορρόφηση είναι μερική ή ολική, και κατά συνέπεια, η ακτινοβολία διαδίδεται μερικώς ή καθόλου από την ατμόσφαιρα. Αποτέλεσμα της εξάρτησης της ατμοσφαιρικής διάδοσης και της απορρόφησης της ακτινοβολίας από το μήκος κύματος είναι ο περιορισμός της περιοχής φάσματος που είναι αξιοποιήσιμο στη δορυφορική τηλεπισκόπηση στα μήκη κύματος από  $0.4\mu\text{m}$  έως  $12\mu\text{m}$  (ορατό έως θερμικό υπέρυθρο).

Οι αισθητήρες δηλαδή των δορυφόρων λειτουργούν όπως και οι φωτογραφικές μηχανές, με τη διαφορά ότι, εκτός από τη μέτρηση της ενέργειας στο ορατό τμήμα του φάσματος, καταγράφουν την ενέργεια σε πολλές περιοχές του φάσματος και ονομάζονται για αυτό το λόγο **πολυφασματικοί αισθητήρες (multispectral sensors)**. Κατά αυτό τον τρόπο νέφη, υδάτινες επιφάνειες, δάση, καλλιεργήσιμοι αγροί και άλλου τύπου γήινες επιφάνειες διακρίνονται από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που καταγράφεται στις δορυφορικές εικόνες.

Κάθε εικόνα, που καταγράφει την ακτινοβολία σε ένα τμήμα του φάσματος, περιέχει πληροφορίες εξαρτώμενες από την φασματική περιοχή στην οποία λήφθηκε η εικόνα και αναφέρεται σαν εικόνα στο κανάλι  $x$ , όπου  $x$  ένας αριθμός αναφερόμενος στην περιοχή του φάσματος. Για παράδειγμα, η εικόνα του NOAA στο κανάλι 3 του ραδιομέτρου AVHRR καταγράφει την ανακλώμενη ακτινοβολία στο μέσο υπέρυθρο, μία περιοχή που μας δίνει πληροφορίες για την παρουσία χιονιού και πάγου. Είναι επίσης χρήσιμο για την ανίχνευση πυρκαγιών.

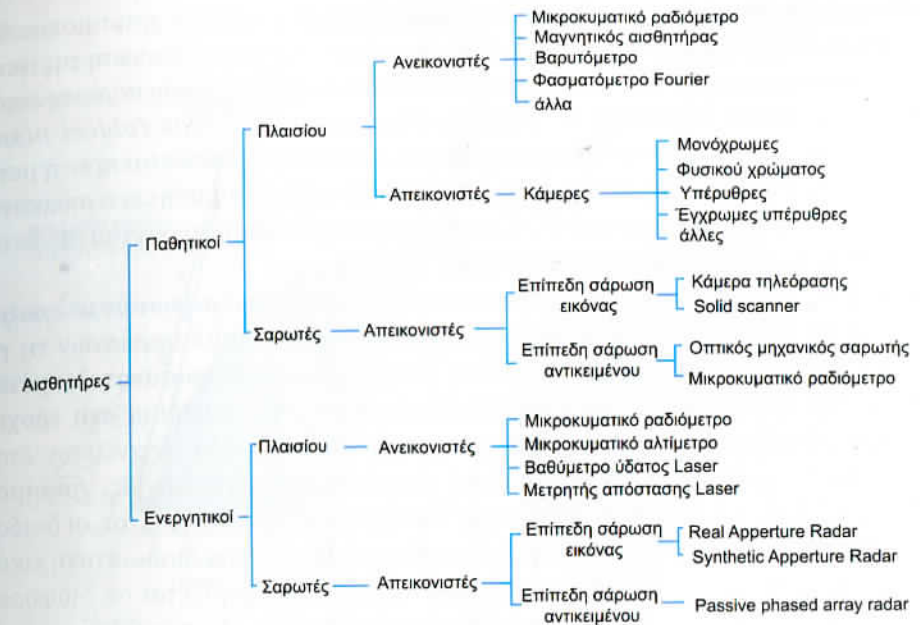
Μια ιδιαίτερη κατηγορία παθητικών αισθητήρων είναι οι **θερμικοί αισθητήρες (Thermal sensors)** οι οποίοι ανιχνεύουν την εκπεμπόμενη από τη γη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία ( $3\mu\text{m} - 15\mu\text{m}$ ). Οι αισθητήρες αυτού του είδους χρησιμοποιούν ανιχνευτές οι οποίοι είναι φωτοευαίσθητοι σε αυτή την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι ανιχνευτές τους ψύχονται

σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν για να περιοριστεί η εκπεμπόμενη από τους ίδιους θερμική ακτινοβολία. Οι θερμοκοί αισθητήρες αποδίδουν στην ανιχνευόμενη θερμική ακτινοβολία μια θερμοκρασία με βάση μια θερμοκρασία αναφοράς μιας εσωτερικής πηγής ακτινοβολίας. Η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να φτάσει τους 0.1 °C. Οι θερμοκρασίες λαμπρότητας αποδίδονται σε μια εικόνα με επίπεδα του γκρι, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να παρουσιάζονται με ανοικτούς τόνους του γκρι και τις χαμηλότερες με σκούρους τόνους. Οι εικόνες αυτές, οι οποίες απεικονίζουν ποιοτικά τις σχετικές διαφορές των θερμοκρασιών στην επιφάνεια της γης, είναι επαρκείς για τις περισσότερες εφαρμογές. Η εκτίμηση της θερμοκρασίας σε απόλυτες τιμές απαιτεί ακριβή βαθμονόμηση και μέτρηση των θερμοκρασιών αναφοράς και λεπτομερή γνώση των θερμικών ιδιοτήτων του στόχου, των γεωμετρικών παραμορφώσεων και των ραδιομετρικών επιδράσεων.

- Αντίθετα, οι **ενεργητικοί αισθητήρες (active sensors)** χρησιμοποιούν δική τους πηγή ακτινοβολίας την οποία κατευθύνουν προς το υπό έρευνα αντικείμενο, αυτή στη συνέχεια ανακλάται στο στόχο (αντικείμενο ή περιοχή της επιφάνειας της γης), επιστρέφει και καταγράφεται από το σύστημα. Σε αυτούς τους ανιχνευτές, όπως τα ραντάρ που εκπέμπουν στην περιοχή των μικροκυμάτων, το επιστρεφόμενο σήμα έχει υποστεί αλλοίωση που εξαρτάται μεταξύ άλλων από τις ιδιότητες της επιφάνειας. Έτσι, επιτυγχάνεται η αναγνώριση και μελέτη σωμάτων και φαινομένων, όπως των νεφικών πυρήνων των καταιγίδων, της βροχόπτωσης, των αέριων χημικών ενώσεων, των κατασκευών εδάφους, των ωκεάνιων συστημάτων κυκλοφορίας, των πετρελαιοκηλίδων κ.α. Από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του ραντάρ είναι η επιχειρησιακή του δυνατότητα να χρησιμοποιείται ημέρα και νύχτα κάτω από όλες σχεδόν τις καιρικές συνθήκες, υπό την προϋπόθεση ότι ο δορυφόρος διέρχεται πάνω από την περιοχή σε συχνά χρονικά διαστήματα.

Οι αισθητήρες, επίσης, ανάλογα με τις διεργασίες ανίχνευσης της περιοχής ενδιαφέροντος διακρίνονται σε **ανεικονιστές** και **απεικονιστές** (Εικόνα 1.30).

- Οι **ανεικονιστές (non-imaging sensors)** μετρούν την ακτινοβολία η οποία προέρχεται από όλα τα σημεία της περιοχής που καταγράφεται, την ολοκληρώνουν σε μια μέση τιμή και την μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Στην περίπτωση αυτή, η ακτινοβολία που καταγράφεται χαρακτηρίζεται το σύνολο της περιοχής που ανιχνεύεται, χωρίς να επιμερίζεται στα διάφορα σημεία της. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα παθητικά συστήματα που εκτελούν αεροβολίσεις (soundings) δηλ. καταγραφές της κατακόρυφης κατανομής διαφόρων παραμέτρων στην ατμόσφαιρα, όπως το μικροκυματικό ραδιόμετρο (microwave radiometer), καθώς και τα ενεργητικά συστήματα που εκτελούν μετρήσεις ύψους των στόχων στην επιφάνεια της γης, όπως το μικροκυματικό αλτίμετρο (microwave altimeter).

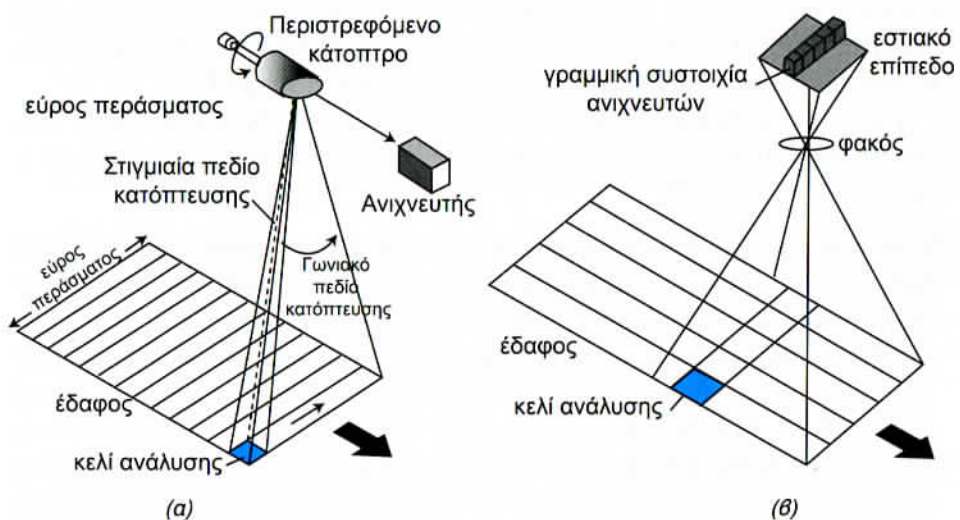


Εικόνα 1.30. Σχηματικό διάγραμμα ταξινόμησης των δορυφορικών αισθητήρων.

