

14036

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMALLER VE CUMULUS'LERDE METEOROLOJİK PARAMETRELERİN
ÖLÇÜLMESİ, ANALİZİ VE KONVEKTİF YAPININ MODELLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Zafer ASLAN

T. C.

Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 13 Nisan 1987

Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Ağustos 1987

Tez Danışmanı

: Doç. Dr. Süreyya ÖNEY

Diğer Jüri Üyeleri

: Prof. Dr. Muhsin MENGİTÜRK

: Doç. Dr. Mahmut C. BARLA

NİSAN 1987

ÖNSÖZ

Atmosferde konvektif hareketler, konvektif yağışların oluşumu açısından olduğu kadar, atmosferdeki hidrolojik çevrim için de çok önemlidirler. Atmosferin enerji bilançosunun belirlenebilmesi için bu hareketlerin iyi bilinmesi gerekir, zira konvektif hareketler, yoğunlaşma öncesi durumundaki özel dinamik yapıları nedeniyle, motorsuz uçuşlar açısından da önem taşımaktadırlar. Bu çalışmada, 1-boyutlu termal-cumulus modeli yardımı ile meteorolojik parametrelerin (sıcaklık, nem, enerji, düşey hız vb.) düşey dağılımı incelenmiş ve Eskişehir bölgesinde yapılan ölçümlerle model sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tezin hazırlanması sırasındaki değerli katkılarından ve yardımlarından dolayı yürütücü hocam Doç.Dr.Süreyya ÖNEY'e teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışma TÜBİTAK, THK, DİM Genel Müdürlüğü ve İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi tarafından maddi ve manevi olarak desteklenmiştir. Söz konusu kuruluşların yetkili ve ilgililerine teşekkürlerimi sunarım. Gerek teorik ve gerekse ölçüm çalışmaları sırasındaki değerli öneri ve yardımlarından dolayı Doç.Dr.Ö.Erkin PEREMECİ'ye, Doç.Dr.Vural KARAMUSTAFAOĞLU'na, Doç.Dr.Süleyman TOLUN'a, Doç.Dr.Eşref ADALI'ya, Doç.Dr.Mustafa ÇETİN'e, Porselen Fab. Md. Osman CİVELEK'e, Prof.Dr. aufm KAMPE'ye ve Dr.J.JENSEN'e teşekkür ederim. Ölçüm çalışmaları sırasındaki desteklerinden dolayı Atatürk Hava Limanı Meteoroloji İstasyonu Müdürlüğü'nün, TÜBİTAK (MESAB'nın), HHO Komutanlığı'nın, THY Teknik Kontrol Müdürlüğü'nün yetkili ve ilgililerine, ayrıca şekilleri hazırlayan teknik ressam Sevim YERTÜRK'e ve tezi büyük bir titizlikle daktilo eden Kadriye GÜL'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasındaki ilgilerinden dolayı aileme ve yakın çevreme müteşekkirim.

Akademik çalışmaya başlama olanağı sağlayan hocam Prof. Dr. Muzaffer DALMAZ'ı bu vesile ile saygıyla anıyorum.

İÇİNDEKİLER

NOTASYON LİSTESİ	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
1.2. Çalışmada İzlenen Yol	2
1.3. Diğer Çalışmalara Genel Bakış	3
BÖLÜM 2. AŞAĞI TROPOSFERİN TERMİK VE DİNAMİK YAPISI	11
2.1. Aşağı Troposferin Termik ve Dinamik Yapısı	11
2.2. Bir Hava Parseline Etki Eden Kaldırma Kuvvetleri	12
2.3. Termal Teorisi ve Katılım (Entrainment) Olayı	14
2.3.1. Termallerin Özellikleri	16
2.3.2. Rüzgârın Termallere Etkisi	16
2.3.3. Yükselen Bir Parsele Katılım Olayının Etkisi	16
2.3.4. Konvektif Bulutlar ve Termallere Etkisi	19
2.3.4.1. Kapalılık ve Termallere Etkisi	21
2.3.4.2. Diğer Meteorolojik Koşulların Termallere Etkisi..	21
2.4. Bulut Modelleri	22
2.4.1. Bulut ve Termal Modelleri İçin Temel Denklem Takımları	22
2.4.1.1. Termodinamik Esaslar	23
2.4.1.2. Mikrofizik Esaslar	25
2.4.1.3. Konvektif Bulutlar	26
BÖLÜM 3. DENEYSEL YÖNTEM VE ÖLÇÜM TEKNİĞİ	27
3.1. İnceleme Periyodu ve Ölçüm Yeri	27
3.2. Araştırmanın Ölçeği	27
3.3. Ölçülen Büyüklükler ve Kayıt Yöntemi	28
3.4. Ölçüm Tekniği, Kullanılan Aletler ve Sensörler	29
3.5. Sıvı Su Miktarı Ölçeri	29
3.5.1. Sistemin Tasarımı	31
3.5.2. Sensörün Geliştirilmesi İle İlgili Çalışmalar	32
3.6. Ölçülen Parametrelerin Yatay Değişimleri	35
3.6.1. Hata Analizi	44
3.7. Ölçülen Parametreler Arasındaki İlişkiler	45
BÖLÜM 4. 1-BOYUTLU TERMAL-CUMULUS MODELİ	50
4.1. 1-Boyutlu Termal-Cumulus Modeline İlişkin Denklem Takımı	51

4.1.1. Başlangıç Koşulları	56
4.1.2. Modelin Çözüm Yöntemi	56
4.2. Model Sonuçları ve Gözlemlerle Karşılaştırılması	57
4.2.1. Modelden Elde Edilen Sonuçlar	57
4.2.2. Model Sonuçlarının Gözlemlerle Karşılaştırılması ..	64
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	73
EK-A	77
EK-B	82
EK-C	86
ÖZGEÇMİŞ	105



NOTASYON LİSTESİ

- a : Planör veya uçağın düşey ivmesi (m/s^2),
 $\bar{B}$: Termalin ortalama kaldırma kuvveti,
 C : Katsayı,
 c_p : Sabit basınçta havanın özgül ısısı ($J/kg^{\circ}K$),
 e : Nemli havanın basıncı (HPa),
 e_{sl} : Su yüzeyi üzerindeki doymuş buhar basıncı (HPa),
 e_{si} : Buz yüzeyi üzerindeki doymuş buhar basıncı (HPa),
 F_B : Birim kütledeki kaldırma kuvveti (m/s^2),
 g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2),
 H : Toplam statik enerji (J/kg),
 H_c : Bulut veya termalin toplam statik enerjisi (J/kg),
 H_e : Çevre havanın toplam statik enerjisi (J/kg),
 h : Manometrik yükseklik (mm H_2O),
 L_v : Buharlaşıma gizli ısısı (J/kg),
 L_s : Süblimasyon gizli ısısı (J/kg),
 L_f : Donma gizli ısısı (J/kg),
 LWC : Bulut sıvı su miktarı (g/m^3),
 M : Termal veya cumulus bulutu kütlesi (kg),
 Δm : Rüzgâr tüneline kalibrasyon aparatı içinde toplanan sıvı suyun ağırlığı (gr),
 n_d : Bulut damla konsantrasyonu ($1/m^3$),
 n_i : Bulut buz partikülü konsantrasyonu ($1/m^3$),
 P : Basınç (HPa),
 P_d : Kuru havanın basıncı (HPa),
 r : Termal veya cumulus bulutunun yarıçapı (m),
 R_d : Kuru havanın gaz sabiti ($J/kg^{\circ}K$),
 R_v : Su buharının gaz sabiti ($J/kg^{\circ}K$),
 RH : Bağıl nem,

S : Sıvı su miktarı sensör kapağının etkin kesiti (m^2),
 Q : Toplam özgül nem (kg/kg),
 Q_c : Termal veya bulutun toplam özgül nemi (kg/kg),
 Q_e : Çevre havanın toplam özgül nemi (kg/kg),
 q_i : Bulutun özgül buz miktarı (kgbuz/kgbulut),
 q_l : Bulutun özgül sıvı su miktarı (kgsu/kgbulut),
 q_v : Bulutun özgül nemi (kgbuhar/kgbulut),
 T : Sıcaklık ($^{\circ}K$),
 T_c : Bulut veya termalin sıcaklığı ($^{\circ}K$),
 T_e : Bulut veya termal çevre sıcaklığı ($^{\circ}K$),
 T_v : Virtüel sıcaklık ($^{\circ}K$),
 ΔT : Bulut veya termal ile çevresi arasındaki sıcaklık farkı ($^{\circ}K$),
 t : Zaman (sn),
 u : Yatay hız (enlemsel) (m/s),
 v : Yatay hız (boylamsal) (m/s),
 w : Düşey hız (m/s),
 u_r : Radyal hız (m/s),
 U : Gerilim (V),
 V : Hacim (m^3), Yatay hız (m/s),
 w_c : Bulut (veya termal) içindeki düşey hız (m/s),
 w_e : Çevre havanın düşey hızı (m/s),
 Z : Uçuş yüksekliği (m),
 Z_i : Karışım tabakasının yüksekliği (m),
 α : Orantı katsayısı,
 γ_d : Kuru adyabatik düşey sıcaklık gradyanı ($^{\circ}K/m$),
 γ_s : Doymuş adyabatik düşey sıcaklık gradyanı ($^{\circ}K/m$),
 θ : Potansiyel sıcaklık ($^{\circ}K$),
 ρ_c : Termal veya bulut içinde hava yoğunluğu (kg/m^3),
 ρ_d : Kuru havanın yoğunluğu (kg/m^3),
 ρ_e : Termal (veya bulut) çevre havasının yoğunluğu (kg/m^3),
 ρ_v : Su buharının yoğunluğu (kg/m^3).

ÖZET

Bu çalışmada aşağı troposferde sıcaklık, bağıl nem, düşey hız, sıvı su miktarı gibi bazı meteorolojik parametrelerin yer ve zamanla değişimi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Özellikle termaller ve sığ cumulus bulutlarının dinamik ve mikrofizik yapısı ve meteorolojik parametrelerin bu alanlarda nasıl değiştiği araştırılmıştır.

Termaller, yeryüzeyinden yükselen ve çevrelerine göre daha sıcak bireysel hava kütleleridir. Bunlar arasında yoğunlaşma seviyesine yükselecek kadar güçlü olanlar, cumulus bulutu haline dönüşürler. Burada sadece, cumulus humilis ve cumulus mediocris gibi sığ bulutlar gözönüne alınmıştır.

Bu araştırmada, ölçümler, 1983, 1985 ve 1986 yıllarında konvektif aktivitenin çok olduğu bahar ve yaz aylarında İnönü'de (Eskişehir) cumulus bulutları içinde ve çevrelerinde uçak ve planörlerle yapılmıştır. Bu ölçümlerde kullanılmak üzere bir sıvı su miktarı ölçeri de geliştirilmiştir.

Verilerin analizinde öncelikle, meteorolojik elemanlar arasındaki ilişkiler araştırılmış, parametrelerin zaman ve yükseklikle olan değişimleri incelenmiş ve termal bölgelerinin belirlenmesi amacı ile bir kriter oluşturulmasına çalışılmıştır. Bu çalışmada ayrıca kütlenin korunumu, toplam nem eşitliği, toplam nemli statik enerji eşitliği ve momentumun korunumu eşitliklerinden hareketle 1-boyutlu teorik cumulus-termal modeli geliştirilmiştir. Bu modelde termallerin yeryüzeyinden itibaren r-yarıçaplı bir koni içinde yükseldiği kabul edilmiş ve entrainment (katılım) olayı gözönüne alınmıştır. Model, radyosonde verilerini kullanarak, çevre koşullarını ve buna dayanarak da termal veya cumulus içindeki parametreleri hesaplamaktadır.

Modelden elde edilen sonuçlarla, gözlemlerin oldukça iyi bir şekilde uyduğu görülmüştür. Sonuç olarak, 1-boyutlu cumulus-termal modelinin cumulus bulutu ve termal bölgelerinde meteorolojik büyüklüklerin yükseklikle olan değişimlerinin tahmininde büyük bir yaklaşıklıkla kullanılabileceği söylenebilir.

MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF THE METEOROLOGICAL PARAMETERS IN THERMALS
AND CUMULUS CLOUDS AND MODELLING OF THE CONVECTIVE STRUCTURE

SUMMARY

Cloud physics is one of the most complicated and important subjects in the atmospheric studies. Especially the convective clouds are more important compared to the other type of clouds since they contain quite a large portion of the atmospheric humidity.

Convective motions within atmosphere appear as a consequence of the heat imported into the ground by the solar radiation. The upward motions of individual air masses, caused by locally heated ground surfaces in this way, is named generally as "thermals" and sometime as "blue-thermics". Some of these thermals gain sufficient energy to rise up to the level of condensation and become cumulus clouds that contain a conglomerate of water particles suspended within the humid air. While this formation of the cumulus clouds takes place, some energy discharged by the condensing water particles is redistributed within the forming cloud and creates an inner mechanism of motion which is called the cumulus circulation.

