

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ:

Καθ' ύψος κατανομή οπτικών ιδιοτήτων αιωρούμενων σωματιδίων – Ανάλυση ευαισθησίας κατά Klett

1| Συνοπτική Θεωρία

Το lidar είναι ακρωνύμιο του όρου « light detection and ranging» και πρόκειται για ένα όργανο ενεργής τηλεπισκόπησης με το οποίο μετράμε το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τα συστατικά της ατμόσφαιρας. Η τεχνική lidar βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού μονοχρωματικής ακτινοβολίας laser, στην μέτρηση της επανασκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας και στην καταγραφή του χρόνου που μεσολαβεί ανάμεσα στην εκπομπή και στη λήψη, η οποία αντιστοιχεί στην απόσταση των σκεδαστών από την πηγή laser. Με αυτό το τρόπο λαμβάνουμε την καθ' ύψους κατανομή των οπτικών ιδιοτήτων των συστατικών του ατμοσφαιρικού αέρα.

1.1 Αρχή λειτουργίας της διάταξης lidar

Η τεχνική της τηλεπισκόπησης με χρήση ακτινοβολίας laser, έχει καθιερωθεί διεθνώς ως μία αποτελεσματική και αξιόπιστη μέθοδος μελέτης και παρακολούθησης των βασικότερων χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας. Εξαιτίας της υψηλής χωρικής (της τάξης των 15-50 m) και χρονικής (της τάξης των 1-15 min) ακρίβειας των μετρήσεων η τεχνική lidar αποτελεί μία πανίσχυρη και πρωτοποριακή μέθοδο παρατήρησης της μεταβολής των σημαντικότερων μετεωρολογικών και ατμοσφαιρικών συστατικών καθ' ύψος, από την επιφάνεια του εδάφους έως τα 10-20 km, ανάλογα με την ένταση της πηγής laser. Υπάρχουν, λοιπόν διατάξεις που βασίζονται στη σκέδαση της ακτινοβολίας laser κατά Rayleigh, στη σκέδαση Mie, στη σκέδαση Raman, στη σκέδαση συντονισμού, στο φθορισμό, στην απορρόφηση καθώς και στη διαφορική σκέδαση – απορρόφηση. Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε ένα σύστημα τηλεπισκόπησης ελαστικής οπτιθοσκεδάσης στο ορατό (532 nm).

1.2 Συστήματα lidar

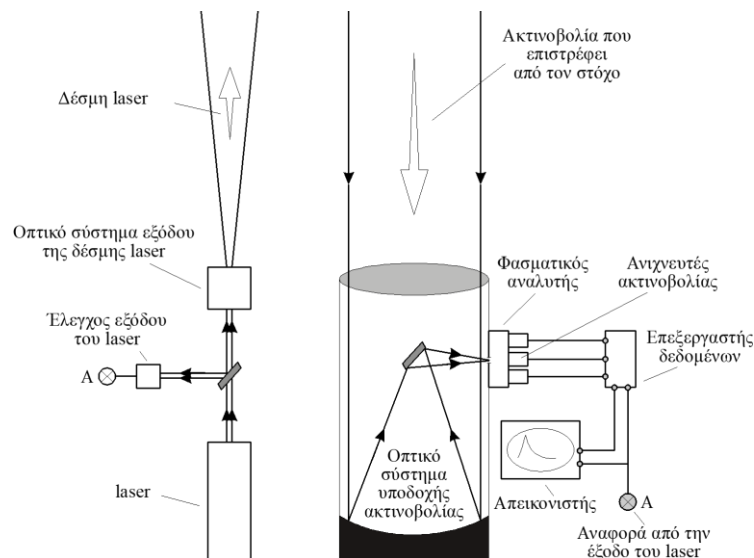
Τα συστήματα lidar βασίζονται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα και ακολούθως, στην καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser. Η ατμόσφαιρα αποτελούμενη από άτομα, μόρια, αιωρούμενα σωματίδια κλπ. προκαλεί εξασθένιση της διερχόμενης ακτινοβολίας laser. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από ένα οπτικό τηλεσκόπιο και οδηγείται στο σύστημα λήψης και καταγραφής των σημάτων lidar [Weitkamp, 2005]. Η τεχνική lidar, αναλύοντας τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση των συστατικών της ατμόσφαιρας με την ακτινοβολία laser, είναι ικανή να

καθορίσει την κατακόρυφη κατανομή των κυριότερων ρύπων και συστατικών της ατμόσφαιρας με μεγάλη χωρική ($\sim 15\text{-}50\text{ m}$) και χρονική ακρίβεια ($1\text{-}15\text{ min}$).