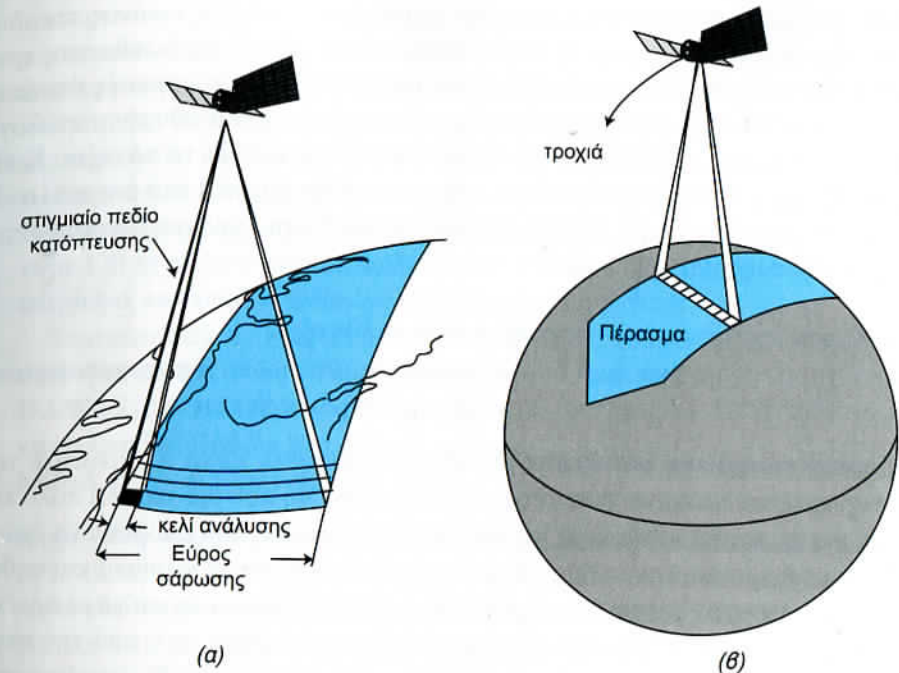
- Οι **απεικονιστές (imaging sensors)**, οι οποίοι λειτουργούν καταγραφικά σε δυο διαστάσεις (μήκος και πλάτος), συνθέτοντας μια εικόνα της περιοχής που ανιχνεύουν με βάση την ακτινοβολία που προέρχεται από κάθε σημείο της. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τόσο παθητικοί αισθητήρες όπως ο απεικονιστής της κάμερας τηλεόρασης (TV Camera) και ο οπτικός μηχανικός σαρωτής (optical mechanical scanner) όσο και ενεργητικοί αισθητήρες όπως το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (synthetic aperture radar). Τέλος, οι αισθητήρες ανάλογα τον τρόπο καταγραφής της ακτινοβολίας κατατάσσονται σε δυο άλλες κατηγορίες: τα **συστήματα πλαισίου** και τους **σαρωτές** (Εικόνα 1.30).
- Τα **συστήματα πλαισίου (framing or no-scanning systems)** εκτελούν στιγμιαία μέτρηση της ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από όλη τη σκηνή. Εξ' ορισμού στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλοι οι ανεικονιστές. Οι μόνοι απεικονιστές που λειτουργούν με αυτό τον τρόπο είναι οι φωτογραφικές κάμερες. Το μέγεθος της σκηνής που ανιχνεύεται καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των οπτικών μερών του συστήματος.
- Στους **σαρωτές (scanning system)**, η σκηνή σαρώνεται σημείο προς σημείο κατά μήκος διαδοχικών γραμμών, σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι περισσότεροι αισθητήρες που δεν αποτελούν κάμερες ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Ανάλογα με τη διαδικασία που ακολουθείται για τη σάρωση της σκηνής οι σαρωτές κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες:

α. **Οπτικο-μηχανικοί σαρωτές (optical-mechanical)**, οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα μηχανικό μέρος (π.χ. ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο) για τη σάρωση της σκηνής. Οι σαρωτές αυτού του είδους μπορούν να εκτελέσουν *επίπεδη σάρωση εικόνας (image plane scanning)* ή *επίπεδη σάρωση αντικειμένου (object plane scanning)* ανάλογα με το αν το περιστρεφόμενο κάτοπτρο βρίσκεται πριν ή μετά το φακό του συστήματος, αντίστοιχα. Στην πρώτη κατηγορία ανήκει ο απεικονιστής της κάμερας τηλεόρασης (TV Camera) και στη δεύτερη το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (synthetic aperture radar).

Οι οπτικο-μηχανικοί σαρωτές ανήκουν στην κατηγορία των **σαρωτών με εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση (across-track scanners)** οι οποίοι σαρώνουν τη γη σε μια σειρά από γραμμές (Εικόνα 1.31α). Οι γραμμές είναι προσανατολισμένες κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου δηλ. εγκάρσια στη τροχιά του. Ο αισθητήρας αποτελείται από μια γραμμική συστοιχία ανιχνευτών έτσι ώστε κάθε γραμμή να σαρώνεται από τη μια πλευρά της συστοιχίας, χρησιμοποιώντας ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο. Καθώς ο δορυφόρος κινείται, οι διαδοχικές σαρώσεις δημιουργούν γραμμές οι οποίες συνθέτουν μια δισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας της γης. Η εισερχόμενη ακτινοβολία χωρίζεται σε διάφορες φασματικές περιοχές οι οποίες ανιχνεύονται ανεξάρτητα. Η υπεριώδης, ορατή, εγγύς και θερμική υπέρυθη ακτινοβολία διαχωρίζεται στα μήκη κύματος που τη συνθέτουν με τη χρήση ενός διαφράγματος περίθλασης. Κάθε φασματική περιοχή ανιχνεύεται και μετριέται από κατάλληλη συστοιχία ανιχνευτών η οποία είναι ευαίσθητη σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται μετατρέπεται σε ψηφιακά δεδομένα που αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 1.31. (α) Σαρωτής με εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση. (β) Σαρωτής κατά μήκος της τροχιάς



Εικόνα 1.32. Πέρασματα και τρόποι σάρωσης δορυφόρων πολικής τροχιάς. Αριστερά εγκάρσια στη τροχιά σάρωση. Δεξιά: σάρωση κατά μήκος της τροχιάς (Τροποποιημένο σχήμα από Rao, 1990).

Η κυκλική κίνηση που εκτελεί το κάτοπτρο για τη σάρωση μιας γραμμής, μετρημένη σε μοίρες, καλείται **γωνιακό πεδίο κατόπτρου (angular field of view)** και καθορίζει το εύρος του περάσματος ή σάρωσης (swath) του δορυφόρου που καταγράφεται στην εικόνα (Εικόνα 1.31α, Εικόνα 1.32α). Το γωνιακό πεδίο κατόπτρου των σαρωτών που φέρονται από δορυφόρους είναι σχετικά μικρό (10-20°) λόγω του μεγάλου ύψους στο οποίο βρίσκονται. Επειδή η απόσταση του αισθητήρα από την επιφάνεια της γης αυξάνει προς τις άκρες της γραμμής σάρωσης, το κελί ανάλυσης (βλ. παράγραφο 1.6.2) μεγαλώνει εισάγοντας έτσι γεωμετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα.

β. **Οπτικο-ηλεκτρονικοί σαρωτές (optical-electronic)**, οι οποίοι κατευθύνουν άμεσα την ακτινοβολία που προέρχεται από τη σκηνή μέσω του φακού σε γραμμική ή επίπεδη συστοιχία ανιχνευτών.

Οι οπτικο-ηλεκτρονικοί σαρωτές ανήκουν στην κατηγορία των **σαρωτών κατά μήκος της τροχιάς (along-track scanners)** οι οποίοι χρησιμοποιούν την κίνηση του δορυφόρου για την καταγραφή διαδοχικών γραμμών σάρωσης κάθετων στη διεύθυνση της τροχιάς και τη σύνθεση μιας δισδιάστατης εικόνας (Εικόνα 1.31β, Εικόνα 1.32β). Αντί για κάτοπτρο σάρωσης, χρησιμοποιούν μια γραμμική συ-



στοιχεία ανιχνευτών τοποθετημένων στο εστιακό επίπεδο της εικόνας που δημιουργείται από τους φακούς, η οποία ωθείται κατά μήκος της διεύθυνσης τροχιάς του δορυφόρου. Τα συστήματα αυτά καλούνται και ως *σαρωτές σκούπας* (*pushbroom scanners*), αφού η κίνηση της συστοιχίας ανιχνευτών είναι ανάλογη με την κίνηση των τριχών μιας σκούπας η οποία σκουπίζει το πάτωμα. Κάθε ανιχνευτής της συστοιχίας μετρά την ενέργεια που προέρχεται από ένα κελί ανάλυσης. Για την καταγραφή διάφορων φασματικών περιοχών χρησιμοποιούνται επιπλέον συστοιχίες ανιχνευτών.

### 1.6.2 Χαρακτηριστικά των δορυφορικών αισθητήρων

Βασικό χαρακτηριστικό των δορυφορικών αισθητήρων τύπου απεικονιστή (imagers) αποτελεί η διακριτική ικανότητα. Αυτή διακρίνεται σε:

- **Χωρική διακριτική ικανότητα (Spatial Resolution).** Είναι η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει δυο αντικείμενα στη σκηνή που βρίσκονται πολύ κοντά και ποσοτικά ισούται με τη μικρότερη απόσταση που μπορούν να έχουν δύο αντικείμενα ώστε οι διαστάσεις τους να διακρίνονται χωριστά και καθαρά ή το ελάχιστο μέγεθος που πρέπει να έχει ένα αντικείμενο για να μπορεί να ανιχνευτεί. Εκφράζεται συνήθως σε m ή km και καθορίζεται από την στιγμιαία γωνία κατόπτρευσης του αισθητήρα. Ως *στιγμιαίο πεδίο κατόπτρευσης* (*Instantaneous Field of View, IFOV*) καλείται η στερεά γωνία με την οποία ο αισθητήρας “βλέπει” την επιφάνεια τη γης και καθορίζει την περιοχή της γήινης επιφάνειας που κατοπτρεύεται από συγκεκριμένο ύψος λήψης, σε μια δεδομένη στιγμή (Εικόνα 1.31α). Η περιοχή της γης που αντιστοιχεί στο στιγμιαίο πεδίο κατόπτρευσης καλείται *κελί ανάλυσης* (*resolution cell*) και είναι αυτό που καθορίζει τη χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα. Το μέγεθος του κελιού ανάλυσης μπορεί να υπολογιστεί αν πολλαπλασιαστεί το IFOV με την απόσταση του αισθητήρα από το έδαφος. Για να διακριθεί ένα ομογενές στοιχείο στην εικόνα θα πρέπει το μέγεθός του να είναι γενικά μεγαλύτερο ή ίσο από το κελί ανάλυσης της εικόνας.

Η απόλυτη τιμή της χωρικής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή μεταβάλλεται, διότι η γωνία κατόπτρευσης εξαρτάται από το ύψος του δορυφόρου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Συνήθως οι δορυφόροι που βρίσκονται σε πολύ υψηλή τροχιά, ενώ καταγράφουν μεγάλες περιοχές, έχουν μικρή χωρική διακριτική ικανότητα. Οι τιμές της χωρικής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή αναφέρονται στο ίχνος του δορυφόρου στην επιφάνεια της γης (Εικόνα 1.44). Για τις περιοχές της εικόνας που απέχουν από το ίχνος του δορυφόρου, η διακριτική ικανότητα του αισθητήρα μειώνεται, αφού αυξάνεται η απόσταση του δορυφόρου από το στόχο ενώ παράλληλα προστίθεται η γεωμετρική παραμόρφωση λόγω της πανοραμικής παραμόρφωσης.