The first investigations about the cumulus convection have been started off some fifty years ago. In the present time these studies form integral parts of the large projects such as GARP (Global Atmospheric Research Programme) and GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment).

This thesis is intended to be a first attempt to initiate the cumulus convection studies by flying observations in Turkey and as such many practical difficulties, encountered and overcome during the actual experimentation phase, had a noticeable effect on the accuracy of the measurements. However, it should be stated that this, in fact, is the case almost with every investigation on this subject because of the overall cost and the necessity of waiting for the suitable weather conditions.

The main goal of this study is to gain some insight about the micro-physical and dynamical structure of the thermals and shallow cumulus clouds. For this purpose the pertaining parameters i.e. temperature, relative humidity, vertical air velocity and liquid water content have been measured within or in the vicinity of thermals, cumulus-humilis/cumulus-mediocris clouds, by flying through or around, with SIAT or CESSNA 207 airplanes or PUCHACZ-SZD-50 gliders.

The flight area is the İnönü (Eskişehir) Glider Base which is situated in the western part of the Internal Anatolia where temporal thermals have been noted and manipulated for many years in gliding. Because of the appreciable dominance of the convective activities, the spring and summer time has been preferred as the observation period.

In the flight location and for the seasons stated above, the most of the developing thermals are the dry thermals within which the maximum vertical velocities are not higher than 1.5 m/sec and for this reason these thermals are named in the text as the weak or the moderate thermals.

The first chapter of the thesis is devoted to a general survey of the relevant literature after stating the aim and the frame of the work presented. In the second chapter, the general theory on cumulus convection is outlined. The general technics of experimentation in flight, the measured atmospheric parameters, the measuring methods and the characteristics of the various gauges and their installation on aircraft etc. are discussed in the third chapter. A one-dimensional theoretical model for the cumulus clouds is presented in the fourth chapter together with the comparison of the experimental and theoretical results. Finally, some general conclusions and comments are given in the fifth and the last chapter.

The third chapter of the thesis comprises of two sub-sections: The general detailed description of the experimentation technics and also the analysis of the data obtained.

The recording of the meteorological parameters (temperature, relative humidity, vertical air velocity and liquid water content), in the form of the averages obtained in the one minute time intervals, has been achieved by using a CR-21 micro-logger. Flight data, because of the technical difficulties in transferring them directly to the same recorder, had to be recorded separately by using simultaneous photography from the control panel. Temperatures have been measured by a standard thermo-couple gauge and relative humidity by a relative-humidity-meter. The liquid water content measurements have been carried out by a specially designed and prepared electrical hot-wire system. The sensing elements of all these systems have been placed carefully on the outboard of the air-vessel so that the measurements were not affected by the turbulent noise created by the air-flow around. The vertical acceleration has been measured by a vertical accelerometer borrowed from a DC-9 aircraft. All of the measurements have been carried out by several special flight tests, such as butterfly path flights, for typical periods of 30-45 minutes.

The liquid water content meter which has been described in detail in the third chapter, was designed and tested completely by the author. The calibration process has been performed in the wind-tunnels of the Aircraft Engineering Department and also of the Air Force Academy. This system is made of a porcelain rod wound by two inter-woven spirals of platinum wires each of one meter long. The wires are isolated from each other by a layer of LiCl which is

sensitive to the environmental humidity variations. In order to prevent polarization, the wire is heated electrically by the application of a 24V alternative current supplied by a rechargeable battery and converted by an alternating switch arrangement. The cumulus clouds are simulated in the wind tunnel, by the diffusion of pure water droplets ejected from a specially designed nozzle. The calibration is repeated under various temperatures and humidity conditions. This system has been tested in 1986, first time under the actual atmospheric conditions by taking a series of measurements in the lowest, highest and central levels of the clouds. During these studies, the amount of liquid, water content has been measured as varying between 0.5-1.2 g/m³ and having a positive gradient in the lower portions but a negative gradient in the higher portions.

In the third chapter, in addition to the experimental technics used, the local changes in the meteorological parameters are studied in order to ascertain some criteria for determining the location of the thermals. It has been observed that within the thermals the temperature, the relative humidity, the total static energy, the vertical velocity and the flight altitude display a trend to attain higher values than their respective mean values, as might have been expected. As a result of this study it is suggested in the thesis that a standart deviation of the order of 25 % in the total specific humidity and the total static energy has been found to be a suitable criterium verifying the observations. But on the other hand the use of temperature levels, has been found inconclusive for this purpose, especially if any mixing is in presence. The detection of the thermals if a constant velocity level flight is realized, can also be made by the variometer on board, since it shows the relative sinking or elevating velocity of the vessel. The recording of this parameter provides the upward or downward velocity values within the thermals.

Another subject which takes place in the third chapter is a discussion about the linear correlations between the measured parameters. The calculations have shown that these correlations are stronger in the thermals than the clouds. This hints to the fact that the micro-physical structure of the clouds is more complicated than that of the thermals. The strongest linear correlations within the thermals have been observed between the

- . total specific humidity-total static energy,
- . total specific humidity-relative humidity,
- . relative humidity-total static energy and also
- . temperature-relative humidity-total static energy.

Last subject included in the third part is a statistical investigation on the experimental errors, where the reliability intervals of the measured parameters have been determined and presented in tables according to the 5 % or 10 % significance levels.

The fourth chapter of the thesis begins with the theoretical study of the thermals. Using a simple one dimensional thermal-cumulus model, the basic equations, stating the conservations of mass, total static energy, total specific humidity and momentum have been formed and discussed. In this model the thermals and the cumulus clouds are

assumed to develop within an imaginary vertical cone having its apex at the ground level and a prescribed initial thermal radius of 100, 200, 500, 1000 and 2000 meters, and to gain height with the time in accordance with the assumption that the gradient dr/dz is constant and equal to 0.25. This model provides a simple method for the calculation of meteorological parameters and this has been carried out for every 10 meters up to the level of the pressure value 700 HPa is reached. The initial vertical velocity and the temperature difference between the thermal and the environment have been assumed to be $w = 1$ m/sec and $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ respectively in the computations. The model considers the entrainment phenomenon in a limited way and assumes that the inclusion of external air masses to the developing thermal is possible only laterally that is through the cone surface.

According to the results obtained with this method, the temperature decreases within the thermal or cumulus clouds with the altitude, and it is not greatly affected by the initial radius of the structure. The relative humidity increases with the height in the beginning and whence the saturation point is reached (some 2400-2500m) then the thermals transform into the cumulus clouds. The change of the total energy with the altitude displays a strong similarity to that of the total specific humidity. The vertical velocity values increases with the height but a decreasing trend is noted for greater altitudes. The formation of the cloud which is accompanied by the appearance of the condensing water particles causes a reincrease in the vertical velocity and also in the liquid water content values within the lower part of the cloud.

The comparison of the experimental results (of the third chapter) with the theoretical values obtained by this model forms the main material of this chapter. Generally the agreement obtained between the experimental and the theoretical results are quite satisfactory. For example in the case of temperature, relative humidity and the total energy the maximum deviation is less than 10 %.

The discrepancies originate mainly from two sources:

i) The crudeness of the experimental technics originating primarily by rather long time intervals between the subsequent data recordings, the sensitivity losses of the sensors within the clouds and of course the turbulence created by the propellers.

ii) The simplifying assumptions of the theoretical model such as using a one-dimensional model (depending on the height only), presenting entrainment by mass addition through the cone surface, neglecting the droplet distribution and/or concentration within the cloud.

There is also one special source of error that has to be mentioned. The İnönü Gliding Base has no radiosonde station. Hence all the environmental data used in the theoretical study had to be taken from the tables prepared by Ankara radiosonde station (which is situated some 250 kms to the east). Although, care is taken to make simultaneous flights, this fact obviously creates a certain amount of uncertainty in the theoretical results.

As a final conclusion it can be stated, perhaps, that this work presents a beginning phase of the study of convective activities and cloud formation processes by "in-flight observations" in Turkey. The results are quite reliable and also comparable with the similar work obtained elsewhere in the world.

However in order to further improve the results obtained in this thesis, following suggestions may be considered:

i) To improve the existing experimentation technics and develop new methods. Especially the simultaneous recording of data using smaller time intervals has the first priority in this respect. Apart from this to increase the sensitivity of the humidity measurements a Lyman-Alpha Hygrometer or some similar more sophisticated gadget must be used together with a better quality platinum-wire thermocouple for temperature measurements. Also a second (i.e. parallel) sensor, made of with copper wires for example for the liquid-water-content measurements may be integrated to the system to provide a possibility to check the accuracy of the existing system, as it is becoming a fairly common practice lately in measuring this quantity.

ii) To improve the reliability of the recorded flight data, in addition to the existing variometer measurements, it is recommendable to use a gyroscopic accelerometer to measure the vertical acceleration together with the actual flight angle of attack, so that the flight mechanics equations may be used to obtain an independent set of data for the vertical velocity.

iii) Another and a somewhat obvious improvement can be obtained by increasing the number of observation flights so that a more adequate amount of data can be processed statistically in order to assess the rate of development and the strength of thermals and the degree of convectivity within.

iv) Theoretically, a better level of representation can be created by using a modified one-dimensional but an unsteady cumulus-thermal model instead of the present steady one.

This work has been generously supported by DMI (Governmental Meteorological Organisation), TUBITAK (Turkish Scientific and Research Council MAG 649/A), THK (Turkish Air League) and ITU (Istanbul Technical University-Faculty of Aeronautics and Astronautics), and the author is greatly thankful.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda "Bulut Fizigi" incelemelerine büyük ilgi duyulmaktadır. Doğadaki su kaynaklarının büyük bir kısmını oluşturmaları nedeni ile konvektif bir bulut olan cumulus'ler hakkında pek çok bilgiye gereksinim vardır. Konvektif bulutlar nemin, momentumun ve ısı'nın düşey transferi açısından önem taşımaktadır, [1-7]. Cumulus sirkülasyonunun ana mekanizması, yukarıya yükselirken genişleyen ve soğuyan hava içindeki su buharının yoğunlaşmasıdır. Su buharının yoğunlaşarak, bulut damlacıklarını oluşturmaları sırasında açığa çıkan gizli ısı kaldırma kuvvetlerini artırarak, konveksiyonu hızlandırır [7-17]. Güneş radyasyonu ile yerin ısınması sonucu konvektif hareketler başlar [1, 2]. Bu düşey hareketler kararlı bir tabakaya varıncaya kadar devam eder. Termal (veya termik) olarak tanımlanan bu yükselen bireysel hava kütleleri, cumulus bulutlarının oluşumunda önemli rol oynamaktadır. Ancak cumulus bulutlarının yapısı ve oluşumu konusu henüz tamamen anlaşılmış olmayıp, bu konudaki çalışmalar halen devam etmektedir [3-31].

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışma, atmosferik hareketler nedeni ile doğrudan incelenmesi çok güç olan düşey hız ve bulut sıvı su miktarı gibi parametrelerin değişimini açıklayıcı niteliktedir. Çalışmanın iki ana amacı şu şekilde sıralanabilir:

1- Aşağı troposferdeki konvektif aktivitenin (termaller ve küçük cumulus bulutlarının) incelenmesi amacı ile meteorolojik

sensörlerle donatılmış planör ve uçaklarla ölçümler yapmak ve ölçülen bu değerlerin birbirleriyle olan ilişkisini araştırmak,

2- Yer ve radyosonde verilerini kullanarak, 1-boyutlu termal-cumulus modelini geliştirmek ve ölçümlerle modelden elde edilen sonuçları karşılaştırmak.

Yukarıda sıralanan amaçlar için Eskişehir (İnönü)'de ölçüm çalışmaları yapılmış, termaller, cumulus bulutları ve civarlarının termik ve konvektif yapısı modellenmiştir.