Συνεπώς ένα σύστημα lidar, στηριζόμενο σε μία από τις παραπάνω φυσικές διεργασίες αποτελείται από 5 βασικά υποσυστήματα:

- Έναν εκπομπό (παλμικό laser)
- Μια διάταξη οπτικών για την εκπομπή της δέσμης
- Ένα οπτικό σύστημα υποδοχής της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας
- Έναν ανιχνευτή
- Ένα ηλεκτρονικό σύστημα για την επεξεργασία, απεικόνιση και αποθήκευση των μετρήσεων.

Η βασική δομή ενός συστήματος lidar μπορεί να συνοψιστεί από την σχηματική απεικόνιση του Σχήματος 1.



Σχήμα 1: Τυπική διάταξη ενός συστήματος lidar.

Πιο συγκεκριμένα η χρησιμοποιούμενη παλμική πηγή laser, μετά από επεξεργασία κατευθύνεται με κάτοπτρα κατακόρυφα προς τον ουρανό. Στην πορεία του ο παλμός οπισθοσκεδάζεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ένα μέρος της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας συλλέγεται από το τηλεσκόπιο, διαχωρίζεται φασματικά, ενισχύεται και τέλος μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στον οπτικό αναλυτή. Μαζί με την καταγραφή του σήματος γίνεται και η ψηφιοποίηση του ως συνάρτηση του χρόνου. Με την εκπομπή νέου παλμού τελειώνει η καταγραφή του προηγούμενου. Η πληροφορία μεταφέρεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Θεωρώντας ότι η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή στον αέρα ($n=1.0003$) μπορούμε να μετατρέψουμε τον χρόνο σε ύψος. Μεταφέροντας το σήμα σε υπολογιστή είναι

εφικτή η μετατροπή έντασης ηλεκτρικού ρεύματος καθ' ύψος σε τιμές του συντελεστή οπισθοσκέδασης του ατμοσφαιρικού αέρα καθ' ύψος.

Συγκρίνουμε το σήμα της μέτρησης με το σήμα το οποίο θεωρητικά θα είχαμε σε μια καθαρή, μοριακή ατμόσφαιρα (μόνο άζωτο και οξυγόνο) και από τις διαφορές τους μπορούμε, σε πρώτη φάση να ανιχνεύσουμε ένα στρώμα σωματιδίων και να υπολογίσουμε το ύψος των νεφών. Η διάταξη η οποία περιεγράφηκε προϋποθέτει την εκπομπή ακτινοβολίας τουλάχιστον ενός μήκους κύματος και ονομάζεται lidar οπισθοσκέδασης. Χρησιμοποιώντας περισσότερα μήκη κύματος κατά την εκπομπή και την ανίχνευση μπορούν να μετρηθούν επιπλέον οπτικές ιδιότητες του ατμοσφαιρικού αέρα (αιωρούμενων σωματιδίων) όπως ο συντελεστής εξασθένησης ή ο εκθέτης Ångström καθώς και μεγέθη όπως η θερμοκρασία ή η υγρασία καθ' ύψος.

1.3 Εξίσωση lidar

Ο προσδιορισμός των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων βασίζεται στην επίλυση των δύο εξισώσεων lidar.

$$P(z, \lambda_0) = \frac{E_0 \eta_{\lambda_0}}{z^2} O(z, \lambda_0) \beta(z, \lambda_0) \exp[-2 \int_0^z a(\zeta, \lambda_0) d\zeta] \quad (1)$$

$$P(z, \lambda_{Ra}) = \frac{E_0 \eta_{\lambda_{Ra}}}{z^2} O(z, \lambda_{Ra}) \beta_{Ra}(z, \lambda_{Ra}) \exp\{-\int_0^z [a(\zeta, \lambda_0) + a(\zeta, \lambda_{Ra})] d\zeta\} \quad (2)$$