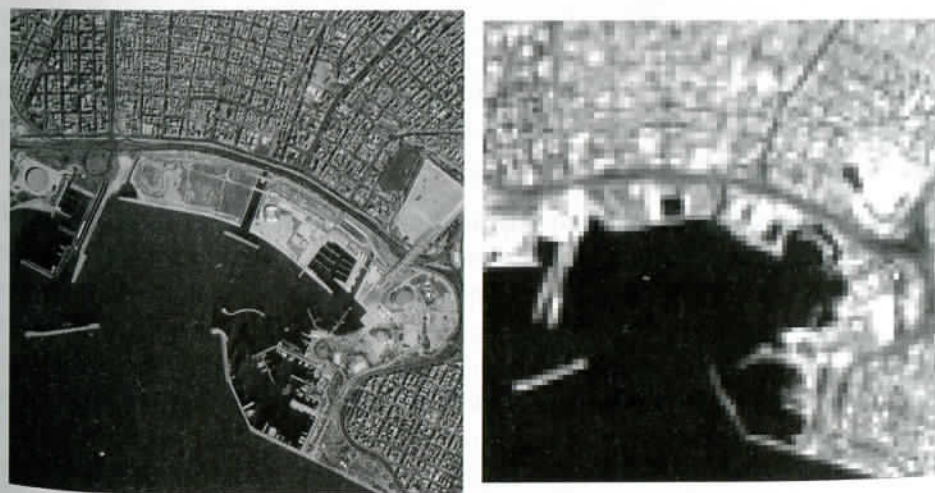
Ας σημειωθεί ότι η χωρική διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα εξαρτάται και από το μήκος κύματος της προσλαμβανόμενης ακτινοβολίας. Καθώς

η ενέργεια της ακτινοβολίας μειώνεται με την αύξηση του μήκους κύματος, οι θερμικοί αισθητήρες, δηλ. οι αισθητήρες που καταγράφουν στην περιοχή της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας, έχουν μεγάλο στιγμιαίο πεδίο κατόπτρευσης για να εξασφαλίσουν το ποσό ενέργειας που απαιτείται για να γίνει μια αξιόπιστη μέτρηση. Για το λόγο αυτό, η χωρική διακριτική ικανότητα των περισσότερων θερμικών ανιχνευτών είναι μικρή. Έτσι για παράδειγμα, το θερμικό κανάλι (κανάλι 6) του Landsat-5 TM έχει χωρική διακριτική ικανότητα 120 m σε αντίθεση με τα υπόλοιπα κανάλια στο ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο, των οποίων η διακριτική ικανότητα είναι 30 m.

Σημειώνεται ότι σήμερα υπάρχουν αισθητήρες τύπου απεικονιστή με πολύ υψηλή ανάλυση, όπως ο Pan του δορυφόρου Quickbird (0.6 x 0.6 m) και του IKONOS-2 (1 x 1 m), με υψηλή ανάλυση όπως ο Landsat ETM 7 (15 x 15 m) και ο Landsat TM 7 (15 x 15 m), με χαμηλή ανάλυση όπως ο AVHRR του NOAA (1.1 x 1.1 km) (Εικόνα 1.33).

- **Φασματική διακριτική ικανότητα (Spectral Resolution),** η οποία σχετίζεται με το εύρος των περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στις οποίες πραγματοποιεί καταγραφές ένας πολυφασματικός ανιχνευτής και τον αριθμό των φασματικών καναλιών που αυτός χρησιμοποιεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η φασματική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα σε ένα κανάλι, τόσο μικρότερο είναι το εύρος της φασματικής περιοχής της ακτινοβολίας που καταγράφεται στο κανάλι αυτό (Εικόνα 1.34). Όσο πιο μικρές σε εύρος είναι οι ζώνες τόσο πιο μεγάλος ο αριθμός των ζωνών.

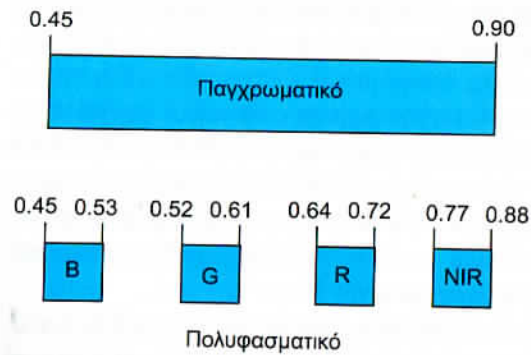
Η φασματική διακριτική ικανότητα είναι πολύ σημαντική για το διαχωρι-



(α)

(β)

Εικόνα 1.33. (α) Εικόνα Quickbird Pan χωρικής ανάλυσης 0.6m. (β) Η αντίστοιχη εικόνα Landsat TM (κανάλι 3) χωρικής ανάλυσης 30m.



Εικόνα 1.34.

Το εύρος της φασματικής περιοχής που καταγράφει ο παγχρωματικός και ο πολυφασματικός αισθητήρας του IKONOS-2. Η φασματική διακριτική ικανότητα του πολυφασματικού είναι μεγαλύτερη από αυτή του παγχρωματικού αισθητήρα αφού καταγράφει σε μικρότερο εύρος μηκών κύματος και σε μεγαλύτερο αριθμό ζωνών.

σμό του είδους των επιφανειών στην εικόνα. Διαφορετικές τάξεις ή στοιχεία και λεπτομέρειες στην εικόνα είναι δυνατόν να διαχωριστούν συγκρίνοντας τις φασματικές τους υπογραφές σε συγκεκριμένες περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ευρείες τάξεις, όπως υδάτινες επιφάνειες και βλάστηση, μπορούν εύκολα να διαχωριστούν χρησιμοποιώντας φασματικές περιοχές με μεγάλο εύρος (π.χ. το ορατό και εγγύς υπέρυθρο) (βλ. Εικόνα 1.14). Άλλες πιο εξειδικευμένες τάξεις, όπως τύποι πετρωμάτων, είναι δύσκολο να διαχωριστούν χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε από αυτές τις ευρείες φασματικές περιοχές και απαιτούν σύγκριση των αποκρίσεών τους σε πιο μικρές φασματικές περιοχές για να διαχωριστούν (βλ. Εικόνα 1.15). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται αισθητήρας με μεγαλύτερη φασματική ανάλυση, όπως π.χ. ο TM του Landsat (βλ. Πίνακα 1.6).

Εξελιγμένοι πολυφασματικοί αισθητήρες, που καλούνται *υπερφασματικοί (hyperspectral sensors)*, καταγράφουν σε εκατοντάδες πολύ μικρού εύρους φασματικές περιοχές στο ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο φάσμα. Η πολύ υψηλή φασματική διακριτική ικανότητα τους διευκολύνει το διαχωρισμό των γήινων επιφανειών με μεγάλη ανάλυση και ακρίβεια με βάση τη φασματική τους απόκριση σε κάθε μια από τις φασματικές αυτές περιοχές.

- **Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (Radiometric Resolution)**, η οποία ορίζεται ως η ευαισθησία του ανιχνευτή να ανιχνεύει διαφορές στην ισχύ του σήματος δηλ. διαφορές στην ένταση της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης από την επιφάνεια της γης ακτινοβολίας. Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα είναι σημαντική καθώς η πραγματική πληροφορία που περιέχεται στα δορυφορικά δεδομένα καθορίζεται από τις ραδιομετρικές τιμές που καταγράφει ο αισθητήρας. Έτσι, η ακρίβεια στην ανίχνευση μεταβολών στο σήμα σχετίζεται άμεσα με τη δυνατότητα ανίχνευσης των αντίστοιχων μεταβολών στα φυσικά χαρακτηριστικά των επιφανειών.

Οι ραδιομετρικές τιμές που καταγράφει ο αισθητήρας μετατρέπονται σε ψηφιακές τιμές που κυμαίνονται από 0 έως μια τιμή η οποία αποτελεί δύναμη του 2 ( $2^x$ ). Η τιμή  $x$ , στην οποία υψώνεται το 2 για να δώσει το εύρος των ψηφιακών

τιμών, καθορίζεται από τον αριθμό των bits που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση των αριθμών σε bytes. Έτσι, εάν ένας αισθητήρας χρησιμοποιεί 8 bits σε κάθε byte για την κωδικοποίηση των δεδομένων, τότε θα υπάρχουν  $2^8=256$  ψηφιακές τιμές διαθέσιμες σε κάθε byte, που θα κυμαίνονται από 0 έως 255. Εάν χρησιμοποιηθούν 10 bits, τότε θα είναι διαθέσιμες  $2^{10}=1024$  ψηφιακές τιμές διαθέσιμες σε κάθε byte, που θα κυμαίνονται από 0 έως 1023. Στην περίπτωση αυτή η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα θα είναι μεγαλύτερη.

Τα δορυφορικά δεδομένα που προέρχονται από απεικονιστές, συνήθως απεικονίζονται με διαφορετικούς τόνους του γκρι σε εικόνες, οι οποίοι είναι ανάλογοι των ψηφιακών τιμών των δεδομένων, με το 0 να αντιστοιχεί στο μαύρο και το 255 στο λευκό, στην περίπτωση δεδομένων 8-bit (βλ. επόμενο κεφάλαιο). Συγκρίνοντας μια εικόνα 2-bit με μια εικόνα 4-bit και 8-bit, μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στο επίπεδο και τη λεπτομέρεια της πληροφορίας που διακρίνεται (Εικόνα 1.35).

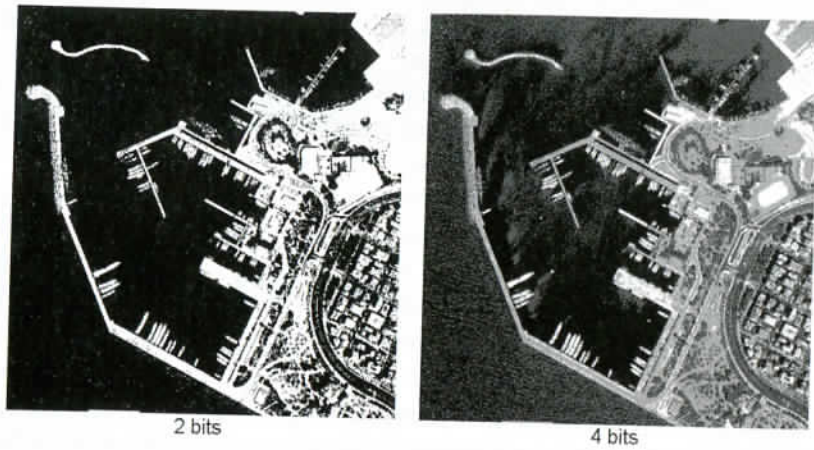
- **Χρονική διακριτική ικανότητα (Temporal Resolution)**, η οποία σχετίζεται με τη συχνότητα λήψης εικόνων για την ίδια περιοχή. Η χρονική διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφόρου και κυμαίνεται από λίγα λεπτά (π.χ. 15' για τον MSG) για τους γεωστάσιμους δορυφόρους μέχρι μερικές εβδομάδες για τους δορυφόρους πολικής τροχιάς (π.χ. 18 ημέρες για τον Landsat-5).

Η συχνότητα λήψης εικόνων μιας περιοχής είναι μια σημαντική παράμετρος σε πολλές εφαρμογές. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση έχει τη δυνατότητα καταγραφής σειράς διαδοχικών εικόνων, και με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η παρακολούθηση αλλαγών στην επιφάνεια της γης. Σε μεταβολές που εξελίσσονται αργά στο χρόνο, όπως αυτές των χρήσεων και της κάλυψης γης, δεν είναι απαραίτητη η μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα του δορυφορικού συστήματος. Σε ορισμένες εφαρμογές, όμως, όπως στη μετεωρολογία και στις φυσικές καταστροφές (πλημμύρες, πυρκαγιές κ.α.), στις οποίες παρακολουθούνται δυναμικά φαινόμενα με γρήγορη εξέλιξη στο χρόνο, η παράμετρος της χρονικής διακριτικής ικανότητας είναι σημαντική, πολλές φορές περισσότερο και από οποιαδήποτε άλλη παράμετρο.