1.2. Çalışmada İzlenen Yol

Bu çalışmanın ölçüm ve gözlem kısmında aşağı troposferin konvektif yapısı özellikle termaller ve sığ cumulus bulutları incelenmiştir. Ölçümler, meteorolojik aletlerle donatılmış uçak ve planör uçuşları ile yapılmıştır [32-38]. Sıcaklık, bağıl nem, sıvı su miktarı ve düşey ivme ölçerlerine ait değerlerin bir "micro-logger"a kaydedilmesi ile veriler toplanmış, bu verilerle eş zamanlı uçuş bilgileri (irtifa, yön, hız, vb.) de fotoğraf tekniği ile belirlenmiştir [39-41]. Bu ölçümlerde kullanılmak üzere bulut sıvı su miktarını ölçmek için sıcak tel prensibine dayanan bir sensör geliştirilmiştir [42]. Porselen bir çubuk üzerine sarılan platin teller elektrod olarak kullanılmış, tellerin arası nem çekici özelliği olan LiCl ile doldurulmuştur. Elektrodların uçları arasındaki potansiyel farkı sıvı suyun bir ölçütü olarak kullanılmıştır. Sensörü kalibre etmek için, rüzgâr tüneline sığ cumulus bulutları simüle edilmiştir. Sistem, bulut içi sıvı su miktarı ölçümlerinde başarı ile kullanılmış, bulut tabanından itibaren sıvı su miktarının düşey değişimi belirlenmiştir. Ölçülen diğer parametrelerden yararlanılarak, bulut veya termaller içinde ve civarlarında toplam özgül nem ve toplam statik enerji değerleri de hesaplanmıştır [43-47]. Bu parametrelerin yatay değişimleri incelenerek, termal bölgeleri için bir kriter seçimine çalışılmış olup, nem veya toplam statik enerjinin standart sapması ($1/4$ 'ü) termal bölgelerini belirleyen eşik değeri olarak seçilmiştir [37].

Çalışmada değişik başlangıç koşullarında oluşan termaller ve cumulus bulutları içindeki meteorolojik parametrelerin yükseklikle değişimini belirlemek amacı ile 1-boyutlu termal-cumulus modeli geliştirilmiştir [17]. Radyosonde ve yer gözlemleri yardımı ile elde edilen model sonuçları gözlemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçta, model ve gözlemler arasındaki farklılığın (ortalama olarak) % 10 dan küçük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bu modelin termal veya sığ cumulus bulutları içinde meteorolojik parametrelerin düşey değişiminin öngörüsü için büyük bir yaklaşıklıkla kullanılabileceği söylenebilir.

1.3. Diğer Çalışmalara Genel Bakış

Bulut ve yağış olayının oluşumunu anlamak amacıyla yapılan çalışmalar çok eskilere dayanmakla beraber, bu konudaki özgün çalışmalar son 40-50 yıldan beri sürdürülmektedir. Bulut oluşumu ve yapısı ile ilgili konuların anlaşılmasında havacılık büyük kolaylık sağlamış ve uçaklar, özellikle bulutların incelenmesi sırasında, tercih edilen araçlar olmuştur. Bu tür çalışmalar, bulut tavan ve taban yüksekliği, sıvı su miktarı, su damlacıklarının yapısı, konsantrasyonu, buz kristalleri, elektrik yük dağılımı, düşey hızlar, türbülans yapısı vb. büyüklükler hakkında bilgi sağlamaktadır.

Son on yılda ilgi alanı "Bulut Dinamiği" konusuna yönelmiştir. Bulut dinamiği, bulut oluşumu ve bulutların sıcaklık ve nem alanlarının yer ve zamanla değişimi ile ilgili konuları içermekte olup, özellikle bulut dinamiğindeki en önemli konu, bulut sıvı su miktarının ölçümüdür [1, 3]. Her ne kadar bulutların incelenmesi gerek teknik ve gerekse teorik olarak pek çok güçlükler içermekte ise de son on yılda bu alanda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir [8-10]. Bu önemli ilerlemelere karşın, özellikle bulut mikrofiziği (bulut damla ve buz konsantrasyonu, sıvı su miktarı) konusu halen, bulut fiziklerinin en karmaşık konularından birisidir. Bu konu 25 yıl önce Mason tarafından vurgulanmış ve daha sonra Hans Pruppacher ve J.Klett'in bu alanda önemli katkıları olmuştur. Bulut içindeki mikrofizik süreçleri açıklamak amacı ile parametreleme yoluna gidilmiş ve çeşitli modeller oluşturulmuştur (Yau ve Austin 1977, Lopez 1973, Kessler, Orville, Kopp, 1977). Daha ayrıntılı modeller ise Stephens (1979), Taylor-Baker (1985) tarafından geliştirilmiştir. Bu yeni modelde mikrofizik dönüşümler, yağış ve entrainment olayı gözönüne alınmıştır [11-18].

Bu konulardaki gelişmeleri kronolojik olarak şöyle sıralayabiliriz:

Lamarck (1802), bulutların meydana gelişinin tesadüfi olmadığını belirtmiş, ilk basit bulut sınıflandırmasını yapmıştır. Howard (1803) daha sonra halen geçerli olan bulut sınıflandırmasının ilk temelini oluşturmuştur. Hildebranson (1879) ilk bulut atlası fikrini ortaya atmıştır. İlk "bulut atlası" 1956'da WMO tarafından basılmıştır. Daha sonra Scorer 1972'de bir bulut ansiklopedisi oluşturmuştur [10-15].

Bulut ve yağış partikülleri ile ilgili gözlemler, 1783'e kadar yer gözlemleri ile yürütülmüştür. 1882-1932 yılları arasında büyük bulutlar içinde buz kristali ve dolu taneciklerini açıklamak amacı ile, Wigand tarafından ilk balonlu gözlemler yapılmıştır [15]. Aitken (1839-1919), atmosferde toz taneciklerinin bulunmadığı hallerde, pus, sis ve bulutların oluşamayacağını ileri sürmüştür. Lüdeling ve Linke atmosferdeki yoğunlaşma çekirdeklerinin konsantrasyonunu belirlemek amacı ile çeşitli seviyelerde ölçümler yapmış ve bu konunun, bulutun termal yapısı ile çok ilgili olduğunu bulmuştur [15]. Bu dönemde, özellikle toz partiküllerinin, buz kristallerinin oluşumunda önemli etkisi olduğu anlaşılmıştır.

P. Hertz, nemli bir hava parselinin yükselirken;
i- kuru safha (hava parseli doymamış),
ii- yağmur safhası (doymuş su buharı ve sıvı su),
iii- dolu safhası (doymuş su buharı, sıvı su ve buz),
iv- kar safhası (sadece su buharı ve buz)
olmak üzere dört safhadan geçebileceğini ileri sürmüştür [15].

Yağış oluşumunun anlaşılmasında en önemli katkıyı Wegener (1911) yapmıştır. Wegener, 0°C 'ın aşağısında buz kristalleri ve su damlacıklarının dengede kalamayacağını göstermiştir. 1933'de Bergeron yağışın bu kararsızlık nedeni ile oluştuğunu ifade ederek, "Wegener-Bergeron yağış mekanizması"nı ileri sürmüştür [15].

Konvektif hareketlerle ilgili ilk incelemeler, Schmit (1941) tarafından yapılmış, Schmit, küçük kaynaklardan yükselen termal veya hüzmeleri (plume) gözlemiştir. Daha sonraları (Yih, 1951), Rouse ve Humphreys (1952) de tek bir kaynaktan çıkan hüzmeye içinde incelemeler yapmıştır. Batchelor kararlı tabakalaşmış bir atmosferdeki konvektif hüzmeleri incelemiştir. Bu konuda daha ayrıntılı çalışmalar Morton, Taylor ve Turner tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu tarihten itibaren, uyduların, roketlerin, iklim odaları ve rüzgâr tünellerinin çalışmalara büyük katkısı olmuştur. Entrainment (yükselmekte olan hava parseli içine çevre havanın girmesi, katılım) olayı ilk defa Narias tarafından ortaya atılmıştır [3-5]. Cumulus dinamiği ve modellenmesi ile ilgili çalışmalar, tropikal cumulus bulutlarının incelenmesi ile başlamıştır. Tropikal meteoroloji konusundaki gelişmeler, atmosfer biliminin hemen her alanını etkilemiştir. 1960'larda, analiz ve hesaplamalar için bilgisayarların kullanılması ile "Bulut Dinamiği"nde yeni bir dönem başlamıştır. Bu incelemelerde, yoğunlaşma gizli ısı ve bulutların çevre havayla etkileşimleri de gözönüne alınmaktadır [11-15]. Bulut fiziği,

- i- bulutun makroskopik yapısı ile ilgili bulut dinamiği,
- ii- bulutların ve yağış partiküllerinin elektrik yapısı ile ilgili bulut elektriği,
- iii- bulut ve yağış durumunda elektromagnetik dalgaların etkilerini açıklayan bulut optiği ve radar meteorolojisi,
- iv- atmosferin kimyasal kompozisyonu ile ilgili bulut kimyası gibi başlıca dört konudan oluşmaktadır [15-18].

Tezde sunulan ölçümsel, gözlemsel ve teorik çalışmanın diğer çalışmalar arasındaki yerini belirlemek amacı ile yapılan diğer araştırmalardan bazılarının bu çalışma ile benzer ve farklı yönleri şöyle sıralanabilir:

Konveksiyon olayının ve termallerin laboratuvarlarda su tankında simüle edilmesi ile ilgili çalışmalar Woodward tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, termallerin yarıçapının yükseklikle orantılı olarak büyüdüğü gözlenmiştir. Scorer ise, termallerde erozyon (detrainment) olayının sadece kararlı olarak tabakalaşmış çevre içinde

oluşturduğunu göstermiştir (Tezin üçüncü ve dördüncü bölümlerinde verilen gözlem ve model çalışmalarından önce, su tankında, termallerin simülasyonu, NaCl, BaSO₄ veya süt kullanılarak yapılmış, yarıçaplarının tank boyunca değişimi gözlenerek benzer sonuçlar elde edilmiştir) [10]. Atmosferde termallerin incelenmesi ile ilgili olarak, uçak, balon, kule, sodar, lidar ve radar gözlemleri gibi pek çok yöntem kullanılmaktadır [17-37]. AMTEX (Air Mass Transformation Experiment) deneyleri sırasında NCAR Electra uçağı ile, okyanus üzerindeki konvektif sınır tabakada termallerin yapısı incelenmiştir. Ayrıca, Lenschow meteorolojik aletlerle donatılmış planör uçuşları ile termaller ve çevrelerindeki mikrofizik ve dinamik yapıyı incelemiştir [37-42].

Sıvı su miktarı ölçümü ile ilgili ilk sistem, 1952 yılında, Nell ve Steinmetz tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada MgO kaplı slaytlarla damlacık boyut dağılımı belirlenmiş ve sıvı su miktarı hesaplanmıştır. Weickman ve aufm Kampe tarafından küçük cumulus bulutları içindeki sıvı su miktarı değerleri ölçülmüş, bu değerlerin yükseklikle değişiminin, sıcaklık değişimine benzer olduğu gözlenmiştir [42]. Daha sonra Robert Knollenberg (1971), sıvı su miktarını sıcak telli bir sistemle ölçmüş, optik partikül boyut spektrometresinin sonuçları ile karşılaştırmış ve sonuçların birbirine yakın olduğunu bulmuştur. Gerek bulutların tohumlanması, gerekse bulut mikrofiziği konusundaki çalışmalarda ana parametrelerden birisi olan sıvı su miktarını ölçmek amacı ile King tarafından geliştirilen, ince bakır telli sıvı su miktarı sensörü uçuşlarla denenmiştir. Bu sensör oldukça ucuz ve hassas olmakla beraber, sistemin kontrol devresi çok karmaşıktır. Bulut sıvı su miktarı ve damlacık konsantrasyonunun ölçümü, su ve buz partiküllerinin büyüme olayının anlaşılması açısından da önemlidir. Sıcak telli sensörlerde sıvı su miktarı, telin ısıtılması için gerekli güçle orantılı olarak belirlenir. Aynı prensiple çalışan dört sensör ASSP (Axially Scattering Spectrometer Probe), JW (Johnson-Williams), CG (Cloud Gun), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) bir araştırma uçağının (beachcraft) burun ve yan pencere civarına monte edilerek aynı anda denenmiş ve ASSP'nin diğer sensörlere nazaran daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir (Vali). Sıcak bulutlar içindeki dinamik yapı ve türbülansla karışım, ve yağış yapmayan küçük cumulus bulutlarının taban ve tepeleri incelenmiş,

gözlenen damlacık spektrumu, adyabatik parsel modeli hesapları ile karşılaştırılmıştır. Özellikle, bulut tepe ve tabanlarında entrainment olayının bulut damla konsantrasyonuna etkisi incelenerek, gözlem sonuçları ile bulut model sonuçlarının birbirine yakın olup olmadığı araştırılmıştır [17, 27]. Sıvı su miktarı ile ilgili çalışmaların sonuçlarına göre sıvı su miktarının düşey değişimi düşey hava hızı değişimi ile yakından ilişkili olup, (Warner, Squires, Ackerman, Zaitsev ve Vulfson) bulut tabanından itibaren sıvı su miktarı yükseklikle artmakta, bulutun üst yarısında maksimuma ulaşmakta, sonra tepeye doğru tekrar azalmaktadır [15]. (Bu sonuçlar, tezde verilen ölçümlerin analiziyle de uygunluk göstermektedir [42-48]).