Η εξίσωση (1) περιγράφει το επιστρεφόμενο σήμα εξαιτίας της ελαστικής οπισθοσκέδασης από τα μόρια και τα σωματίδια του αέρα [Fernald et al., 1972]. Ο όρος $P(z, \lambda_0)$ είναι το σήμα εξαιτίας της σκέδασης Rayleigh και της σκέδασης από τα αιωρούμενα σωματίδια που λαμβάνεται από το ύψος z στο μήκος κύματος λ_0 . Ο όρος E_0 είναι η εκπεμπόμενη ισχύς του παλμού του laser. Ο όρος η_{λ_0} περιέχει παραμέτρους που αφορούν την διάταξη lidar και περιγράφει την αποδοτικότητα των οπτικών και ανιχνευτικών διατάξεων στα μήκη κύματος λ_0 και λ_{Ra} . Ο όρος $O(z, \lambda_0)$ περιγράφει την συνάρτηση αλληλεπικάλυψης της εξερχόμενης δέσμης. Ο συντελεστής $\beta(z, \lambda_0) [= \beta_{par}(z, \lambda_0) + \beta_{mol}(z, \lambda_0)]$ εκφράζει την ελαστική οπισθοσκέδαση από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας στο μήκος κύματος λ_0 . Ο όρος $a(z, \lambda_0) [= a_{par}(z, \lambda_0) + a_{mol}(z, \lambda_0)]$ είναι οι συντελεστές εξασθένησης στο μήκος κύματος λ_0 . Ο όρος $a(z, \lambda_0)$ περιγράφει την εξασθένηση της ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα από κάτω προς τα πάνω. Η ίδια εξασθένηση λαμβάνει χώρα και κατά την επιστροφή της ακτινοβολίας από πάνω προς τα κάτω όπως φαίνεται στην εξίσωση (1).

Η εξίσωση (2) περιγράφει το επιστρεφόμενο σήμα εξαιτίας της ανελαστικής οπισθοσκέδασης Raman από τα μόρια [Ansmann et al., 1992]. Ο όρος $P(z, \lambda_{Ra})$ είναι το σήμα εξαιτίας της σκέδασης Raman των μορίων στο μήκος κύματος λ_{Ra} . Το μήκος κύματος λ_{Ra} περιγράφει την αλλαγή του μήκος κύματος που συμβαίνει εξαιτίας της ανελαστικής σκέδασης της ακτινοβολίας από τα μόρια (άζωτο ή οξυγόνο). Ο όρος E_0 είναι η εκπεμπόμενη ισχύς του παλμού του laser. Ο όρος $\eta_{\lambda_{Ra}}$

περιέχει παραμέτρους που αφορούν την διάταξη lidar και περιγράφει την αποδοτικότητα των οπτικών και ανιχνευτικών διατάξεων στο μήκος κύματος λ_{Ra} . Ο όρος $O(z, \lambda_{Ra})$ περιγράφει την συνάρτηση αλληλεπικάλυψης της εξερχόμενης δέσμης. Ο όρος $\beta_{Ra}(z, \lambda_{Ra})$ περιγράφει την ανελαστική σκέδαση από τα μόρια. Ο όρος $a(z, \lambda_{Ra}) [= a_{par}(z, \lambda_{Ra}) + a_{mol}(z, \lambda_{Ra})]$ είναι οι συντελεστές εξασθένησης στο μήκος κύματος λ_{Ra} . Ο όρος $a(z, \lambda_{Ra})$ περιγράφει την εξασθένηση του φωτός κατά την επιστροφή στο σύστημα λήψης.

1.3 Συντελεστής εξασθένησης αιωρούμενων σωματιδίων

Ο συντελεστής εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων υπολογίζεται από την εξίσωση (2) χρησιμοποιώντας το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από τα μόρια της ατμόσφαιρας. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης Raman $\beta_{Ra}(z, \lambda_{Ra})$ στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος υπολογίζεται από την αριθμητική πυκνότητα των μορίων N_{Ra} , που είναι το γινόμενο της μοριακής αριθμητικής πυκνότητας του αζώτου ή του οξυγόνου με την ενεργό διατομή κατά την Raman σκέδασης στο μήκος κύματος λ_0 και σε γωνία σκέδασης 180° .

$$\beta_{Ra}(z, \lambda_0) = N_{Ra}(z) \frac{d\sigma_{Ra}}{d\Omega}(180^\circ, \lambda_0) \quad (3)$$