### 1.6.3 Δορυφορικά ραντάρ

#### α. Τρόπος λειτουργίας των ραντάρ

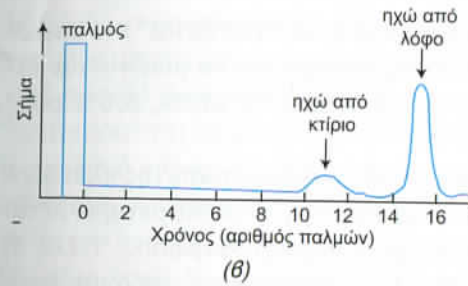
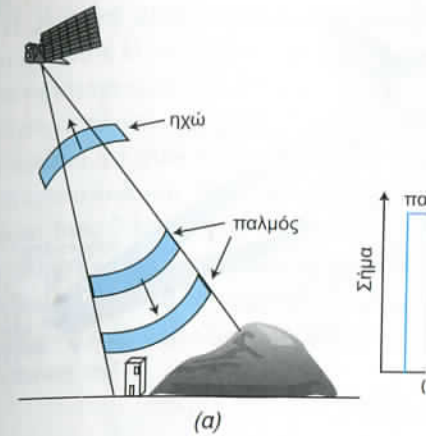
Τα συστήματα *ραντάρ (Radio Detection And Ranging, RADAR)* αποτελούν ενεργητικά συστήματα τα οποία εκπέμπουν ακτινοβολία μικροκυμάτων σε συγκεκριμένη συχνότητα προς την επιφάνεια της γης, και καταγράφουν την οπισθοσκεδασμένη ακτινοβολία, δηλ. το ποσό της ακτινοβολίας που επιστρέφει στον αισθητήρα λόγω ανάκλασης στις διάφορες επιφάνειες. Τα χαρακτηριστικά του οπισθο-



Εικόνα 1.35. Ψηφιακή εικόνα 2, 4 και 8-bit.

σκεδαζόμενου σήματος που καταγράφει το ραντάρ έχουν τροποποιηθεί κατά τη διεργασία της ανάκλασης στην επιφάνεια της γης και φέρουν έτσι πληροφορία για τα γεωμετρικά και διηλεκτρικά χαρακτηριστικά της.

Το σύστημα ραντάρ αποτελείται από ένα πομποδέκτη. Ο πομπός εκπέμπει παλμούς μικροκυματικής ακτινοβολίας σε κανονικά διαστήματα, οι οποίοι εστιάζονται από την κεραία του σε μια δέσμη ακτινοβολίας που καλείται *σήμα του ραντάρ* (radar beam) και κατευθύνεται με πλάγια διεύθυνση προς τα κάτω (Εικόνα 1.36). Το σήμα του ραντάρ εκπέμπεται δεξιά της κίνησης του δορυφόρου και προσπίπτει υπό γωνία στην επιφάνεια της γης. Τα αντικείμενα στο έδαφος ανακλούν τη μικροκυματική ακτινοβολία σύμφωνα με τα γεωμετρικά και διηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους και ο δέκτης του ραντάρ καταγράφει το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα (*ηχώ*).



Εικόνα 1.36. (α) Τρόπος λειτουργίας ενός ραντάρ. (β) Διάγραμμα ενέργειας σήματος-χρόνου στο οποίο φαίνεται η ηχώ από τους δυο στόχους στην επιφάνεια της γης.

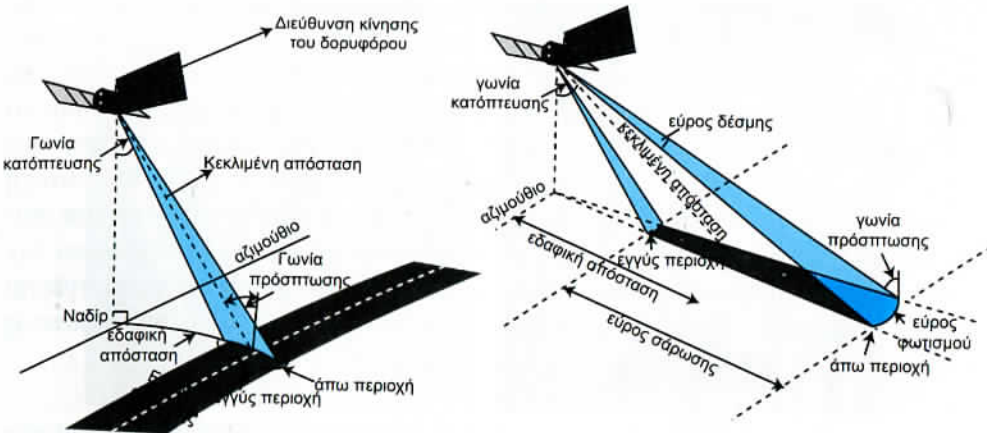
ση κίνηση της πλατφόρμας. Ο κάθετος άξονας στη διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου καλείται *εύρος* (range) ενώ ο παράλληλος σε αυτή άξονας ονομάζεται *αζιμούθιο* (azimuth). Το τμήμα της εικόνας που βρίσκεται κοντά στο ναδίρ ονομάζεται *εγγύς περιοχή* (near range) ενώ το πιο απομακρυσμένο τμήμα καλείται *άπω περιοχή* (far range).

Η *γωνία πρόσπτωσης* (incidence angle) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της δέσμης της μικροκυματικής ακτινοβολίας και μιας διεύθυνσης κάθετης στο έδαφος και η οποία αυξάνεται από την εγγύς περιοχή προς την άπω περιοχή ενώ η *γωνία κατόπτρευσης* (look angle) είναι η γωνία με την οποία βλέπει το ραντάρ τη γήινη επιφάνεια (Εικόνα 1.37). *Εύρος φωτισμού* (illumination range) είναι το γωνιακό εύρος της δέσμης που αντιστοιχεί σε μέτρα στο έδαφος. Λόγω του μεγάλου ύψους τροχιάς των δορυφορικών ραντάρ, οι γωνίες πρόσπτωσης των δεσμών ακτινοβολίας που εκπέμπουν είναι πολύ μικρές ( $5^\circ$  έως  $25^\circ$ ). Το

Μετρώντας το χρόνο επιστροφής του παλμού μετά την ανάκλασή του στους διάφορους στόχους, μπορεί να καθοριστεί η απόστασή τους από το ραντάρ και κατά συνέπεια η θέση τους στο χώρο (Εικόνα 1.36). Με συνεχή καταγραφή και επεξεργασία του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος κατά την κίνηση του δορυφόρου, συντίθεται μια δισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας της γης.

### β. Γεωμετρία εικονοληψίας των συστημάτων ραντάρ

Στα δορυφορικά ραντάρ η δέσμη ακτινοβολίας μικροκυμάτων εκπέμπεται υπό γωνία δεξιά της κίνησης του δορυφόρου (Εικόνα 1.37), σαρώνοντας μια ζώνη συγκεκριμένου πλάτους στην επιφάνεια της γης η οποία βρίσκεται εκτός του ίχνους του δορυφόρου που καλείται *ναδίρ* (nadir). Οι διευθύνσεις του *εύρους σάρωσης* (swath range) και του *αζιμούθιου* (azimuth) αναφέρονται σε εγκάρσια (across track dimension) και παράλληλη (along track dimension) αντίστοιχα διεύθυνση ως προς τη διεύθυνση



Εικόνα 1.37. Χαρακτηριστικά της εικονοληψίας από δορυφορικό ραντάρ.

γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η περιοχή σάρωσης να “φωτίζεται” πιο ομοιόμορφα από ότι στα ραντάρ που φέρονται από αεροσκάφη και να μειώνονται παράλληλα οι γεωμετρικές παραμορφώσεις της εικόνας κατά μήκος του εύρους σάρωσης.

Η *κεκλιμένη απόσταση* (*slant range distance*) είναι η απόσταση της πλατφόρμας από το αντικείμενο-στόχο στην επιφάνεια της γης, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του αντικείμενου μέσα στην περιοχή σάρωσης. Τέλος, η *εδαφική απόσταση* (*ground range distance*) είναι η πραγματική οριζόντια απόσταση κατά μήκος του εδάφους μεταξύ του ίχνους του δορυφόρου (ναδύρ) και το αντικείμενο-στόχο και η οποία επίσης μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του αντικείμενου μέσα στην περιοχή σάρωσης.

### γ. Χωρική διακριτική ικανότητα

Η χωρική διακριτική ικανότητα ενός συστήματος ραντάρ είναι συνάρτηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων της μικροκυματικής ακτινοβολίας και της γεωμετρίας εικονοληψίας. Η μικροκυματική ακτινοβολία εκπέμπεται με παλμούς από το ραντάρ κατά τη διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης. Το διάστημα που διανύει το σήμα του ραντάρ κατά τη χρονική διάρκεια ενός παλμού ονομάζεται *μήκος παλμού* (*pulse length*). Η χωρική διακριτική ικανότητα του ραντάρ εξαρτάται από το μήκος παλμού στη διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης, δηλ. εγκάρσια στη διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου, και από το εύρος “φωτισμού” της επιφάνειας από τη δέσμη μικροκυμάτων στη διεύθυνση του αζιμούθιου, δηλ. στη διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου. Κατά συνέπεια, ορίζονται δυο χωρικές διακριτικές ικανότητες, της *απόστασης* (*range or across-track resolution*) και του *αζιμούθιου* (*azimuth or along-track resolution*), οι οποίες αναφέρονται σε κάθετη και παράλληλη αντίστοιχα διεύθυνση ως προς τη διεύθυνση κίνηση του δορυφόρου.

Η *χωρική διακριτική ικανότητα της απόστασης* καθορίζεται από το μήκος του παλμού. Η διάκριση δυο αντικειμένων-στόχων σε διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου είναι δυνατή όταν τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματά τους φτάσουν στο δορυφόρο σε διαφορετικούς χρόνους. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει τα δυο αντικείμενα να απέχουν απόσταση μεγαλύτερη από το μισό μήκος του παλμού. Έτσι, στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.38α, οι στόχοι 1 και 2 δεν θα είναι διακριτοί σε αντίθεση με τους στόχους 3 και 4. Εναλλακτικά, εκφράζοντας μαθηματικά την προηγούμενη πρόταση, για τον διαχωρισμό δύο αντικειμένων στο έδαφος τα οποία απέχουν απόσταση  $R$ , θα πρέπει η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία από αυτά να είναι τέτοια ώστε να πληρείται η επόμενη συνθήκη:

$$R > \tau c / 2 \quad (1.39)$$

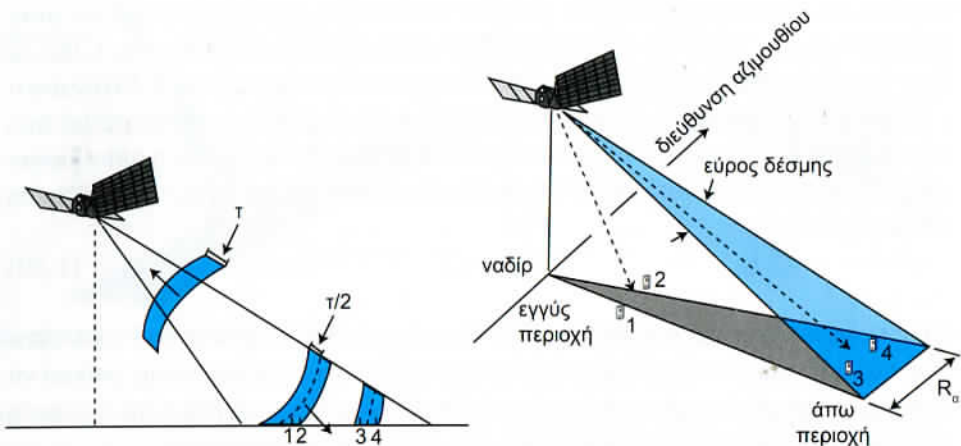
όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός και  $\tau$  είναι η χρονική διάρκεια του εκπεμπόμενου παλμού του ραντάρ. Η χωρική διακριτική ικανότητα απόστασης μπορεί να βελτιωθεί αν μειωθεί το μήκος του παλμού, λαμβάνοντας όμως υπόψη ότι η μείωση αυτή δεν μπορεί να είναι απεριόριστη λόγω τεχνικών περιορισμών.