Kararlı koşullarda, Ontario Gölü üzerindeki kararlı tabaka NCAR (Bufalo) uçağı ile gözlenmiş, rüzgâr hızı, potansiyel sıcaklık ve karışma oranının 3000 metreye kadar değişimi, tepelik arazinin rüzgâraltı kısmındaki etkiler incelenmiştir (Telford, Wegener 1976) [48]. Plauch, Colorado cumulus bulutları içindeki entrainment mekanizmasını incelemiştir. Bulut ve çevresinin özellikleri, NCAR/NOAA Explorer planörü, rawinsonde yardımı ile NHRE (National Hail Research Experiment) verileri kullanılarak incelenmiştir. Buluta giren havanın gözlem seviyesinin birkaç kilometre yukarısından kaynaklandığı gözlenmiştir [17, 28]. Yaz mevsimi boyunca Roma'da görülen ısı adaları, 300 metreye kadar sıcaklık, nem ve rüzgâr ölçümleri, yer ve yukarı seviye verileri (3 saatlik radyosonde gözlemleri) yardımı ile incelenmiştir (Colacino) [17].

CCOPE (Cooperative Convective Precipitation Experiment) gözlemleri sırasında karasal cumulus bulutları içindeki bulut damla spektrumu ve bulut içindeki karışma olayı incelenmiştir (David, Rogers, 1982) [17]. Bulut içindeki hareket alanlarını ve mikrofizik konuları incelemek amacı ile bulut fiziği ile ilgili aletler, bir planöre (Blanik), monte edilmiştir. Sıvı su miktarı FSSP (Forward Scattering Spectrometer Probe) ölçümlerinden, basınç hızı değişimi variometreyle, nem ise kapasitif bir sistemle belirlenmiştir [41]. Bulut içindeki ve civarındaki hız ölçümü amacı ile cirooskop ve düşey akselerometre kullanılmıştır (Telford, Wagner, Radke). Lawson, uçağa monte edilmiş VAVS (Vertical Air Velocity System), INS (Inertial

Navigation System), dūşey akselerometre ve cirooskop kullanarak, dūşey hava hızını ölçmüştür. Diğer bir çalışmada atmosferik sınır tabakada dūşey hız salınımlarını ölçmek amacı ile bir planör variometresi küçük bir uçağa monte edilmiş ve ölçümler yapılmıştır [39].

Konu ile ilgili teorik (model) çalışmalara gelince, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra cumulus bulutları ile ilgili çalışmalar günden güne gelişmiş, entrainment olayını içeren model çalışmaları hız kazanmıştır. Sonuçta, cumulus bulutlarının gözlenmesi ve modellenmesi ile ilgili çalışmalar yardımı ile cumulus bulutlarının diğer olaylarla etkileşimleri incelenmiştir. Bulut dinamiğinin anlaşılması amacı ile genelde kinematik ve dinamik olmak üzere iki tip model üzerinde durulmaktadır. Kinematik model, orografik ve dalga bulutlarının yapısı ve bulut kimyası ile ilgili konuların anlaşılmasında yararlı olmaktadır (Kessler, 1969; Scott, Hobbs, 1977; Rutledgretz, Hobbs, 1983). Dinamik modelde ise hava hızı bileşenleri hesaba katılmakta, moleküler etkiler ihmal edilmekte, Newton'un ikinci kanunu kullanılmaktadır. Konvektif bulutların modellenmesi, tabaka bulutlarının modellenmesinden farklı olmakta, Eulerian koordinat sistemi yerine, Lagrangian sistemi gözönüne alınmaktadır [17].

Weinstein ve Mc. Cready (1969), 1-boyutlu Lagrangian cumulus modeli ile hesaplanan bulut yükseklik değerleriyle radar gözlemlerini karşılaştırmıştır. Model, taban yüksekliğinin öngörüsü için iyi sonuç vermiştir. Simpson ve Wiggert, 1-boyutlu cumulus modelini bulut tepe gözlemleri ile karşılaştırmıştır. Bulut tepeleri fotoğraf ve uçuş gözlemleri ile belirlenmiştir. Modelde donma seviyesi, buz fazı ve yoğunlaşma hesaplanmış, bulut yüksekliği tahmin edilmiştir [39]. Houze, 1-boyutlu Lagrangian cumulus modeli ile bulut içinde hareket eden tek bir hava parselinin değişimini incelemiştir. 1-boyutlu Eulerian cumulus modelinde ise bulutun her seviyesinde, yatay değişim gözönüne alınmıştır. Asai, Kasahara (1967), Ogura Takahashi (1971), Scott ve Hobbs (1977), Cheng (1981), cumulus bulutunun taban yarıçapı "a" olan bir silindir boyunca yükseldiğini kabul etmişlerdir. Cumulus konveksiyonu ile ilgili 1-boyutlu ve zamana bağlı parametrik bir model Lopez tarafından geliştirilmiştir [17,39]. Bu modelde bulut çevresi, laboratuvar simülasyonları ve teorik

bilgiler kullanılarak parametrize edilmiştir. Model, farklı başlangıç koşullarında cumulus bulutlarının tüm evrelerini açıklamaktadır. Simpson ve Weinstein-Davis tarafından 1-boyutlu Lagrangian model, Asia ve Ogura tarafından ise 1-boyutlu Eulerian model geliştirilmiştir. 2-boyutlu cumulus modellerinde, entrainment ve detrainment hesabı katılmış, buluta giren ve çıkan hava parselleri gözönüne alınmıştır. 2-boyutlu Eulerian cumulus modeline bir örnek olarak, yukarı ve aşağı sürüklenmelerin ve yere ulaşan yağış olayının incelendiği Orville ve Sloan'ın modeli (1979) verilebilir. 3-boyutlu cumulus modelinde Wilhelmsen (1974), kuvvetli bir oraj bulutunun yapısını ve x, y, z yönünde değişimini simüle etmiştir. Taylor, Baker ve Jensen, eksene göre simetrik bir model kullanarak, CCOPE bulutlarında entrainment olayını incelemiştir [17].

Businger, konvektif atmosferik sınır tabakada, termal hareketleri, konvektif sınır tabakanın enerjisini ve akıları hesaplamıştır. Smeda, sınır tabakada, termodinamik ve momentum eşitliklerinden yararlanarak, potansiyel sıcaklık ve ortalama rüzgârın değişimini incelemiştir. Matveev, konvektif bulutları dinamik olarak modellendirmiş, düşey hızın maksimum değere ulaşınca kadar muntazam bir şekilde arttığını göstermiştir [22] (Bu yapı, tezin dördüncü bölümünde verilen 1-boyutlu termal-cumulus modeli sonuçlarında da görülmüştür). Kuo, Arakawa ve Schubert, bulutların biraraya toplanmış durumunu parametrize etmeye çalışmışlardır.

Heimann (1983) bir PC için uygulanabilen bir termal aktivite öngörü programı geliştirmiştir [28]. Bu model, özellikle plannör uçuşları için gerekli olan lokal, meteorolojik parametrelerin kısa vadeli öngörüsü için kullanışlı bir modeldir. Burada radyosonde verileri kullanılmış, basınç, sıcaklık, çığ noktası sıcaklığının düşey profili her 200 metre için interpolate edilmiştir. Yatay adveksiyon, lokal ısınma gözönüne alınarak, basit bir dinamik model ile konvektif aktivite simüle edilmiştir. Termodinamiğin birinci kanunu, düşey hareket eşitliği, su buharı ve bulut damla konsantrasyonu eşitlikleri kullanılmış, türbülans ve dinamik entrainment olayı parametrize edilmiştir (Ogura ve Takahasi, 1971). Model, düşey hızı, yoğunlaşma seviyesini ve konveksiyon yüksekliğini vermektedir. Modelde,

termal hareketlerin yeryüzü ile yere yakın tabaka arasındaki "1" derecelik sıcaklık farkı ile başladığı kabul edilmiş, elde edilen düşey hız değerleri 1.5-3 m/s arasında değişmiştir. Model dağlık bir arazi için, PC'lerin taşınma kolaylığı ve çok fazla data gerektirmemesi nedeni ile pratik bir modeldir ve 29. Rokenberg Planör Haftası'nda başarı ile denenmiştir [28]. Heimann'ın geliştirdiği model ile tezin dördüncü bölümünde verilen model arasındaki başlıca benzerlik, her iki programda da radyosonde verilerinin kullanılmasıdır. Ayrıca Heimann, modelinde konvektif aktivitenin zamansal değişimi, tezde ise, konvektif aktivitenin düşey değişimi incelenmiştir.

Şimdiye kadar yapılan bu çalışmalar ışığında GARP (Global Atmospheric Research Programme) ve GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment) özellikle bulut alanlarındaki enerji transferinin incelendiği çok büyük projelerdir [6, 7].

BÖLÜM 2

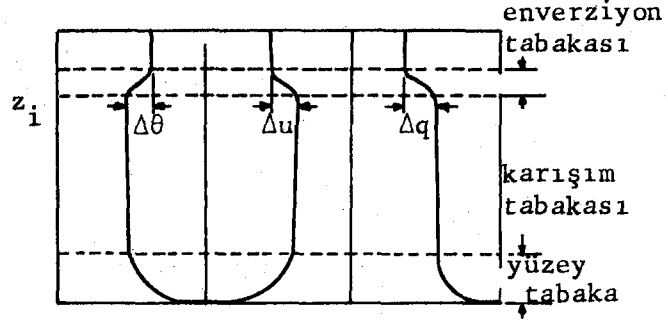
AŞAĞI TROPOSFERİN TERMİK VE DİNAMİK YAPISI

Aşağı troposferin yere yakın kısımları, yeryüzünün sürtünme etkilerinin önemli olduğu bir tabakadır. Yerden itibaren kalınlığı 1000-1500 metreye kadar olan bu tabakaya atmosferik sınır tabaka veya sürtünme tabakası denir. Bu da kendi içinde, yüzey tabaka (yerden itibaren 100-150 metrelik tabaka) ve Ekman (spiral) tabakası olmak üzere iki alt bölüme ayrılır. Atmosferik sınır tabaka, türbülanslı bir yapıya sahiptir. Bu tabaka içinde hız, sıcaklık, nem ve türbülans özellikleri yer ve zamanla büyük değişim gösterir. Gözlemler sürtünme tabakasının türbülanslı yapısının yüzey koşullarından, özellikle sıcaklıktan önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir [8].

Konvektif hareketler sürtünme tabakasının alt kısımlarında başlamakta ve yüzey sıcaklığı ile sürtünme tabakası sıcaklığı arasındaki çok az bir fark, konvektif hareketlerin başlamasına neden olabilmektedir.

2.1. Aşağı Troposferin Termik ve Dinamik Yapısı

Şekil 2.1 de konvektif bir sınır tabakaya ait üç farklı düşey bölge görülmektedir. Yüzey tabakada, yerden itibaren 20-30 metrelik bölgede kuvvetli sıcaklık, hız ve nem gradyanı vardır. Konveksiyon şiddetlendikçe bu tabakanın kalınlığı azalır. Yüzey tabakanın yukarısında enverziyon tabakasına kadar uzanan bir karışım tabakası bulunur. Bu tabaka içinde ortalama düşey gradyanlar çok küçüktür.



Şekil - 2.1

Konvektif bir sınır tabaka içinde potansiyel sıcaklık (θ), rüzgâr hızının yatay bileşeni (u) ve özgül neme (q) ait ortalama düşey profiller.

Kararlılığın artması ile türbülans azalır ve profiller serbest atmosferdeki (sürtünme tabakasının üstündeki) koşullara yaklaşır. Şekil 2.2 de konvektif bir sınır tabakanın yapısı, girdap hareketleri ve enverziyon tabakası görülmektedir.



Şekil - 2.2

Konvektif bir sınır tabakanın yapısı. 1.5 km yükseklikte ince bir enverziyon tabakası bulunmakta, bunun altındaki tabakada girdaplar nedeniyle katılım olayı meydana gelmektedir.

2.2. Bir Hava Parseline Etki Eden Kaldırma Kuvvetleri

Atmosferik sınır tabakanın yapısı ve kalınlığı, günlük ısınma miktarına ve sinoptik koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sınır tabakanın sınıflandırılmasında kaldırma kuvvetleri esas alınmaktadır [8, 9].

Sıcaklığı T , yoğunluğu ρ ve hacmi V olan bir kuru hava parselinin, T_a sıcaklığında ve ρ_a yoğunluğundaki çevre hava içinde yükseldiğini kabul edelim. Parsele, aşağı doğru etki eden kuvvet $\rho g V$;

parselin yerini alan çevre hava üzerine aşağı doğru etki eden kuvvet $\rho_e gV$ dir. Parsele etki edecek net kaldırma kuvveti ise; $Vg(\rho_e - \rho)$ olacaktır. Birim kütledeki kaldırma kuvveti [10]:

$$F_B = g \frac{\rho_e - \rho}{\rho} = g \frac{T - T_e}{T_e} \quad (2.1)$$

dir.