Οι κατακόρυφες κατανομές της πίεσης και της θερμοκρασίας είτε υπολογίζονται από ατμοσφαιρικά μοντέλα [U.S. Standard Atmosphere, 1976] προσαρμοσμένα στην πίεση και την θερμοκρασία του εδάφους είτε μετρούνται με ραδιοβολίσεις. Θεωρούμε εκείνη την περιοχή υψών όπου η συνάρτηση αλληλεπικάλυψης είναι ίση με την μονάδα [$O(z, \lambda_{Ra}) = 1$]. Ο συντελεστής εξασθένησης των σωματιδίων υπολογίζεται αν εισάγουμε την εξίσωση (3) στην εξίσωση (2), αφού λογαριθμίσουμε τα δύο μέλη και πάρουμε την παράγωγο ως προς το ύψος z καταλήγουμε στην εξίσωση (4):

$$a_{par}(z, \lambda_0) + a_{par}(z, \lambda_{Ra}) = \frac{d}{dz} \ln\left(\frac{N_{Ra}(z)}{z^2 P(z, \lambda_{Ra})}\right) - a_{mol}(z, \lambda_0) - a_{mol}(z, \lambda_{Ra}) \quad (4)$$

Για να υπολογίσουμε τον συντελεστή εξασθένησης των αιωρούμενων σωματιδίων στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος θα πρέπει να εισάγουμε τον εκθέτη Ångström [$A_{\alpha, par}^0$], που περιγράφει την φασματική εξάρτηση των συντελεστών εξασθένησης.

$$\frac{a_{par}(\lambda_0)}{a_{par}(\lambda_{Ra})} = \left(\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_0}\right)^{A_{\alpha, par}^0} \quad (5)$$

Τελικά, καταλήγουμε στην εξίσωση (6) [Ansmann et al., 1990]

$$a_{par}(z, \lambda_0) = \frac{\frac{d}{dz} \ln\left(\frac{N_{Ra}(z)}{z^2 P(z, \lambda_{Ra})}\right) - a_{mol}(z, \lambda_0) - a_{mol}(z, \lambda_{Ra})}{1 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{Ra}}\right)^{A_{\alpha, par}^0(z)}} \quad (6)$$

Για τον τελικό υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης των σωματιδίων, πρέπει να υποθέσουμε την τιμή του εκθέτη Ångström, $\overset{o}{A}_{\alpha,par}$, ο οποίος για κοντινά μήκη κύματος και για σωματίδια διαμέτρου συγκρίσιμα των μηκών κύματος, μπορεί να θεωρηθεί ίσος με την μονάδα. Ο εκθέτης Ångström για το υπεριώδες τμήμα του φάσματος, παίρνει τιμές από 0 έως 2 και είναι ενδεικτικός του μεγέθους των σωματιδίων. Το σφάλμα που εισάγεται από μια εσφαλμένη εκτίμηση του εκθέτη Ångström, μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητα στον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης μικρότερη του 10% [Ferrare et al., 1998].

1.4 Συντελεστής οπισθοσκέδασης αιωρούμενων σωματιδίων

1.4.1 Μέθοδος Raman

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης $\beta_{par}(\lambda_0, z)$ μπορεί να υπολογισθεί με την συνδυαστική χρήση του ολικού (μόρια και σωματίδια) και ανελαστικού (μόρια) οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Αν πάρουμε τον λόγο του ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας προς το ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από το άζωτο σύμφωνα με τις δύο διαφορικές εξισώσεις lidar (1) και (2) μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης $\beta_{par}(z, \lambda_0)$ στο μήκος κύματος εκπομπής, σύμφωνα με την εξίσωση (7) [Ansmann et al., 1992]:

$$\beta_{par}(\lambda_0, z) = -\beta_{mol}(\lambda_0, z) + [\beta_{par}(\lambda_0, z_0) + \beta_{mol}(\lambda_0, z_0)] \frac{P(\lambda_{Ra}, z_0)P(\lambda_0, z)N_{Ra}(z)}{P(\lambda_0, z_0)P(\lambda_{Ra}, z)N_{Ra}(z_0)} \frac{\exp\left\{-\int_{z_0}^z [a_{par}(\lambda_{Ra}, \zeta) + a_{mol}(\lambda_{Ra}, \zeta)]dz\right\}}{\exp\left\{-\int_{z_0}^z [a_{par}(\lambda_0, \zeta) + a_{mol}(\lambda_0, \zeta)]dz\right\}} \quad (7)$$

Στην περίπτωση αυτή και θεωρώντας ότι τα δύο σήματα έχουν την ίδια συνάρτηση αλληλεπικάλυψης, $O(z, \lambda_0) = O(z, \lambda_{Ra})$, η επίδραση του φαινομένου μη αλληλεπικάλυψης μεταξύ της εκπεμπόμενης δέσμης και του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου αναιρείται, γιατί ο συντελεστής οπισθοσκέδασης καθορίζεται από την κατακόρυφη κατανομή του λόγου των δύο σημάτων $P(z, \lambda_0)/P(z, \lambda_{Ra})$. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο συντελεστής οπισθοσκέδασης να μπορεί να υπολογισθεί ακόμα και για πολύ χαμηλά ύψη.