Η *χωρική διακριτική ικανότητα του αζιμούθιου* καθορίζεται από το εύρος “φωτισμού” της επιφάνειας από τη δέσμη μικροκυμάτων το οποίο εξαρτάται από το γωνιακό εύρος της δέσμης μικροκυματικής ακτινοβολίας και την κεκλιμένη απόσταση. Καθώς η δέσμη σαρώνει σε μεγαλύτερες εδαφικές αποστάσεις από το ναδύρ του δορυφόρου, η χωρική διακριτική ικανότητα του ραντάρ μικραίνει. Για το διαχωρισμό δυο στόχων με το ραντάρ πρέπει αυτοί να έχουν απόσταση, σε διεύθυνση παράλληλη με αυτήν της τροχιάς του δορυφόρου, μεγαλύτερη από το εύρος “φωτισμού” της δέσμης στο έδαφος. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.38β, οι στόχοι 1 και 2 στην εγγύς περιοχή θα είναι διακριτοί σε αντίθεση με τους στόχους 3 και 4 που βρίσκονται στην άπω περιοχή, όπου  $R_a$  είναι η χωρική ανάλυση στο αζιμούθιο. Πιο αναλυτικά, τα σημεία 1, 2, 3, 4 αποτελούν στόχους στο έδαφος και οι αποστάσεις (1-2) και (3-4) είναι ίσες. Οι στόχοι 3 και 4 βρίσκονται εντός του εύρους “φωτισμού” της δέσμης με αποτέλεσμα η οπισθοσκεδαζόμενη από αυτά ακτινοβολία να ληφθεί την ίδια χρονική στιγμή και τελικά να καταγραφούν σαν ένα αντικείμενο στην εικόνα. Αντίθετα, οι στόχοι 1 και 2 θα καταγραφούν από το radar ως ξεχωριστά αντικείμενα (CCRS/CSA, 1998).

Το εύρος της δέσμης μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος της κεραίας (*aperture*) του ραντάρ με αποτέλεσμα όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία τόσο μικρότερο θα είναι το εύρος της δέσμης και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η χωρική διακριτική ικανότητα στο αζιμούθιο. Το μήκος της κεραίας υπόκειται σε τεχνικούς περιορισμούς και δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 15m στους δορυφόρους.

δ. Είδη ραντάρ

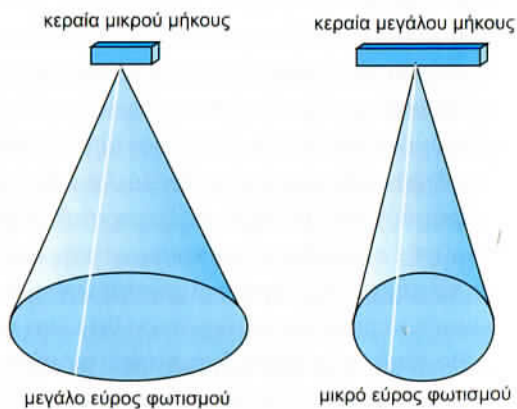
Στη δορυφορική τηλεπισκόπηση χρησιμοποιούνται δύο είδη radar: τα **radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας (Real Aperture Radar, RAR)** και τα πιο σύγχρονα, που είναι **συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radar, SAR)**.



Εικόνα 1.38. Χωρική ανάλυση ραντάρ (α) σε απόσταση και (β) σε αξιμούθιο.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το εύρος της δέσμης μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος της κεραίας (aperture) του ραντάρ με αποτέλεσμα όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία τόσο μικρότερο είναι το εύρος της δέσμης και τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρική διακριτική ικανότητα του ραντάρ στο αξιμούθιο (Εικόνα 1.39). Έτσι, μία κεραία μεγάλου μήκους, όπως αυτή των RAR, έχει μικρό εύρος φωτισμού και συνεπώς μεγάλη χωρική διακριτική ικανότητα.

Η μεταφορά και λειτουργία μεγάλων κεραιών όμως, ειδικά στα δορυφορικά ραντάρ RAR, αποτελεί τροχοπέδη στην χρησιμοποίησή τους για την μελέτη μικρών επιφανειών. Το πρόβλημα της μεταφοράς και λειτουργίας μεγάλων κεραιών στα δορυφορικά συστήματα ξεπεράστηκε από τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR). Το SAR μπορεί και 'συνθέτει' μία 'εικονική' κεραία πολύ μεγάλου μήκους σε σχέση με το πραγματικό ραντάρ, αξιοποιώντας την κίνηση της πλατφόρμας και το φαινόμενο Doppler (μετατόπιση

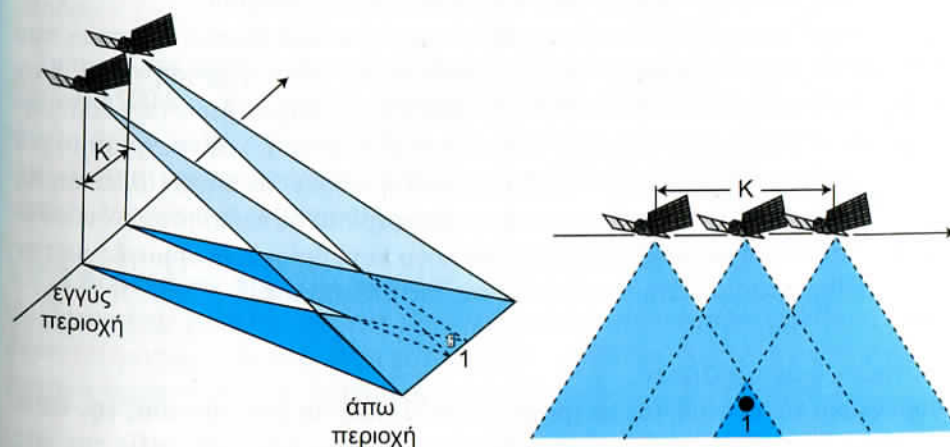


Εικόνα 1.39. Η σχέση του μήκους κεραίας του ραντάρ με το εύρος φωτισμού

του μήκους κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαιτίας της σχετικής κίνησης του παρατηρητή και της πηγής ενέργειας) και χρησιμοποιώντας ειδικές διαδικασίες καταγραφής και επεξεργασίας του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μία κεραία φυσικού μήκους 10m είναι δυνατό να προσομοιώσει τη λειτουργία μιας κεραίας μήκους 600m.

Η πραγματική κεραία στο SAR εκπέμπει σήματα μεγάλου γωνιακού εύρους κατά την εγκάρσια διεύθυνση της τροχιάς, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Λόγω του μεγάλου γωνιακού εύρους της εκπεμπόμενης δέσμης ακτινοβολίας, οι στόχοι στο έδαφος μετακινούνται εντός του πεδίου φωτισμού κατά τη διάρκεια της καταγραφής τους και τελικά κάποια στιγμή εξέρχονται από αυτή. Μόλις ο στόχος 1 εισέρθει στη δέσμη ακτινοβολίας, αρχίζει η καταγραφή του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος (Εικόνα 1.40). Καθώς η πλατφόρμα συνεχίζει να κινείται, όλα τα οπισθοσκεδαζόμενα από το στόχο σήματα συνεχίζουν να καταγράφονται από το ραντάρ, όσο ο στόχος βρίσκεται μέσα στη δέσμη ακτινοβολίας. Το σημείο στο οποίο ο στόχος εγκαταλείπει το εύρος φωτισμού της δέσμης, καθορίζει το μήκος της προσομοιωμένης σύνθετης κεραίας (K). Οι στόχοι που βρίσκονται στην άπω περιοχή, όπου το εύρος της δέσμης είναι το μέγιστο, εκτίθενται στη δέσμη της ακτινοβολίας του ραντάρ για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι οι στόχοι που βρίσκονται στην εγγύς περιοχή. Η χρονική διάρκεια έκθεσης στη δέσμη ακτινοβολίας όμως είναι ανάλογη του εύρους φωτισμού στο έδαφος και έτσι η χωρική διακριτική ικανότητα απόστασης παραμένει σταθερή σε κάθε σημείο της περιοχής σάρωσης.

Τα εύρη συχνοτήτων στα οποία λειτουργούν τα διάφορα ραντάρ παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.5.



Εικόνα 1.40. Τρόπος εικονοληψίας από ένα σύστημα ραντάρ τύπου SAR, όπου (K) το μήκος της προσομοιωμένης σύνθετης κεραίας.

Πίνακας 1.5. Εύρη συχνοτήτων λειτουργίας των ραντάρ.

Ονομασία εύρους συχνοτήτων	Περιοχή συχνοτήτων GHz	Αντίστοιχες περιοχές μηκών κύματος (cm)
C	4 - 8	3.8 - 7.5
S	2 - 4	7.5 - 15
L	1 - 2	15 - 30
P	0.3 - 1	30 - 100
Ka	26.5 - 40	0.75 - 1.1
K	18 - 25.5	1.1 - 1.67
Ku	12.5 - 18	1.7 - 2.4
X	8 - 12.5	2.4 - 3.8

Πέραν των ραντάρ τύπου SAR και RAR, υπάρχουν και άλλα δορυφορικά ενεργητικά συστήματα σχεδιασμένα για εξειδικευμένες εφαρμογές, μερικά από τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

**Αλτιμέτρο (Radar Altimeter):** Καταγράφει την οπισθοσκεδαζόμενη μικροκυματική ακτινοβολία που το ίδιο το όργανο στέλνει σε μία επιφάνεια. Το όργανο αυτό χρησιμοποιείται για μετρήσεις του ανάγλυφου των επιφανειών με βάση την χρονική υστέρηση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος που καταγράφεται.

**Σκεδασίμετρο ανέμων (Wind Scatterometer):** Ενεργητικό σύστημα που υπολογίζει ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου πάνω από τους ωκεανούς. Πιο συγκεκριμένα, το εκπεμπόμενο από το ραντάρ σήμα οπισθοσκεδαάζεται ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας των ωκεανών. Η τραχύτητα της επιφάνειας 'μεταφράζεται' στη συνέχεια σε ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι από τα δορυφορικά σύστημα που φέρουν ραντάρ πολύ χρήσιμη - και γι αυτό συχνή - είναι η χρήση των C (π.χ δορυφορικά συστήματα ERS και RADARSAT) και L συχνοτήτων (π.χ δορυφορικό σύστημα JERS). Η C περιοχή συχνοτήτων (Πίνακας 1.5) είναι χρήσιμη για μελέτες που αφορούν τους ωκεανούς, τα χαρακτηριστικά των πάγων αλλά και τις γήινες επιφάνειες. Η L περιοχή συχνοτήτων αναφέρεται σε περισσότερο διεισδυτική μικροκυματική ακτινοβολία και για το λόγο αυτό βρίσκει εφαρμογές για την παρακολούθηση και μελέτη των δασών και της βλάστησης.