Parsel, çevre havadan daha sıcak olduğu zaman bu kuvvet pozitif, parsel çevresinden daha soğuk olduğunda ise bu kuvvet negatiftir. Nemli hava için, sıcaklık yerine virtüel sıcaklık alınarak, bağlantı genelleştirilebilir.

Eğer bir parsel, adyabatik olarak düşey yönde yukarı doğru hareket ederse, yukarı seviyede basınç azalması nedeni ile genişler, ve bunun sonucu olarak soğur. Kuru adyabatik durum için düşey sıcaklık gradyanı:

$$\gamma_d = - \frac{dT}{dz} = - \frac{g}{c_p} = - 0.98 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$$

dir.

Şayet hava doymamışsa ve aktüel sıcaklık gradyanı da γ ise tabaka;

- a- $\gamma > \gamma_d$ ise kararsız,
- b- $\gamma = \gamma_d$ ise nötr,
- c- $\gamma < \gamma_d$ ise kararlıdır.

Şayet doymuş hava ise, böyle bir parsel yukarıda doğru yer değiştirdiğinde, sıcaklığı psedö adyabatik olarak azalır. γ_s , doymuş havanın aktüel düşey sıcaklık gradyanı olmak üzere;

- a- $\gamma < \gamma_s$ ise mutlaka kararlı durum,
 - b- $\gamma = \gamma_s$ ise nötr durum,
 - c- $\gamma_s < \gamma < \gamma_d$ ise, şarta bağlı kararsız durum,
 - d- $\gamma > \gamma_s$ ise mutlaka kararsız durum
- sözkonusu olur [8, 11, 12].

a- Kararsız durum: Bulutsuz günlerde, normal olarak, kara yüzeyleri gelen güneş radyasyonu nedeni ile yukarı seviyelere nazaran

daha fazla ısınmaktadır. Yüzey yakınında bulunan hava ısınarak, kaldırma kuvvetlerinin ve konvektif türbülanslı hareketlerin başlamasına neden olur. Bu durumda kararsız bir tabakalaşma görülür. Konvektif sınır tabakanın orta bölgelerinde, genellikle kararlı bir tabakalaşma söz konusudur [8, 13].

b- Nötr durum: Eğer tabakadaki sıcaklık değişimi, adyabatik sıcaklık gradyanına eşit ise, potansiyel sıcaklık yükseklikle sabittir. Bundan dolayı yüzey nemi ve düşey ısı akıları ihmal edilebilir mertebededir. Yer değiştirmekte olan parseller, çevreleri ile aynı yoğunluğa sahip olacak ve bunun sonucunda kaldırma kuvveti sıfır olacaktır.

c- Kararlı durum: Yaklaşık olarak 4 kilometrenin aşağısında bulunan bir enverziyon tabakası, nötr tabakanın yapısını etkileyecektir. Ayrıca, yüzeyde soğuma varsa, düşey (negatif) ısı akıları, bu tabakanın yapısını önemli ölçüde etkileyebilir. (Eğer bir parselin sıcaklığı yükseklikle, çevre havaya nazaran daha yavaş azalmaktaysa, parsel başlangıç konumuna dönmeye zorlanacaktır.) Bu durumda, kararlı bir tabakalaşma oluşacaktır. Gece süresince, radyatif ısı kaybı nedeni ile kara yüzeyleri soğuyacak, yüzey yakınında bulunan hava soğuyarak, aktüel düşey sıcaklık gradyanı, kuru adyabatik düşey sıcaklık gradyanından büyük olacaktır. Bu durum türbülansın yapısı üzerinde kuvvetli bir dinamik etki yapacaktır [14-16].

2.3. Termal Teorisi ve Katılım (Entrainment) Olayı

Kaldırma kuvvetleri veya mekanik kuvvetlerden doğan düşey hareketler, konvektif hareketleri başlatırlar. Cumulus bulutları (veya konvektif bulutlar) kaldırma kuvvetleri ile oluşurlar. Bu durumda, yer yüzeyinde ısınma ve yukarı seviyedeki soğuma nedeni ile kararsız bir tabakalaşma olur. Kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğü ve çevre hava ile etkileşimleri önemlidir. Küçük bir nokta kaynaktan oluşan ve kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle yükselen akışkan elemanları termal (bubble) ve hüzme (plume) olmak üzere iki tipik yapı göstermektedir (Şekil 2.3). Çok küçük kaldırma kuvvetleri durumunda hareket hemen hemen laminerdir. Yükselmekte olan termalin dış yüzeyindeki hareket türbülanslıdır. Yükselen elemanların sınırlarında kayma dolayısıyla

2.3.1. Termallerin Özellikleri

Eksene göre simetrik bir termalin çevresi ve iç kısmındaki sirkülasyon Şekil 2.5 de görüldüğü gibidir. Düşey hız ve yarıçapla orantılı olan hız alanı termalin yaşamı boyunca aynı kalmaktadır [10]. Böyle bir termal, tepesi "0" noktasında olan bir koni içinde yukarı doğru hareket etmektedir. Tepe açısı yaklaşık 12° olan koni içinde kalan akışkan, termale yukarıdan, tepe açısı 12° ile 15° olan koniler içindeki akışkan termale alttan katılmaktadır. Termalin üst kısmındaki bölge türbülanslıdır. Bu nedenle çevre akışkanın önemli bir kısmının termale üstten katıldığı görülmektedir. Söz konusu tepe açıları 8° ye kadar düşebildiği gibi 26° ye kadar da ulaşabilir. Genellikle çevre akışkanın % 50 - % 70 i termale üstten girmektedir ve termal içindeki yoğunluk dağılımı üniform değildir [10].

2.3.2. Rüzgârın Termallere Etkisi

Konvektif tabaka içinde rüzgâr yoksa, termaller rüzgârlı koşullara nazaran daha uzun sürer ve oldukça geniş alanlara yayılabilirler. Ancak, bu durumda termallerin oluşma olasılığı da azdır. V, yatay hız olmak üzere [18]:

a- hafif rüzgâr ($V < 10$ Kts) durumunda, içinde yükselici akımlar bulunan geniş termaller oluşur,

b- orta rüzgâr ($10 < V < 20$ Kts) durumunda meydana gelen türbülans, termallerin dağılmasına neden olur,

c- kuvvetli rüzgâr ($V > 20$ Kts) durumunda, üzerlerinde gelişmiş cumulus bulutları olmayan, kısa ömürlü termaller oluşur.

Rüzgâr kaymasının termallere etkisi ise Şekil 2.6 da görülmektedir.

2.3.3. Yükselen Bir Parsele Katılım Olayının Etkisi

Bir parsele çevre havanın katılımına "entrainment" denmektedir. Bunun tersi, yani yükselmekte olan parselin bir kısmının çevre havaya katılması da mümkün olabilir. Çevre havanın termale veya yükselen bir hava kütesine katılma hızına "katılım hızı" denir. M, termalin kütlesi, t zaman olmak üzere;

Burada EE', hava parselinin çevresine ait durum eğrisini ve AD, doymuş adyabatı göstermektedir. Eğer parsel, A noktasından itibaren karışım olmaksızın yükselirse, bu eğriyi izler (a- süreci). Bu yükselme sırasında çevre havanın % 50 sinin parsele girdiği ve parselin kendi kütlelerinde bir kayıp olmadığı kabul edilmektedir. P_1 seviyesinde izobarik karışma meydana gelir (b- süreci). E ve A- daki hava kütlelerinin kabul edilen oranlarda karışması ile B noktası bulunur. Bu örnekte BA, EA- nın 1/3 üdür. T_B sıcaklığı, T_E ve T_A sıcaklıklarının ağırlıklı ortalamasıdır. Parsel doyuncaya kadar (S seviyesine kadar) kuru adyabat boyunca yükselir ve iner (c- süreci). Parsel doyma seviyesinden iniyorsa, P_1 seviyesinde C- noktasına, yükseliyorsa P_2 seviyesinde A' noktasına ulaşır. A' noktasına ulaşan parsel, benzer şekilde karışarak ve buharlaşarak, C' noktasına gelir. Şekil 2.7 deki CC' eğrisi, P_1 - P_2 basınç seviyeleri arasında yükselmekte olan parselin, çevre havanın katılımı nedeni ile izleyeceği gerçek (düzeltilmiş) yörüngesini vermektedir.

Katılım olayı, cumulus konveksiyonunun zamanla değişiminde önemli rol oynar. Eğer cumulus bulutu içine giren çevre hava çok kuru ise, bulutun gelişme safhasının başlangıcında katılım olayının tersi (erozyon olayı) sözkonusudur. Buharlaşma nedeni ile yükselen parselde etki eden kaldırma kuvveti azalır. Katılım olayında ise özgül sıvı su miktarında azalma sözkonusudur. Bu nedenle, maksimum hız ve maksimum sıvı su miktarı bölgeleri bulutun iç kısmında gözlenir. Katılım olayı nedeni ile bulutlar genellikle piramit görünümü alırlar.

2.3.4. Konvektif Bulutlar ve Termallere Etkisi

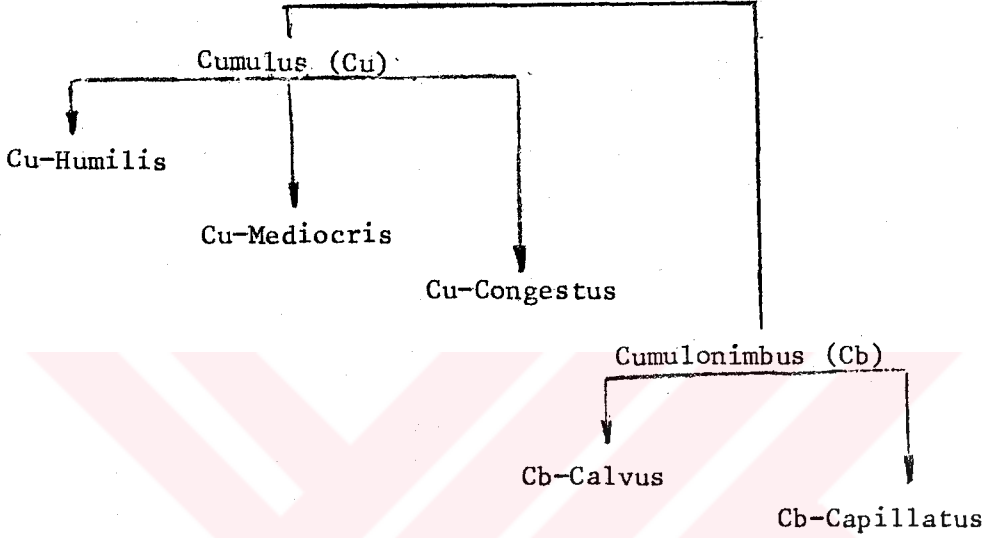
Cumulus bulutları dik gelişimli (konvektif) bulutlardır. Nispeten alçak olan tabanlarından itibaren yukarı doğru gelişirler. Bu gelişim bazen çok süratli ve çok yüksek irtifalara kadar olabilir. Bu bulutlar, konvektif hareketlerle taşınan hava kütlelerinin yoğunlaşma seviyesine ulaşmasıyla oluşurlar.

Atmosfer içinde "konvektif hareketler" konusu⁽¹⁾ karmaşık bir konu olup, düşey hareketlere ilâveten, türbülanslı hareketlerin varlığı ile daha da karmaşık olmaktadır.

(1) Meteorolojide konvektif hareketler genellikle düşey konvektif hareket olarak tanımlanır.

Konvektif bulutlar, Tablo 2.1 de görüldüğü gibi çeşitli bulut sınıflarına ayrılabilir. Bu çalışmada, cumulus bulutlarının en basit türlerinden Cumulus-Humilis ve Cumulus-Mediocris bulutlarında ve civarlarında ölçümler alınmıştır.

Tablo - 2.1
Konvektif Bulutlar



Karalar üzerinde konvektif bulutlar genellikle, termallerin yükselerek yoğunlaşma seviyesine ulaşması ile oluşurlar. Termaller, civarlarındaki daha soğuk ve kuru hava ile karışarak ve yükselerek yüzlerce metreye yayılabilirler. Bulut taban seviyesinin yukarısında yoğunlaşma gizli ısısının açığa çıkması, yükselen kütlelere etki eden kaldırma kuvvetlerini artırır [19-25].

Herhangi bir anda, büyük bir cumulus bulutu içinde, çok sayıda aktif termal bulunabilir. Bir bulutun kenarlarında veya tepesinde termaller kuleler oluşturduğunda, damlacıkların hızla buharlaşması sonucu yukarı doğru olan akışlar zayıflar ve inici akışlar meydana gelir.