Για την επίλυση της εξίσωσης (7) χρειάζεται να θεωρήσουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης για τα σωματίδια σε ένα ύψος αναφοράς z_0 . Για να μειώσουμε την αβεβαιότητα σε αυτήν την θεώρηση επιλέγουμε το ύψος αναφοράς σε μια περιοχή στην ελεύθερη τροπόσφαιρα όπου η σκέδαση από αιωρούμενα σωματίδια είναι σχεδόν αμελητέα σε σχέση με την μοριακή σκέδαση. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή βαθμονόμησης του σήματος. Σε αυτήν την περιοχή θεωρούμε ότι τα μόρια συνεισφέρουν μόλις κατά 10 % στην συνολική οπισθοσκέδαση.

1.4.2 Μέθοδος Klett

Στην περίπτωση όπου είναι γνωστή η ολικά οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία χωρίς να γίνεται διάκριση μεταξύ της συνεισφοράς των μορίων και σωματιδίων εφαρμόζουμε την μέθοδο κατά klett [Klett, 1981]. Η πιο κρίσιμη παράμετρος κατά την επίλυση με την μέθοδο klett είναι η σωστή υπόθεση της σχέσης μεταξύ του συντελεστή εξασθένησης και οπισθοσκέδασης.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία που αφορά την συγκεκριμένη μέθοδο, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής. Η πηγή όλων των περιορισμών βρίσκεται απλά στο γεγονός ότι δύο φυσικές παράμετροι ο συντελεστής εξασθένησης και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης, πρέπει να προσδιοριστούν από μία μετρούμενη ποσότητα, το ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα.

Μετά την παραδοχή του σταθερού με το ύψος λόγου lidar, και για την περιοχή πλήρους επικάλυψης της δέσμης laser με το οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου, η εξίσωση του lidar μπορεί να λυθεί ως προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων με μία επιπλέον παραδοχή που αφορά την σταθερά βαθμονόμησης του συστήματος. Συνήθως θεωρούμε μία περιοχή βαθμονόμησης του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων στο λεγόμενο ύψος αναφοράς. Συνεπώς, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (8):

$$\beta_{par}(\lambda, z) = -\beta_{mol}(\lambda, z) + \frac{P(\lambda, z) z^2 \exp \left[-2(S_{par} - S_{mol}) \int_{z_0}^z \beta_{mol}(\lambda, \zeta) d\zeta \right]}{\frac{P(\lambda, z_0) z_0^2}{\beta_{par}(z_0) + \beta_{mol}(z_0)} - 2S_{par} \int_{z_0}^z P(\lambda, \zeta) \zeta^2 \exp \left[-2(S_{par} - S_{mol}) \int_{z_0}^{\zeta} \beta_{mol}(z') dz' \right] d\zeta} \quad (8)$$

Λόγος του συντελεστή εξασθένησης προς οπισθοσκέδαση αιωρούμενων σωματιδίων (Λόγος lidar)

Η κατακόρυφη κατανομή του λόγου εξασθένησης προς οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων, του λεγόμενου λόγου lidar, υπολογίζεται από τις κατακόρυφες κατανομές του συντελεστή εξασθένησης προς τον συντελεστή οπισθοσκέδασης σύμφωνα με την σχέση (9), στην περίπτωση των μετρήσεων Raman:

$$S_{par}(z, \lambda_0) = \frac{\alpha_{par}(z, \lambda_0)}{\beta_{par}(z, \lambda_0)} \quad (9)$$

Ο λόγος lidar εξαρτάται από την κατανομή μεγεθών, το σχήμα και την χημική σύνθεση των σωματιδίων, επομένως είναι μια παράμετρος που μεταβάλλεται καθ' ύψος. Ο λόγος lidar εξαρτάται επίσης και από το μετρούμενο μήκος κύματος. Διαφορετικοί τύποι αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να χαρακτηριστούν ποιοτικά από την εκτίμηση του λόγου lidar.

2| Εργαστηριακή Άσκηση:

Η είσοδος σας στο σύστημα lidar του ΕΚΠΑ θα πρέπει να γίνεται κατά ομάδες των 5 ατόμων. Για την πραγματοποίηση της εργαστηριακής άσκησης ακολουθείστε τα παρακάτω βήματα υπό την καθοδήγηση του διδάσκοντα.