## 1.7 Είδη δορυφόρων

Οι δορυφόροι τοποθετούνται σε τροχιές κατάλληλες για τους σκοπούς της κάθε αποστολής. Για λόγους απλοποίησης θεωρούμε ότι το βαρυτικό πεδίο της γης είναι σφαιρικό, αν και στην πραγματικότητα το πεδίο αυτό παραμορφώνεται λόγω του πεπλατυσμένου σχήματος της γης και εν μέρει λόγω της βαρύτητας της σελήνης, του ήλιου, των παλιρροιών, του ηλιακού ανέμου και άλλων παραγόντων.

Σε ένα ομαλό και σφαιρικό βαρυτικό πεδίο, η τροχιά του δορυφόρου είναι ελλειπτική, με το κέντρο της γης στη μια εστία, και χαρακτηρίζεται από (Εικόνα 1.41):

- το *απόγειο* (*apogee*), το πιο απομακρυσμένο από τη γη σημείο της τροχιάς,
- το *περίγειο* (*perigee*), το πλησιέστερο στη γη σημείο της τροχιάς,

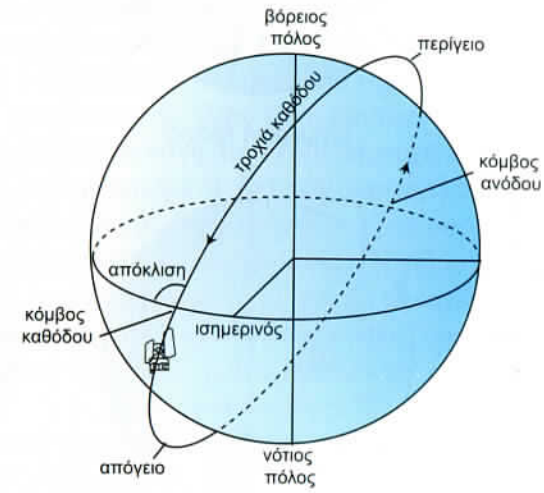
- την *τροχιά ανόδου*, το τμήμα της τροχιάς όπου δορυφόρος κινείται από το νότο προς το βορρά,

- την *τροχιά καθόδου*, το τμήμα της τροχιάς όπου δορυφόρος κινείται από το βορρά προς το νότο,

- τον *κόμβο ανόδου* (*ascending node*), το σημείο όπου η τροχιά ανόδου του δορυφόρου τέμνει τον ισημερινό,

- τον *κόμβο καθόδου* (*descending node*), το σημείο όπου η τροχιά καθόδου του δορυφόρου τέμνει τον ισημερινό,

- την *απόκλιση* (*inclination*), η γωνία που σχηματίζει η τροχιά του δορυφόρου με τον ισημερινό στον κόμβο καθόδου.



Εικόνα 1.41. Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς των δορυφόρων.

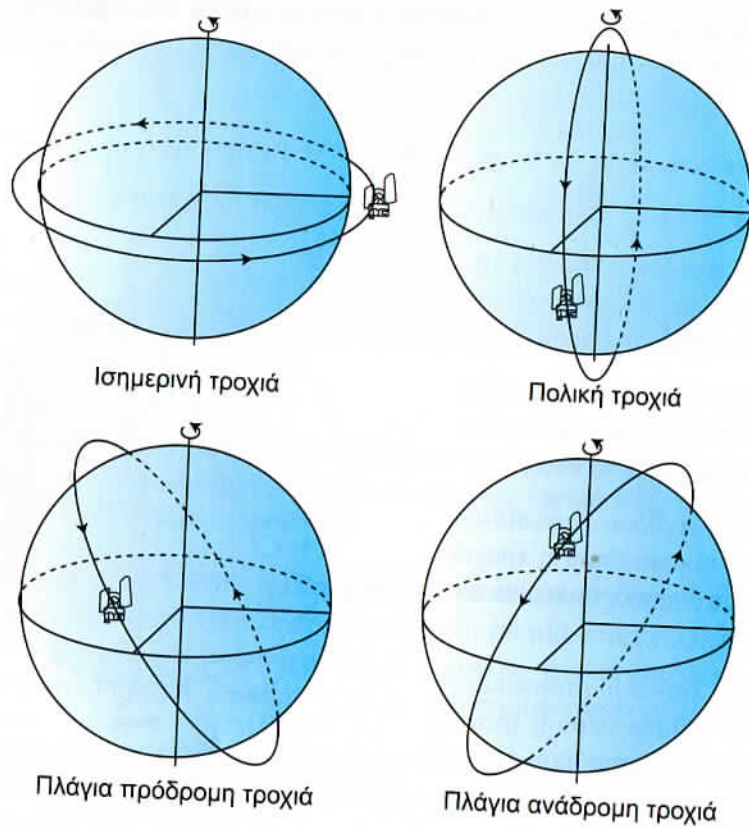
Το ύψος της τροχιάς που τίθενται οι δορυφόροι κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 800 και 1500 km. Υπάρχουν όμως και δορυφόροι που η τροχιά τους βρίσκεται σε πολύ μεγάλο ύψος, περίπου 36000 km. Οι δορυφόροι της πρώτης κατηγορίας ονομάζονται *δορυφόροι χαμηλής τροχιάς* και της δεύτερης κατηγορίας καλούνται *υψηλής τροχιάς ή γεωστάσιμοι*.

### 1.7.1 Δορυφόροι χαμηλής τροχιάς

Οι *δορυφόροι χαμηλής τροχιάς* (*low-level earth observation satellites, LEOs*) περιστρέφονται γύρω από τη γη σε ύψος 800 - 1500 km. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τροχιάς τους διακρίνονται σε (Campbell, 2002)(Εικόνα 1.42):

- Ισημερινής τροχιάς** (*equatorial-orbiting satellites*), των οποίων η τροχιά βρίσκεται μέσα στο ισημερινό επίπεδο.

- Πολικής τροχιάς** (*equatorial-orbiting satellites*), των οποίων η τροχιά βρί-



**Εικόνα 1.42.** Δορυφόροι χαμηλής τροχιάς σε ισημερινή, πολική, πλάγια πρόδρομη και πλάγια ανάδρομη τροχιά.

σκειται στο επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα της γης, δηλ. η απόκλιση της τροχιάς τους είναι  $90^\circ$ . Οι δορυφόροι αυτοί κινούνται από τον έναν πόλο της γης στον άλλο. Κάθε διαδοχική τροχιά διασχίζει τον ισημερινό σε διαφορετική ηλιακή ώρα. Η τροχιά αυτού του είδους είναι σπάνια και επιλέγεται για αποστολές των οποίων ο σκοπός είναι η παρατήρηση μεσημβρινών ζωνών σε όλες τις δυνατές συνθήκες φωτισμού.

**γ. Πλάγιας ή σχεδόν πολικής τροχιάς (oblique-orbiting or near-polar orbit satellites),** των οποίων η απόκλιση της τροχιάς είναι διαφορετική των  $90^\circ$ . Οι περισσότεροι δορυφόροι που βρίσκονται σε τροχιά ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Οι δορυφόροι πλάγιας τροχιάς είναι δυνατόν να κινούνται σε ανατολική κατεύθυνση, δηλ. να περιστρέφονται στην ίδια κατεύθυνση με αυτή της γης, οπότε η τροχιά τους ονομάζεται *πρόδρομη (prograde orbit)*, είτε να κινού-

νται σε δυτική κατεύθυνση οπότε λέγεται ότι βρίσκονται σε *ανάδρομη τροχιά (retrograde orbit)*. Επειδή η γη δεν αποτελεί μια τέλεια σφαίρα, ασκεί μια γυροσκοπική επίδραση στους δορυφόρους πλάγιας τροχιάς τέτοια ώστε όσοι βρίσκονται σε πρόδρομη τροχιά να οπισθοδρομούν δηλ. η τροχιά τους να στρέφεται σταδιακά προς τα δυτικά, ενώ αντίθετα οι δορυφόροι ανάδρομης τροχιάς να εμπροσθοδρομούν δηλ. η τροχιά τους να στρέφεται σταδιακά προς τα ανατολικά.

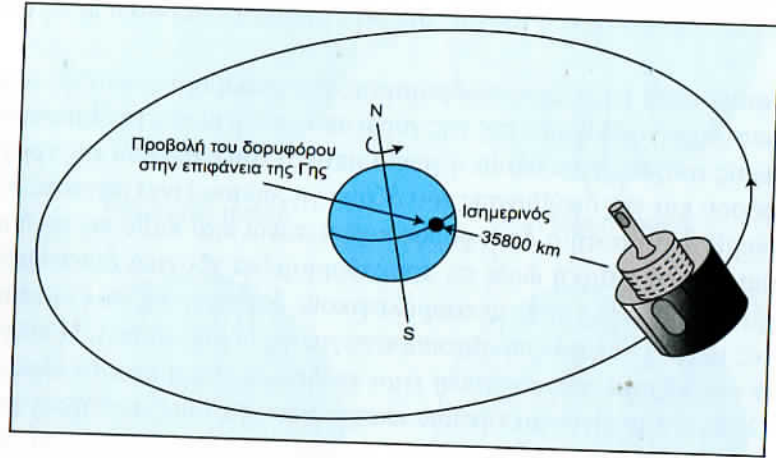
Το φαινόμενο της εμπροσθοδρόμησης της ανάδρομης τροχιάς μπορεί να συνδυαστεί με την κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο για τη δημιουργία μιας ιδιαίτερης τροχιάς στην οποία η γωνία μεταξύ του επιπέδου της τροχιάς του δορυφόρου και της διεύθυνσης του άξονα γης-ήλιου είναι πάντοτε σταθερή. Στην περίπτωση αυτή ο δορυφόρος περνά πάνω από κάθε περιοχή πάντοτε την ίδια τοπική ηλιακή ώρα, σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (δύο φορές την ημέρα για τους μετεωρολογικούς δορυφόρους και μια φορά ανά αρκετές ημέρες για τους πλουτοπαραγωγικούς δορυφόρους). Η ειδική αυτή τροχιά ονομάζεται *ηλιοσύγχρονη (sun-synchronous)* και έχει το πλεονέκτημα ότι οι λήψεις που γίνονται την ίδια εποχή έχουν τις ίδιες συνθήκες φωτισμού δηλ. την ίδια ηλιακή γωνία σε όλες τις περιοχές που βρίσκονται στην ίδια παράλληλο.

Μια πολύ χρήσιμη ηλιοσύγχρονη τροχιά είναι αυτή με απόκλιση  $99.1^\circ$  και ύψος 1100 km. Η τροχιά αυτή ολοκληρώνεται κάθε 100 λεπτά της ώρας, το οποίο σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου πραγματοποιούνται 14.5 τροχιές, οι οποίες σε συνδυασμό με το μεγάλο στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης καλύπτουν πλήρως γεωγραφικά το σύνολο της επιφάνειας της γης, ακόμη και στις ισημερινές περιοχές.