Bulutların kalınlığı, başlangıçtaki kaldırma kuvvetine, karışma olayına, civar hava içindeki sıcaklık ve nem dağılımına bağlıdır. Bulut tabanının aşağı kısmında, açık hava içinde, sıcaklığın yükseklikle azalması (düşey sıcaklık gradyanı), bulut içine

nazaran daha fazladır. Cumulus bulutlarının tabanları yaklaşık, 0.8-1.5 km, tepeleri ise 6-7 km dolayındadır. Kalınlıkları birkaç yüz metre ile birkaç kilometre arasında değişebilir. Çoğunlukla yağış yapmazlar [19-22]. Yeni gelişmiş cumulus bulutlarının yatay ve düşey boyutları sadece 1 veya 2 km kadardır. Bu çalışmada incelenen Cumulus-Humilis bulutları, sadece zayıf bir düşey gelişmeye sahip cumulus'lerdir. Genellikle yassılaştırmış, düzleşmiş olarak görülürler. Minimum kalınlıkları 150 metre kadardır. Cumulus-Medio-cris bulutları ise tepeleri az gelişmiş çıkıntılar gösteren, zayıf düşey gelişmeli cumulus'lerdir. Her iki bulut tipinin tabanları 400-2000 metre arasında değişmektedir. Ortalama kalınlıkları ise 1600 metre kadardır. Cumulonimbus bulutlarında kalınlık 10 km veya daha fazla olabilir.

2.3.4.1. Kapalılık ve Termallere Etkisi

Orta ve yüksek seviye bulutları termallerin gücünü⁽¹⁾ zayıflatır [18]. Cumulus bulutu kapalılığının termallere etkisini şu şekilde sıralayabiliriz:

a- (1/8)-(3/8) Cumulus Bulutu: Bu tür küçük cumulus bulutları, güneş radyasyonunun yeryüzüne ulaşmasını biraz etkilerse de bu bulutların çoğunun alt kısımlarında termaller bulunabilir.

b- (4/8)-(6/8) Cumulus Kapalılığı: Güneş radyasyonunun önemli ölçüde azalmasına sebep olur ve sonuç olarak bulutların daha az bir bölümünün aşağı kısmında termallere rastlanır.

c- (7/8)-(8/8) Cumulus Kapalılığı: Güneş radyasyonu önemli ölçüde azalır ve yükselici akımların çoğu kaybolur. Mevcut birkaç termalin bulunduğu yerin belirlenebilmesi için büyük alanların araştırılması gerekir.

2.3.4.2. Diğer Meteorolojik Koşulların Termallere Etkisi

a- Yere yakın tabakalarda soğuk hava adveksiyonu: Kara üzerinde soğuk ve sık bir tabaka varken, denizlerden karasal bölgelere doğru daha kararlı bir hava kütlesi yayılmakta ise, karasal bölge üzerindeki termal aktivitesi önemli ölçüde azalır.

(1) Termal gücü, termal içindeki düşey hıza bağlı olup, a- 0.5-1 m/s ise zayıf; b- 1-3 m/s ise orta ve c- > 3 m/s ise kuvvetli termal olarak sınıflandırılırlar [18].

b- Yüksekte sıcak hava adveksiyonu: Yerden 1000-2000 metre yukarıdaki seviyelerde, sıcak hava adveksiyonu varsa, bu durum, termallerin zayıflamasına, termallerin tavan seviyelerinin düşmesine ve öğleden sonra termallerin daha erken yok olmasına neden olur.

c- Yağış: Bu durumda güneş radyasyonunun büyük bir kısmı yeryüzünün neminin buharlaştırılması için harcanır. Bunun sonucunda, yerden yukarıya doğru olan ısınma yavaşlar. Bir önceki gece önemli ölçüde yağış olduysa, bir sonraki gün termallerin oluşumu gecikir. Eğer yoğun bir sağanak kaydedilmişse, termallerin yeniden oluşması için uzun bir sürenin geçmesi gerekebilir.

2.4. Bulut Modelleri

Bu çalışmada bulut modelleri mezo ölçekte ele alınmıştır. Mezo ölçek, yatay olarak 100-300 km arasında, düşey olarak 20-30 metreden tropopoza kadar uzanmaktadır. Zamansal olarak da 1-12 saatlik periyotlar sözkonusudur. Mezo ölçeğin yatay mesafesi, radyosonde istasyonları arasındaki mesafeden küçük, tek bir kümülüs bulutunun yatay büyüklüğünden önemli derecede büyüktür [6, 7].

2.4.1. Bulut ve Termal Modelleri İçin Temel Denklem Takımları

Genel olarak bir bulut modeli içindeki mikrofizik, dinamik ve termodinamik parametreleri belirleyen bir denklem takımı olup, kütlelerin korunumu, ısıнын korunumu, hareket eşitliği, nemin korunumu, diğer gaz ve aerosollerin korunumu bağıntıları hesaba katılarak oluşturulabilir [26-28]. Modeller başlıca iki amaçla kullanılmaktadır:

- a- Model öngörülleri ve gözlemler arasında karşılaştırma yapmak ve bulut süreçlerini açıklamak,
- b- Amaçlanan deneyleri veya atmosferik olayları simüle etmek.

Tüm bulut parametrelerinin yer ve zamanla değişimini açıklayan gerçekçi ve tek bir model yoktur. Modeller daima yaklaşımlar şeklindedir.

Genel halde bir bulut modelindeki değişkenler Tablo 2.2 de verilmiştir.

Tablo - 2.2
Bir Bulut Modelindeki Değişkenler

	Değişken	Sembol	Birim
Termodinamik Değişkenler	Bulut iç basıncı	P	N/m^2
	Bulut yoğunluğu	ρ_c	kg/m^3
	Bulut sıcaklığı	T_c	K (veya $^{\circ}C$)
Mikrofizik Değişkenler	Damla konsantrasyonu	n_d	$1/m^3$
	Buz partikülü konsantrasyonu	n_i	$1/m^3$
Su içeriği ile ilgili değişkenler	Toplam özgül sıvı su miktarı	Q	kg su/kg bulut
	Özgül nem	q_v	kg buhar/kg bulut
	Özgül sıvı su miktarı	q_l	kg su /kg bulut
	Özgül buz miktarı	q_i	kg buz/kg bulut
	Hava hızı bileşenleri	u, v, w	m/s

2.4.1.1. Termodinamik Esaslar

Yoğunluğu (ρ_d), basıncı (p_d) olan kuru hava ve yoğunluğu (ρ_v), basıncı (e) olan su buharını gözönüne alarak, her ikisi için ideal gaz denklemi uygulanırsa;

$$\begin{aligned} p_d &= \rho_d R_d T \\ e &= \rho_v R_v T \end{aligned} \quad (2.5)$$

yazılabilir. Burada R_d ve R_v sırasıyla kuru hava ve su buharının gaz sabitleri, T aktüel sıcaklıktır. p nemli hava basıncı ($p=p_d+e$) olmak üzere

$$p \approx \rho_d R_d T_v \quad (2.6)$$

dir. Burada T_v virtüel sıcaklık olup,

$$T_v = T \left[1 + q_v \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) - q_i - q_\ell \right] \quad (2.7)$$

şeklindedir [17]. Burada q_v , q_g , q_i sırasıyla özgül nem, özgül sıvı su miktarı ve özgül buz miktarıdır.

Su ve buz üzerindeki doymuş buhar basıncı sırasıyla e_{sl} ve e_{si} olmak üzere Clausius-Clapeyron eşitliğine göre,

$$\frac{de_{sl}}{dT} = \frac{L_v e_{sl}}{R_v T^2} \quad (2.8)$$

$$\frac{de_{si}}{dT} = \frac{L_s e_{si}}{R_v T^2}$$

yazılabilir. Burada L_v yoğunlaşma gizli ısı, L_s süblimasyon gizli ısıdır.

(ξ) Tablo 2.2 deki herhangi bir parametreyi temsil etmek üzere, hareketi takiben türev;

$$\frac{D\xi}{Dt} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \xi \quad (2.9,a)$$

şeklinde olup, bu da

$$\frac{D\xi}{Dt} = \text{kaynak}_{(\xi)} - \text{kuyu}_{(\xi)} \quad (2.9,b)$$

şeklinde ifade edilebilir. Yukarıdaki eşitlikler bazı termodinamik parametrelere uygulanarak, bunların yer ve zamanla değişimlerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Kaynak ve kuyu terimleri ise bulut içindeki fiziksel süreçleri açıklamaktadır. Yoğunluk değişimini ifade etmek için (2.9,a) eşitliğinde ξ yerine kütle alınarak süreklilik eşitliği elde edilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.10)$$

Burada ρ yoğunluk, $\vec{V}$ ise hızdır.

Sıcaklık değişimini ifade edebilmek için (2.9,b) eşitliğini enerjinin korunumu şeklinde yazarak,

$$\frac{DH}{Dt} = \text{kaynak}_{(H)} - \text{kuyu}_{(H)} \quad (2.11,a)$$

elde edilir. H nemli havanın statik enerjisi olup,

$$H = L_v q_v - L_f q_i + gz + c_p T \quad (2.11,b)$$

şeklinde ifade edilir. Burada L_f donma gizli ısısı, c_p bulutun özgül ısısıdır. (2.11,a) ve (2.11,b) birleştirilerek (2.12) elde edilir.

$$\frac{DT}{Dt} = -\frac{gw}{c_p} + \frac{L_f}{c_p} \frac{Dq_i}{Dt} - \frac{L_v}{c_p} \frac{Dq_v}{Dt} + \frac{1}{c_p} \frac{DH}{Dt} \quad (2.12)$$

Bu çalışmada sıcak bulutlarla ilgilenildiğinden, eşitliklerdeki (q_i) özgül buz miktarı gözönüne alınmamıştır.

2.4.1.2. Mikrofizik Esaslar

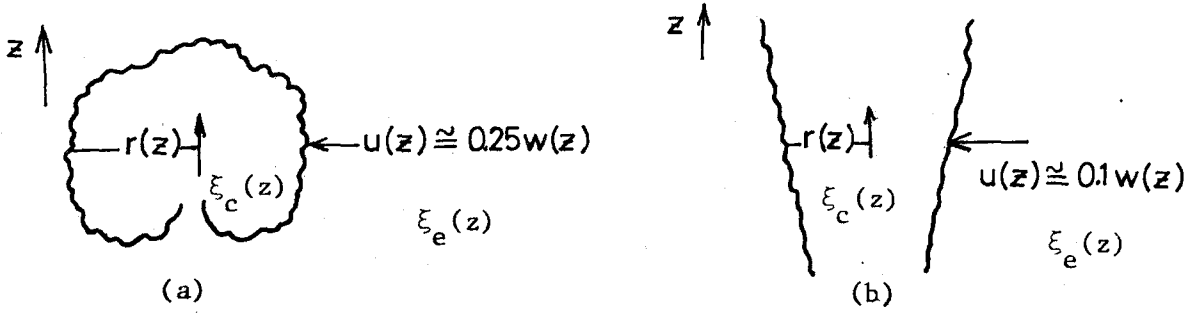
Damla konsantrasyonu ve buz partikülü konsantrasyonu, bulut içindeki mikrofizik değişkenleri oluşturmaktadır. Buharlaşma, yoğunlaşma, birleşme, çarpışma ve katılım gibi olaylar bu mikrofizik yapının değişmesine neden olmaktadır [17]. Burada gerek inceleme kolaylığı ve gerekse mikrofizik parametreler üzerinde daha etkili olması nedeni ile katılım olayı üzerinde durulmaktadır.

Türbülanslı hareketler çevre havanın bulut içine girmesine neden olurlar. Modellerde, bulutu çevresinden ayıran teorik bir sınır olduğu kabul edilmektedir. Konvektif bulutların modellenmesinde izlenen yol, bulut hacmi içinde model eşitliklerini çözmek ve bu hacmin sınırındaki katılım olayını parametrize etmektir. Çoğunlukla, konvektif bulutların bir termal veya hüzme şeklinde davrandığı kabul edilmektedir. Böyle bir akışta, çevre havanın bulut içine katılım hızı, sınırda yatay hava hızının düşey hızla orantılı olmasına dayanır [17, 29, 30]. $u_r(z)$: z seviyesindeki radyal hız, $w(z)$: z seviyesindeki düşey hız ve (α) bir orantı katsayısı olmak üzere,

$$u_r(z) = \alpha w(z) \quad (2.13)$$

yazılabilir. Burada hüzme için $\alpha=0.1$, termal için $\alpha=0.25$ dir.

Şekil 2.8, termal ve hüzme için katılım olayını şematik olarak göstermektedir. Burada her iki olay da kaynaklarından çok uzakta, ve nötr bir tabaka içinde gelişmektedir. Her iki durumda da yatay yarıçap (r), düşey mesafe (z) ile lineer bir şekilde artmaktadır [17].