1. Εναρξη του συστήματος laser – Αναμονή 5 λεπτών για σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του laser
2. Ρύθμιση τάσης φωτοπολλαπλασιαστή στα **420 Volt**
3. Άνοιγμα εφαρμογής **prim_SW194101**, πατάτε την εξής αλληλουχία κουμπιών:
Serial Connect → Enable system → laser on
4. Άνοιγμα εφαρμογής **RM-TCPIP Acquis** και ρύθμιση των αριθμό shots στα 60.000
5. Έναρξη Μετρήσεων (Start → Start Now)
6. Για το τερματισμό των μετρήσεων Stop και στη συνέχεια το κόκκινο κουμπί πάνω δεξιά (Abort execution)
7. Για τη επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιούμε την εφαρμογή **Lidar Analysis**
8. Εισαγωγή της βάσης δεδομένων Από το μενού File → Configure database
9. Επιλογή των αρχείων από το Working Datalog
10. Επεξεργασία των μετρήσεων από το Surface → Import data → From current DB
(επιλογή των κατάλληλων αρχείων) → Next
Πατάτε το κουμπί Basic Analysis → RCS (Επιλογή των fLR(z) και Nβmol(z)) → ok
11. Export Jpeg file και save για την αποθήκευση των δεδομένων της μέτρησης
12. Κλείσιμο του συστήματος Lidar
Disable System → Laser Off
13. Κατεβάζουμε την τάση στο μηδεν και κλείνουμε τον διακόπτη της τάσης
14. Κλείνουμε τον διακόπτη του laser
15. ΒΑΖΟΥΜΕ το καπάκι, ΑΦΟΥ βεβαιωθούμε ότι το laser είναι κλειστό
16. Με το τέλος της εργαστηριακής άσκησης κλείνουμε ΠΑΝΤΑ το παράθυρο

3| Ανάλυση ευαισθησίας κατά Klett

Με βάση τα αρχεία που λάβατε να απεικονίσετε την **κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή οπισθοσκέδασης** για τα 532 nm για τιμές lidar ratio από 20 έως 120 sr με βήμα 20 sr.

Να υπολογίσετε και να απεικονίσετε γραφικά την **κατακόρυφη κατανομή του συντελεστή εξασθένησης** για τα 532 nm και για κάθε τιμή lidar ratio.

Θεωρώντας τιμή αναφοράς το 60 sr, υπολογίστε την απόλυτη και τη σχετική διαφορά με καθένα από τις λύσεις του συντελεστή οπισθοσκέδασης.

Θεωρώντας τιμή αναφοράς το 60 sr, υπολογίστε την απόλυτη και τη σχετική διαφορά με καθένα από τις λύσεις του συντελεστή εξασθένησης.

Να υπολογίσετε το **οπτικό βάθος** σε για κάθε τιμή lidar ratio και να αποτυπώσετε τα αποτελέσματά σας σε πίνακα και σε γράφημα.

Σχολιάστε πως επηρεάζεται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης και ο συντελεστής εξασθένησης σε σχέση με το lidar ratio? Σχολιάστε τις τιμές του συντελεστή εξασθένησης και οπισθοσκέδασης σε σχέση με την πιθανή πηγή των αιωρούμενων σωματιδίων. Ποια η επίδραση του λόγου lidar στο οπτικό βάθος?

4| Βιβλιογραφία

Ansmann, A., Riebesell, M. & Weitkamp, C. **1990**, "Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar", *Optics Letters*, 15, 746-748.

Ansmann, A., Wandinger, U., Riebesell, M., Weitkamp, C. & Michaelis, W., **1992**: "Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic backscatter lidar", *Applied Optics*, 31, 7113-7131.

Fernald, F.G., Herman, B.M. & Reagan, J.A. **1972**, "Determination of aerosol height distributions by lidar", *Journal of Applied Meteorology*, 11, 482-489.

Ferrare, R.A., Melfi, S.H., Whiteman, D.N., Evans, K.D. & Leifer, R. **1998**, "Raman lidar measurements of aerosol extinction and backscattering: 1. Methods and comparisons", *Journal of Geophysical Research*, 103, 19663-19672.

Klett, J.D. **1981**, "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns", *Applied Optics*, 20, 211-220.

U.S. Standard Atmosphere, **1976**, *U.S. Government printing Office*

Weitkamp, C. **2005**, "Lidar Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere", *Springer*