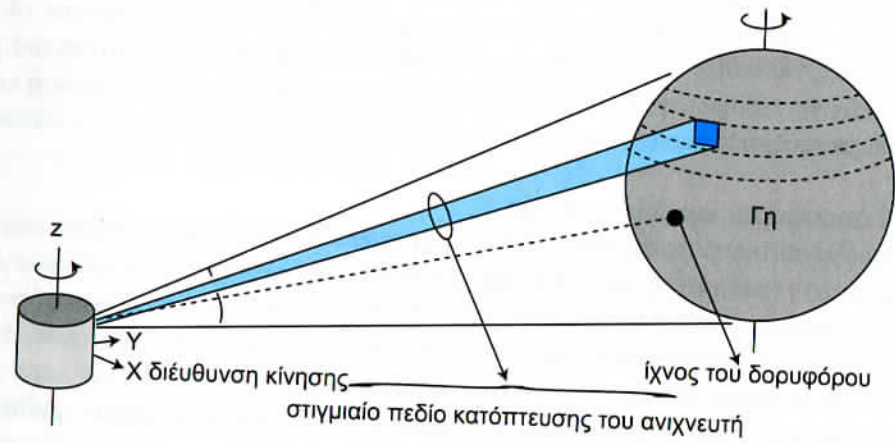
### 1.7.2 Δορυφόροι υψηλής τροχιάς

Οι *δορυφόροι υψηλής τροχιάς (high-level earth observation satellites)* περιστρέφονται γύρω από τη γη, στο επίπεδο του ισημερινού της γης, σε πολύ μεγάλο ύψος, περίπου 36000 km (Εικόνα 1.43). Η τροχιά αυτή έχει την ιδιαιτερότητα ο δορυφόρος να κινείται με γωνιακή ταχύτητα ίση με αυτή της γης. Με τον τρόπο αυτό, ο δορυφόρος βρίσκεται στάσιμος πάνω από μια περιοχή της γης, και για αυτό το λόγο ονομάζεται *γεωστάσιμος (geostationary earth observation satellites, GEOs)*. Επιτυγχάνεται έτσι συνεχής κατόπτευση του γήινου δίσκου με πολύ μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα, η οποία εξαρτάται μόνο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σαρωτή. Το πολύ μεγάλο όμως ύψος τροχιάς των γεωστάσιμων δορυφόρων περιορίζει σημαντικά τη χωρική διακριτική ικανότητα των αισθητήρων που αυτοί φέρουν (Εικόνα 1.44). Οι γεωστάσιμοι δορυφόροι χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε μετεωρολογικές εφαρμογές καθώς για την παρακολούθηση της εξέλιξης των μετεωρολογικών φαινομένων δεν απαιτείται ιδιαίτερα υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα αλλά αντίθετα υψηλή χρονική διακρι-

τική ικανότητα της τάξης των λίγων λεπτών. Γεωστάσιμοι δορυφόροι αποτελούν ο Meteosat (Meteorological Satellite) της EUMETSAT, ο GOES των ΗΠΑ και ο γιαπωνέζικος GMS (Geostationary Meteorological Satellites).



Εικόνα 1.43. Θέση και τροχιά του γεωστάσιμου δορυφόρου Meteosat-7.



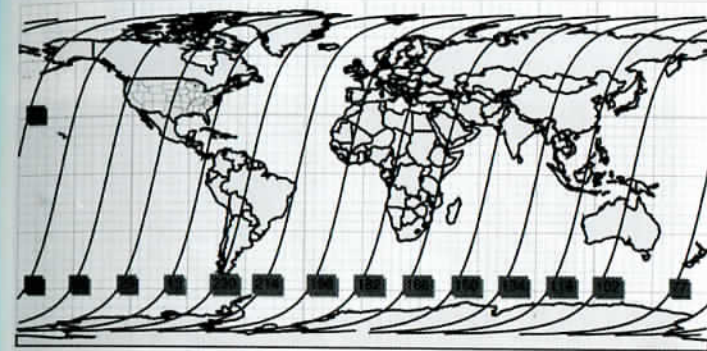
Εικόνα 1.44. Στιγμιαίο πεδίο κατόπτρευσης (IFOV) και ίχνος ενός γεωστάσιμου δορυφόρου.

### 1.7.3 Περιγραφή δορυφόρων

Ακολουθεί η περιγραφή ορισμένων βασικών δορυφορικών συστημάτων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά στην μελέτη του χερσαίου, ατμοσφαιρικού και θαλάσσιου περιβάλλοντος.

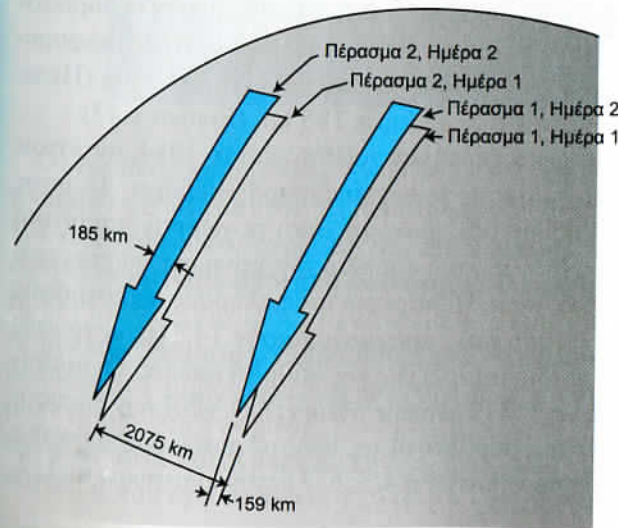
### α. Οι δορυφόροι LANDSAT

Ο πρώτος δορυφόρος της σειράς **Landsat (Land Satellite)** με το όνομα ERST-1 (Earth Resource Technology Satellite), εκτοξεύθηκε το 1972 με σκοπό την απόκτηση πληροφοριών για τις πλουτοπαραγωγικές πηγές της γης. Ακολούθησε ο ERST-2 το 1975, ο οποίος μετονομάστηκε σε Landsat-2 για να διαχωρίζεται από τον ωκεανογραφικό δορυφόρο Seasat, και ο Landsat-3 το 1978. Οι εφαρμογές των δορυφόρων της σειράς Landsat επικεντρώνονται στις πλουτοπαραγωγικές πηγές του πλανήτη μας σε τομείς όπως γεωλογία, μετρήσεις βιομάζας, χαρτογράφηση δασών, χρήσεων γης, εδαφοκάλυψης, περιβαλλοντικών αλλαγών, παράκτιων περιοχών κ.α.



Εικόνα 1.45. Τα περάσματα του δορυφόρου Landsat.

Οι δορυφόροι Landsat-1, 2 και 3 είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά στη λειτουργία τους και ονομάστηκαν δορυφόροι πρώτης γενιάς. Τέθηκαν σε ηλιοσύγχρονη, σχεδόν πολική τροχιά (απόκλιση 99°) ύψους 900 km και με χρόνο περιστροφής γύρω από τη γη 103 min, δηλ. εκτελούσαν 14 περιστροφές την ημέρα (Εικόνα 1.45). Η διεύθυνση σάρωσης γινόταν από βόρρα προς νότο καλύπτοντας ολό-



Εικόνα 1.46. Σταδιακή αύξηση της κάλυψης από το Landsat-1, 2 και 3. Διαδοχικά περάσματα απέχουν 2875 km στον ισημερινό λόγω της περιστροφής της γης. Την επόμενη ημέρα, μετά από 14 τροχιές, ο δορυφόρος περνάει 150 km δυτικότερα σε σχέση με το πρώτο πέρασμα, κατά μήκος του ισημερινού.



κληρη την επιφάνεια της γης ( $82^{\circ}\text{B} - 83^{\circ}\text{N}$ ), εκτός από τους πόλους, σε 18 ημέρες. Το εύρος της ζώνης σάρωσης ήταν 185 km και σε κάθε περιστροφή ο δορυφόρος περνούσε 2875 km δυτικά από την προηγούμενη ζώνη σάρωσης στον ισημερινό λόγω της περιστροφής της γης (Εικόνα 1.46) με επικάλυψη που ήταν μέγιστη στους πόλους (έως και 70%) και ελάχιστη στον ισημερινό (περίπου 15%).

Ο βασικός αισθητήρας των δορυφόρων πρώτης γενιάς ήταν ο πολυφασματικός σαρωτής MSS (Multispectral Scanner Subsystem). Ο σαρωτής MSS κατέγραφε δεδομένα σε τέσσερα διαφορετικά φασματικά κανάλια, δυο στην περιοχή του ορατού και δυο στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου (Πίνακας 1.6). Στο όργανο MSS του Landsat-3 προστέθηκε και ένα πέμπτο κανάλι στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου το οποίο όμως υπολειτούργησε λόγω συνεχών βλαβών. Η χωρική διακριτική ικανότητα των τεσσάρων αυτών καναλιών ήταν 79m x 79m και η ραδιομετρική ανάλυση των τελικών εικόνων ήταν 6-bits (0-64). Τα τέσσερα κανάλια



**Εικόνα 1.47.**

Εικόνα Landsat TM (κανάλι 2) της ευρύτερης περιοχής του λεκανοπέδιου της Αθήνας

του MSS αριθμήθηκαν ως 4, 5, 6 και 7 γιατί οι τρεις πρώτοι αριθμοί αποδόθηκαν στις τρεις κάμερες RVB (Return Beam Vidicon Cameras) που έφεραν οι δορυφόροι, όμοιες με αυτές της τηλεόρασης, οι οποίες λάμβαναν δεδομένα σε διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από 0.48 έως 0.83  $\mu\text{m}$  (Πίνακας 1.6). Η τελική εικόνα είχε διαστάσεις 185 km x 185 km (Εικόνα 1.47).

Οι Landsat-4 και Landsat-5 που εκτοξεύτηκαν το 1982 και το 1984, αντίστοιχα, αποτελούν τους δορυφόρους δεύτερης γενιάς της σειράς Landsat. Το ύψος της τροχιάς τους μειώθηκε στα 705 km βελτιώνοντας έτσι τη χωρική διακριτική τους ικανότητα, ενώ παρέμεινε σχεδόν πολική και ηλιοσύγχρονη, περνώντας από τον ισημερινό στις 9:45 π.μ. τοπική ώρα. Η διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής γύρω από τη γη μειώθηκε στα 99 min δηλ. πραγματοποιούν 14.5 περιστροφές ανά ημέρα, περνώντας έτσι από το ίδιο σημείο της γης κάθε 16 ημέρες. Οι αισθητήρες που φέρουν είναι ο MSS και ο TM (Thematic Mapper). Ο MSS των δορυφόρων Landsat-4, και -5 είναι, για λόγους συμβατότητας, ίδιος με αυτόν των προηγούμενων δορυφόρων, μόνο που τα τέσσερα κανάλια 4, 5, 6, 7 μετονομάστηκαν σε 1, 2, 3, 4 (Πίνακας 1.6).