Şekil - 2.8
Katılım Olayının Şematik Olarak Açıklanması
(a) termal (bubble), (b) hüme (plume)

2.4.1.3. Konvektif Bulutlar

Konvektif bulutların gelişmesinde, yukarı ve aşağı sürüklenmeleri oluşturan, yoğunluk salınımlarının rolü büyüktür [15, 22, 31]. Konvektif bulut modellerinde genellikle, hareket eden bir hava parseline dayalı Lagrangian koordinatların kullanılması ile bulut içindeki parselin özellikleri değerlendirilebilir. Difüzyon etkisi ihmal edilebilir düzeyde kabul edildiğine göre (2.9) eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{D\xi}{Dt} = \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \xi \quad (2.14)$$

Eğer parsel z eksenini boyunca hareket ediyorsa, (2.14) ifadesi,

$$\frac{D\xi}{Dt} = w \frac{d\xi}{dz} \quad (2.15)$$

şeklinde yazılır.

Bu kabuller sığ ve yağış yapmayan konvektif bulutlara uygulanabilir⁽¹⁾. Bulutun farklı bölgelerinde, eş zamanlı olarak meydana gelen olayları açıklamak gerekiyorsa ve (veya) buluttan düşen yağış ile ilgileniliyorsa, o zaman Lagrangian model uygun değildir ve cumulus bulutunun r yarıçaplı bir silindir içinde büyüdüğü kabulüne dayanan Eulerian model kullanılır [17].

(1) Bu çalışmada kullanılan 1-boyutlu Lagrangian cumulus-termal modeli, dördüncü bölümde açıklanmaktadır [17, 29].

BÖLÜM 3

DENEYSEL YÖNTEM VE ÖLÇÜM TEKNİĞİ

3.1. İnceleme Periyodu ve Ölçüm Yeri

Bu çalışmada, 1-boyutlu termal-cumulus modelinin sonuçlarının irdelenmesi ve meteorolojik parametreler arasındaki ilişkinin incelenmesi amacı ile uçak ve planör uçuşları vasıtasıyla ölçümler yapılmıştır.

İnceleme dönemi olarak (özellikle kararsızlık dönemi olması nedeni ile) bahar ayları seçilmiştir. Bu amaçla İnönü (Eskişehir)'de 3-5/8/1983, 24-26/8/1983, 27-30/9/1985 ve 17-18/6/1986 tarihlerinde ölçümler yapılmıştır. Bölüm 2 de belirtilen elemanlara ait bu ölçümler meteorolojik aletlerle donatılmış uçak ve planör uçuşları yardımıyla yapılmıştır [32-35].

3.2. Araştırmanın Ölçeği

Konu ile ilgili çalışmalar iki ayrı ölçekte sürdürülmektedir. Bu ölçeklere ait genel inceleme alanları şöyle sıralanabilir [6-7]:

a- Mezo Ölçek (10-100 km): Bu ölçekte, bulutlu ve nemli bölgeler, yatay rüzgâr, sıcaklık, düşey hareket ve yağış olayı incelenmektedir.

b- Cumulus Ölçeği (1-10 km): Bu ölçekte, bulut istatistiği, yatay rüzgâr, sıcaklık, düşey hız, sıvı su miktarı ve su buharı, düşey akılar, mikrofizik ölçümler incelenmektedir.

Bu çalışmada, mezo ölçekte yatay sıcaklık ve nem alanları ve düşey hareket; cumulus ölçeğinde ise düşey hız ve sıvı su miktarı konuları incelenmiştir.

3.3. Ölçülen Büyüklükler ve Kayıt Yöntemi

Termallerin ve cumulus bulutlarının incelenmesi amacıyla içlerinde ve çevrelerinde, uçak ve planörlerle sıcaklık, bağıl nem, bulut sıvı su miktarı ve düşey ivme ölçülmüştür. Ayrıca bu değerlerle eş zamanlı olarak, uçuş irtifası, uçuş hızı ve uçağın düşey yer değiştirme hızı da kaydedilmiştir. Çeşitli ölçüm uçuşları sırasında ölçülen parametreler, ölçüm aletlerinin kapasiteleri, hassasiyeti gibi büyüklükler Tablo 3.1 de verilmektedir. Yukarıda sözkonusu olan parametrelerin ölçümünü kaydetmek için elektronik bir kayıt sistemi (CR-21 Micro-logger) kullanılmıştır. Bu sistem sıcaklık, bağıl nem ve akselerometre çıkış değerlerini (volt veya milivolt olarak) her 0.1 veya 0.2 saniyede bir okumakta ve bir dakikalık ortalama değerleri kaydetmektedir. Bu çalışmada kullanılan kaydedici sisteme, diğer aletlere ve inceleme bölgesine ait bilgiler EK-A da verilmektedir [36-39].

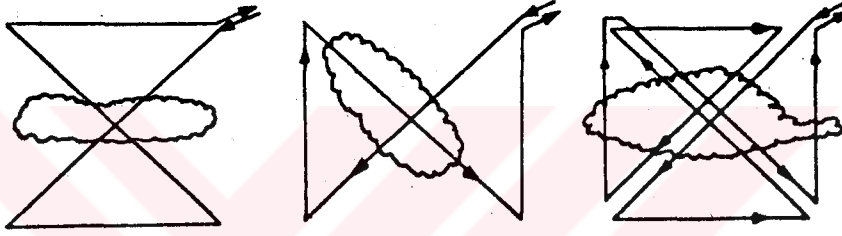
Tablo - 3.1
Ölçülen Büyüklükler ve Kullanılan Aletler

Ölçülen Parametre	Aletin Tipi	Kapasitesi	Hassasiyeti	Çıkış Voltajı
Sıcaklık	Termokupl (cr-al)	0-45°C	% 5	0-1.2V
Bağıl nem	Nem ölçer (HM-14 Vaisala)	0-%100	% 1.5	0-100mV
Düşey ivme	Akselero- metre (3- eksenli, 971-4193-001)	(-3g)-(+3g) düşey, ($\pm 1g$ yatay)	% 1	200mV-5V
Sıvı su miktarı	Sıcak tel (pt) sistemi	0.5-1.2 g/m ³	% 10	0-2.5 V
Uçuş hızı uçuş yönü uçuş irti- fası	<PUCHACZ SIAT CESSNA - 207>	-	-	-
Kayıt sistemi	Micro- logger (CR-21)	9 kanal	$\pm 5\mu V(mV)$ giriş $\pm 1mV(V)$ giriş	-

3.4. Ölçüm Tekniği, Kullanılan Aletler ve Sensörler

Termal içi ve bulut çevre havası ölçümleri sırasında, uçuş hızı ve yüksekliği sabit tutularak CR-21 micro-logger'ı vasıtasıyla kayıtlar alınmıştır.

Termal ve bulut içinde ve çevresinde uygun ölçümleri almak için uçuş planı Şekil 3.1 de görüldüğü gibi kelebek uçuşu şeklinde düzenlenmiştir. Kelebek uçuşunda, dış kenarlar ve köşegenlerin yönü ölçüm sayısını maksimum kılacak şekilde seçilmiştir.



Şekil - 3.1
Kelebek uçuş planı

Uçuş esnasında ölçümler aşağıdaki yollarla alınmıştır:

a- Yerdeki sabit bir röper noktasına göre ölçümler tekrarlanmıştır,

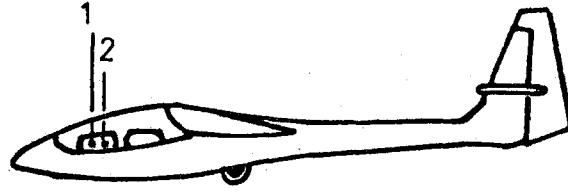
b- Bir cumulus bulutunun yapısını daha iyi ortaya koymak amacıyla, bu bulutun muhtelif kesitlerinde ardı ardına ölçümler alınmıştır,

c- Hareket halindeki termal veya cumulus bulutlarında yarım veya tam bir sekiz çizilmiş, sistemin aynı bölgesinde kalınması sağlanarak ölçümler alınmıştır.

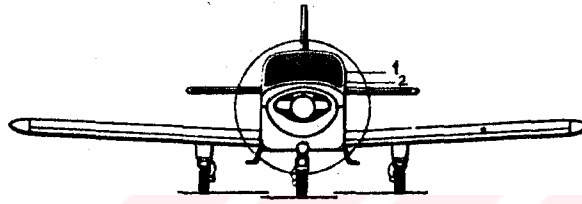
Tablo 3.1 de belirtilen ölçüm aletlerinin planör ve uçaklarda monte edildiği yerler Şekil 3.2 de görülmektedir.

3.5. Sıvı Su Miktarı Ölçeri

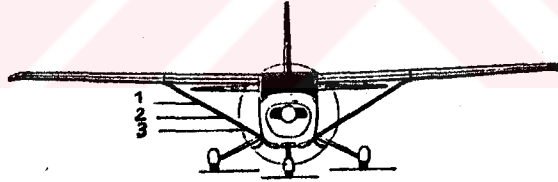
Bulut fiziği ile ilgili parametreler içinde ölçümü en zor olanlarından birisi bulut içindeki sıvı su miktarıdır. Bu konunun incelenmesi, uçak buzlanması ve bulut oluşum mekanizmasının anlaşılması açısından da çok önem taşımaktadır [22, 24, 29]. Son yıllarda bu



(a)



(b)



(c)

Şekil - 3.2.

Sensörlerin montaj planı

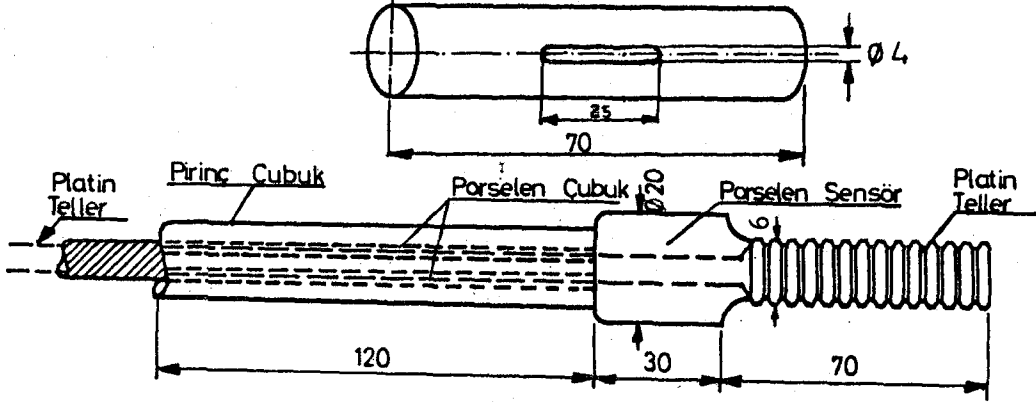
a- Puchacz-SZD50, b- Siat, c- Cessna-207, (1) sıcaklık sensörü, (2) bağıl nem sensörü, (3) sıvı su miktarı sensörü

konu ile ilgili olarak, çeşitli sistemler üzerinde çalışılmaktadır. Henüz sağlıklı ve ucuz bir sistem geliştirilememiştir [42].

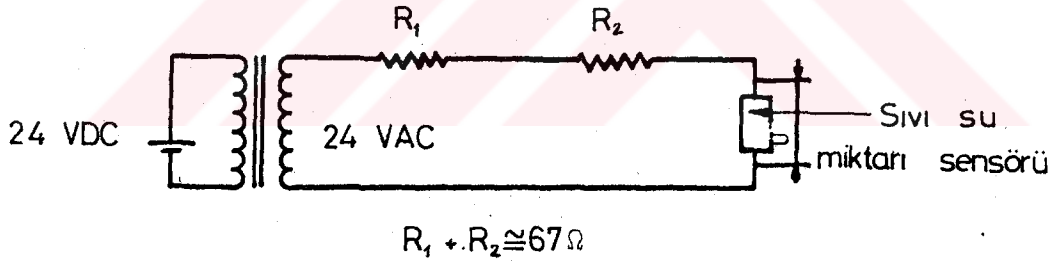
Bu çalışmada bulut içindeki sıvı su miktarını ölçmek için ilk defa aufm Kampe tarafından denenmiş bir sistemde bazı değişiklikler ve iyileştirmeler yapılmış ve sensör, cumulus-humilis ve mediocris bulutlarının hava tüneline simülasyonu ile kalibre edilmiştir [42].

3.5.1. Sistemin Tasarımı

Sıvı su miktarı ölçeri, ısıtılmış tel prensibine dayanan hassas bir elemandan ibarettir (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4).



Şekil - 3.3
Platin telli sıvı su miktarı sensörü
(Birimler-mm)



Şekil - 3.4
Sıvı su miktarı ölçüm sistemi

Sensörün yapılmasında herbiri yaklaşık 1 metre uzunluğunda olan iki platin tel elektrod olarak kullanılmış, 0.25 mikron çapındaki bu teller, yaklaşık 7 cm uzunluğunda ve 0.6 cm çapındaki porselen bir silindir etrafına (yaklaşık 60 sarım sığacak şekilde) sarılmıştır. Sarımların birbirine mümkün olduğu kadar yakın ve iki platin telin birbirine değmeyecek şekilde olmasına dikkat edilmiştir. Teller arasındaki boşluklar, LiCl çözeltisi ile homojen olarak doldurulmuştur. Platin teller, 24 volt değerindeki alternatif akım kaynağına bağlanmış, böylece polarizasyon etkileri önlenmiştir.