**Πίνακας 1.6.** Οι αισθητήρες των δορυφόρων Landsat.

Αισθητήρας	Κανάλια	Φασματική περιοχή	Μήκος κύματος	Χωρ. διακ. ικαν.
		Landsat-1 και 2		
RVB	1	πράσινο	0.475 – 0.575 $\mu\text{m}$	30m x 30m
RVB	2	κόκκινο	0.58 – 0.68 $\mu\text{m}$	30m x 30m
RVB	3	κοντινό υπέρυθρο	0.69 – 0.83 $\mu\text{m}$	30m x 30m
MSS	4	πράσινο	0.5 – 0.6 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	5	κόκκινο	0.6 – 0.7 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	6	κοντινό υπέρυθρο	0.7 – 0.8 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	7	κοντινό υπέρυθρο	0.8 – 1.1 $\mu\text{m}$	79m x 79m
		Landsat-3		
RVB	PAN	παγχρωματικό	0.5 – 0.75 $\mu\text{m}$	30m x 30m
MSS	4	πράσινο	0.5 – 0.6 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	5	κόκκινο	0.6 – 0.7 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	6	κοντινό υπέρυθρο	0.7 – 0.8 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	7	κοντινό υπέρυθρο	0.8 – 1.1 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	8	θερμικό υπέρυθρο	10.4 – 12.6 $\mu\text{m}$	234m x 234m
		Landsat-4 και 5		
TM	1	μπλε-πράσινο	0.45 – 0.52 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	2	πράσινο	0.52 – 0.60 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	3	κόκκινο	0.63 – 0.69 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	4	κοντινό υπέρυθρο	0.76 – 0.90 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	5	μέσο υπέρυθρο	1.55 – 1.75 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	6	θερμικό υπέρυθρο	10.40 – 12.50 $\mu\text{m}$	120m x 120m
TM	7	μέσο υπέρυθρο	2.08 – 2.35 $\mu\text{m}$	30m x 30m
MSS	4	πράσινο	0.5 – 0.6 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	5	κόκκινο	0.6 – 0.7 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	6	κοντινό υπέρυθρο	0.7 – 0.8 $\mu\text{m}$	79m x 79m
MSS	7	κοντινό υπέρυθρο	0.8 – 1.1 $\mu\text{m}$	79m x 79m
		Landsat-7		
TM	PAN	παγχρωματικό	0.52 – 0.90 $\mu\text{m}$	15m x 15m
TM	1	μπλε	0.45 – 0.52 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	2	πράσινο	0.52 – 0.60 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	3	κόκκινο	0.63 – 0.69 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	4	κοντινό υπέρυθρο	0.76 – 0.90 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	5	μέσο υπέρυθρο	1.55 – 1.75 $\mu\text{m}$	30m x 30m
TM	6	θερμικό υπέρυθρο	10.40 – 12.50 $\mu\text{m}$	60m x 60m
TM	7	μέσο υπέρυθρο	2.08 – 2.35 $\mu\text{m}$	30m x 30m

Ο θεματικός χαρτογράφος TM (Thematic Mapper) αποτελεί έναν πολυφασματικό γραμμικό σαρωτή σαν τον MSS, αλλά με σημαντικές βελτιώσεις. Οι αισθητήρες του TM καταγράφουν ακτινοβολία σε επτά κανάλια, γεγονός που του προσδίδει καλύτερη φασματική διακριτική ικανότητα. Τα κανάλια 1, 2 και 3 είναι στο ορατό τμήμα του φάσματος ενώ τα κανάλια 4, 5 και 7 είναι στο ανακλώμενο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Η προσθήκη του καναλιού 1 (μπλε) σε σχέση με το MSS, βοηθάει στη δημιουργία αληθών έγχρωμων εικόνων. Το κανάλι 6 είναι στο θερμικό τμήμα του φάσματος και χρησιμοποιείται για θερμική χαρτογράφηση. Τα κανάλια αυτά καταγράφουν την 'πληροφορία' με ανάλυση 30 m εκτός από το κανάλι 6 που έχει ανάλυση 120 m. Ο TM χρησιμοποιεί 16 ανιχνευτές για κάθε

κανάλι για την καταγραφή των δεδομένων, εκτός του θερμικού καναλιού που έχει 4 ανιχνευτές (σύνολο 100 ανιχνευτές), σε αντίθεση με το MSS που χρησιμοποιεί 6 ανιχνευτές ανά κανάλι (σύνολο 24 ανιχνευτές). Ένα άλλο βελτιωμένο χαρακτηριστικό του TM είναι η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα, καθώς η εικόνα του TM είναι 8-bits (0-255), η οποία αντιστοιχεί σε τετραπλάσια αύξηση της τιμής της κλίμακας του γκρι σε σχέση με τους 64 τόνους που αποδιδόταν οι εικόνες του MSS. Τέλος, βελτιώθηκε και η γεωμετρία λήψης με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότερες γεωμετρικές διορθώσεις στα δεδομένα του TM, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης των δεδομένων του σε μεγαλύτερες χωρικές κλίμακες. Τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές των φασματικών καναλιών του TM παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.7.

**Πίνακας 1.7.** Χαρακτηριστικά και εφαρμογές των καναλιών του Landsat TM.

Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Εφαρμογές
Κανάλι 1 (μπλε)	0.45 – 0.52 μm	Χρήσιμο για τη χαρτογράφηση των παράκτιων υδάτων, τη διάκριση εδάφους και βλάστησης, τη χαρτογράφηση δασικών τύπων και την ανίχνευση ανθρώπινων κατασκευών.
Κανάλι 3 (πράσινο)	0.52 – 0.60 μm	Αντιστοιχεί στη πράσινη ανάκλαση της υγιούς βλάστησης. Από τα πιο σημαντικά κανάλια για το διαχωρισμό της βλάστησης. Χρήσιμο επίσης για τον καθορισμό των ορίων εδαφών και για την αναγνώριση γεωλογικών μορφών και ανθρώπινων κατασκευών.
Κανάλι 3 (κόκκινο)	0.63 – 0.69 μm	Χρήσιμο για την διάκριση μεταξύ πολλών ειδών φυτών. Είναι επίσης χρήσιμο για τον καθορισμό ορίων εδαφών, αναγνώριση γεωλογικών μορφών και ανθρώπινων κατασκευών.
Κανάλι 4 (κοντινό υπέρυθρο)	0.76 – 0.90 μm	Ιδιαίτερα ευαίσθητο στο συνολικό ποσό της φυτικής βιομάζας που είναι παρούσα σε μία σκηνή. Επίσης χρησιμεύει στην αναγνώριση καλλιεργειών και τονίζει τις αντιθέσεις εδάφους/νερού και εδάφους καλλιεργειών.
Κανάλι 5 (μέσο υπέρυθρο)	1.55 – 1.75 μm	Ευαίσθητο στις ποσότητες νερού στα φυτά. Χρησιμεύει στις μελέτες ξηρασίας. Βοηθά επίσης στο διαχωρισμό νεφών, χιονιού και πάγου.
Κανάλι 6 (θερμικό υπέρυθρο)	10.40 – 12.50 μm	Χρήσιμο για τον εντοπισμό ασθενειών στη βλάστηση και τις καλλιέργειες και τον εντοπισμό της θερμικής ρύπανσης. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στον εντοπισμό γεωθερμικής δραστηριότητας.
Κανάλι 7 (μέσο υπέρυθρο)	2.08 – 2.35 μm	Σημαντικό για τη διάκριση των διαφόρων γεωλογικών τύπων εδαφών και την οριοθέτηση εδαφών, όπως επίσης στο περιεχόμενο υγρασίας του εδάφους και των φυτών.

Ο Landsat-6 απέτυχε να τεθεί σε τροχιά εξαιτίας κάποιας βλάβης. Ο τελευταίος δορυφόρος της σειράς, ο Landsat-7, εκτοξεύθηκε το 1999 και από τότε βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία δίνοντας βελτιωμένα δεδομένα σε σχέση με τους δορυφόρους της προηγούμενης γενιάς. Ο Landsat-7 κινείται σε ηλιοσύγχρονη τροχιά ύψους περίπου 705 km, απόκλισης 98° και περνά από τον ισημερινό στις 10 π.μ με κύκλο επαναληψιμότητας 16 ημερών. Βρίσκεται σε διαφορά φάσης 4 ημερών με τον Landsat-5, προσφέροντας έτσι δυνατότητα για πιο συχνή λήψη δεδομένων από την ίδια περιοχή. Μεταφέρει τον βελτιωμένο θεματικό χαρτογράφο ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus) οι αισθητήρες του οποίου καταγράφουν ακτινοβολία σε επτά κανάλια, όμοια με αυτά του TM του Landsat-5, με μόνη διαφορά τη βελτιωμένη χωρική διακριτική ικανότητα στο θερμικό κανάλι 6 (60 m) (Πίνακας 1.6). Στο όργανο ETM+ έχει προστεθεί κι ένα παγχρωματικό (PAN) κανάλι (0.52-0.90 μm) με ανάλυση 15m. Οι εικόνες του καναλιού αυτού μπορούν να συγχωνευτούν με τις εικόνες των καναλιών 1 - 5 και 7 που έχουν ανάλυση 30m και να παραχθούν τελικά έγχρωμες εικόνες με βελτιωμένη ανάλυση 15m.

### β. Οι δορυφόροι SPOT

Οι δορυφόροι SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) λειτουργούν υπό την αιγίδα του Γαλλικού οργανισμού CNES (Centre National D' Etudes Spatiales). Ο πρώτος δορυφόρος του προγράμματος, ο SPOT-1, τέθηκε σε τροχιά το 1986. Ο SPOT-2, με τα ίδια περίπου τεχνικά χαρακτηριστικά, εκτοξεύθηκε το 1990 σε τροχιά με διαφορά φάσης από τον SPOT-1 προσφέροντας έτσι δυνατότητα κάλυψης της ίδιας περιοχής κάθε 13 ημέρες. Το 1993 τέθηκε σε τροχιά ο τρίτος δορυφόρος του προγράμματος, ο SPOT-3, ο οποίος όμως τέθηκε εκτός λειτουργίας το 1996 λόγω τεχνικών προβλημάτων. Ο SPOT-4 εκτοξεύθηκε το 1998 ενώ ο τελευταίος της σειράς, ο SPOT-5, με αρκετά βελτιωμένα τεχνικά χαρακτηριστικά τέθηκε σε τροχιά το 2002. Μια νέα σειρά δορυφόρων SPOT -5 και -6 αναμένεται αν τεθούν σε τροχιά το 2012 και 2014, αντίστοιχα.

Η τροχιά όλων των δορυφόρων SPOT είναι σχεδόν πολική (στον SPOT -5 η γωνία κλίσης είναι 98.71) και ηλιοσύγχρονη (περνά από τον ισημερινό κάθε μέρα στις 10:30 π.μ) σε ύψος 832 km. Ο δορυφόρος σαρώνει ολόκληρη τη γη και περνάει πάνω από το ίδιο σημείο της γης, την ίδια ώρα, κάθε 26 ημέρες.

Φέρουν δυο πανομοιότυπους σαρωτές, τους HRV1 και 2 (High Resolution Visible) για τους δορυφόρους SPOT-1, 2 και 3, τους HRVIR1 και 2 για το δορυφόρο SPOT-4, και τους HRG1 και 2 για τον SPOT-5, με εύρος σάρωσης 60 km ο καθένας και επικάλυψη των ζωνών ίση με 3 km (Εικόνα 1.48α). Έτσι, το συνολικό εύρος της ζώνης σάρωσης από τους δυο σαρωτές είναι 117 km. Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων του προγράμματος SPOT παρατίθενται στον Πίνακα 1.8. Οι σαρωτές αυτοί μπορούν να λειτουργήσουν τόσο ως πολυφασματικοί (XS) όσο και ως παγχρωματικοί (PN) αισθητήρες.

Στην πολυφασματική λειτουργία (XS), οι σαρωτές των SPOT-1, 2 και 3 κατα-