LiCl tamamen kuru iken, elektrotlar arasında ihmal edilebilir (0.1 mA) bir akım geçmektedir. LiCl bünyesine su aldığı zaman devreden geçen akım 0.25 miliampere kadar çıkmaktadır. Çekilen akım, LiCl tarafından tutulan sıvı suyun bir ölçütüdür. Devreden geçen akımın suyu buharlaştırmasıyla habbeler oluşmakta, böylece proba gelen damlacıkların hızı kesilmekte ve sıçramaları önlenmektedir. Sıçrama ile oluşan su kaybını önlemek amacı ile ayrıca üzerinde etkin kesiti belirli bir yarık (kesiti 1 cm^2) bulunan bir kapak geçirilmiştir. Böylece sensörün sadece ön tarafındaki oldukça küçük bir alan, hava akımına maruz bırakılmaktadır. Çalışmada incelenen bulutlar, sıcak bulutlar ($T > 0^\circ\text{C}$) olduğundan kapak etrafında ayrıca bir ısıtıcının kullanılmasına gerek duyulmamıştır.

3.5.2. Sensörün Geliştirilmesi İle İlgili Çalışmalar

Başlangıçta, platin tellerin, üzerine sarılacağı malzemeler, yalıtkan olmaları nedeni ile ebonit, pleksi-glas ve teflon olarak seçilmiştir. Diş aralıklarının çok küçük olması gerekmektedir (yaklaşık olarak cm de 17 diş). Bunun sonucunda malzemede bozulmalar görüldüğü için ebonit ve pleksi-glasın kullanılmasından vazgeçilmiştir. Teflon malzeme üzerinde sarılan tellerin oynamasını önlemek amacı ile dişlerin derinliği tel kesitinin $1/3$ 'ü kadar açılarak, yeni bir sensör hazırlanmıştır. Ancak kalibrasyon çalışmaları sırasında ısınma ve LiCl etkileşimi sonucunda, teflonun yer yer bozulmasından dolayı bu malzemenin kullanılmasından da vazgeçilmiştir. Araştırmalar sonucunda bütün bu kusurların bulunmadığı en iyi malzemenin porselen olduğu bulunmuştur ve sensör porselenden imal edilmiştir.

Çeşitli geometrik düzenlemeler denenmiş, neticede porselen sensör, Şekil 3.3 de görülen son durumu almıştır. Sensörün içi boş olup, porselenin uç kısmına platin tellerin sıkıca tutturulması için iki küçük yuva açılmıştır. Sap olarak kullanılan piring çubuk içine yerleştirilen ince porselen çubuklar yardımıyla platin tellerin izolasyonu sağlanmıştır.

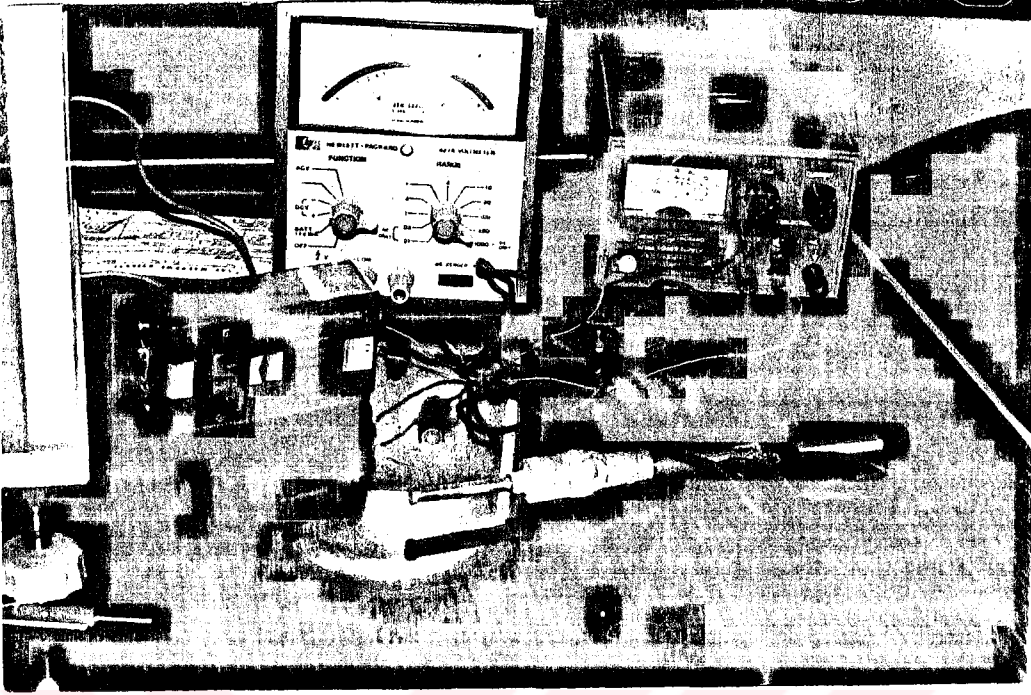
Burada, elektrod olarak kullanılan platin tellerin % 99.9 saf olması gerekir. Başlangıçtaki kalibrasyonlar sırasında kullanılan

platin tellerin bu kadar saf olmadığı anlaşılmıştır. Piyasada bulunan platin tellerde rodyum karışık olduğundan rodyum-platin alaşımlı elektrotlar, rodyumun soy metal olmaması ve ısınarak LiCl ile reaksiyona girmesi sonucunda aşınmaya uğramıştır. Bu nedenle tellerde yer yer kopmalar meydana gelmiştir.

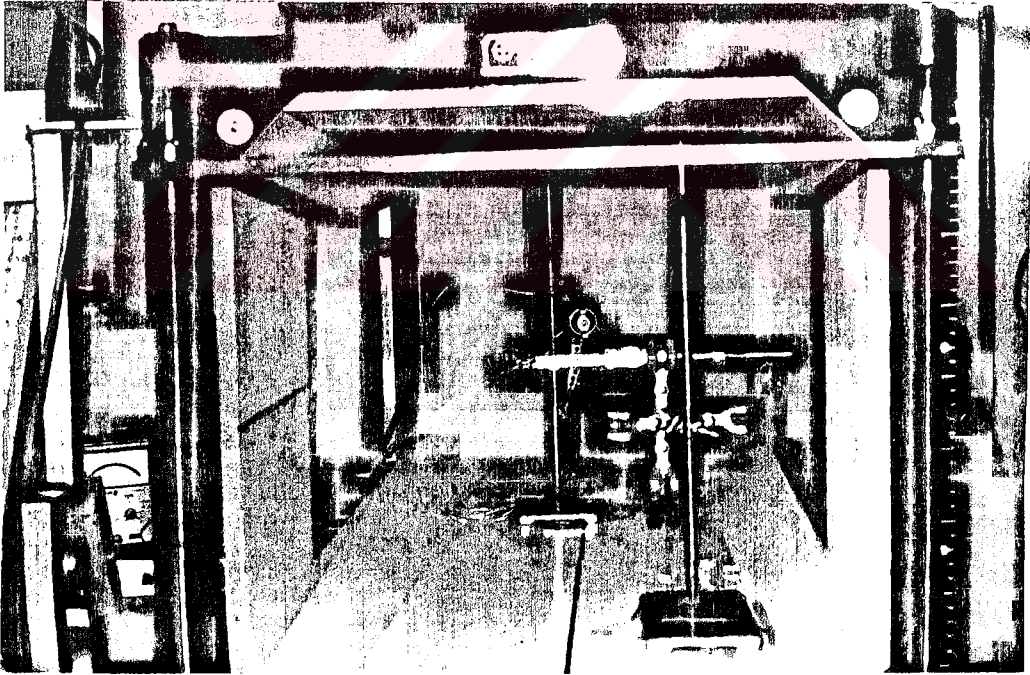
Şekil 3.4 deki devre ile sensörde tutulan sıvı su miktarının değişimi, platin teller arasında gerilim (veya akım) değişimi şeklinde gözlenmiştir.

Sıvı su miktarı ölçerinin kalibrasyonu için aşağıda belirtilen yol izlenmiştir. İlk adımda, hava tüneline Cumulus-Humilis ve Cumulus-Mediocris bulutlarıyla benzer damlacık dağılımı oluşacak bir lüle seçilmiştir. Uygun damlacık dağılımını gözleyebilmek için MgO ve silikon yağı ile kaplı cam plakalara 4-6 atmosfer basınçta arı su püskürtülmüş ve bu plakalar üzerinde yakalanan damlacıklar, mikroskopla incelenerek, uygun damlacık dağılımı verecek bir lüle sistemi bulunmuştur. Değişik basınç (4.5, 5, 5.5 atmosfer) değerleri ile yapılan inceleme sonunda, istenen damlacık dağılımının (çapı 4-170 mikron) lüleden 50 cm ötede olduğu saptanmıştır.

Rüzgâr tüneline kalibrasyon çalışmaları sırasında, tüneldaki hava hızının, sabit ve planör (veya uçak) uçuş hızına yakın olması koşulu aranmıştır. Sıvı su miktarı ölçerinin kalibrasyon çalışmaları başlangıçta İ.T.Ü. Aeronotik Laboratuvarındaki, daha sonra Hava Harp Okulu Aeronotik Laboratuvarlarındaki rüzgâr tüneline sürdürülmüştür (Tablo A.2, Şekil 3.5.a, 3.5.b). Hava tüneline sensör ve kalibrasyon standardı ardarda kullanılmıştır. Kalibrasyon standardı 1.25cm çapında, pring bir tüpten ibaret olup, tüpün bir ucu açıktır. Bu pirinç tüp üzerinde sensörünkine eşit bir yarık mevcuttur (Şekil 3.3). Kalibrasyon standardı, deney koşullarına maruz bırakılmadan önce içine ağırlığı önceden hassas bir şekilde ölçülmüş, çok iyi nem çeken bir kurutma kağıdı konulmuştur. Lüleye uygulanan basınç ve hava hızı sabit tutularak, arı suyun 15, 30 ve 60 saniyelik sürelerle püskürtülmesi sonucunda muhtelif ölçümler alınmış ve her ölçümde kurutma kağıtları tartılarak, ortama verilen su miktarı belirlenmiştir. Bu amaçla m_1 ölçümden önce kurutma kağıdının ağırlığı, m_2 ölçümden sonra



Şekil - 3.5.a
Sıvı su miktarı ölçeri ve ölçüm sistemi



Şekil - 3.5.b
Rüzgâr tüneline sıvı su miktarı ölçerinin kalibrasyon düzeni

kurutma kağıdının ağırlığı, $\Delta m = m_2 - m_1$, V tüneldeki akım hızı (m/s), S akıma maruz kalan alan (sensörün etkin kesiti (1 cm^2)) ve t sensör veya kalibrasyon aparatının sıvı suya maruz bırakıldığı süre olmak üzere birim zamanda birim kesite gelen sıvı su miktarı;

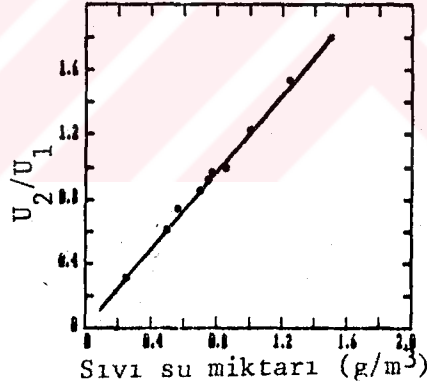
$$LWC = \frac{\Delta m}{V.S.t} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$V = 3.96 (h)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

olup, h milimetre olarak su sütunu yüksekliğidir.

Aynı koşullarda kalibrasyon standardı yerine sensör konarak, sıvı suyun LiCl tarafından tutulması sağlanmıştır. Sensör tarafından tutulan bu sıvı su, sensörün platin tellerinin uçları arasındaki gerilimi değiştirecektir. Sensörün hassasiyetinin incelenmesi amacıyla 1 dakika için okunan gerilim farkının aynı kalıp kalmadığı incelenmiş, lülenin su ayarı değiştirilerek olay tekrarlanmıştır. 1.2 g/m^3 'e kadar alınan değerlerin lineer olarak değiştiği görülmüştür. 1.2 g/m^3 den daha büyük değerler için sensör doğru sonuç vermekle beraber, incelenen bulutlarda bu değere zaten ulaşılmamıştır. Ayrıca kalibrasyon eğrisi farklı ortam sıcaklıklarında alınmış ve ölçümlerde sıcaklığı etkisinin olmadığı görülmüştür. Sıvı su miktarı ölçerinin kalibrasyon eğrisi Şekil 3.6 da verilmiştir.



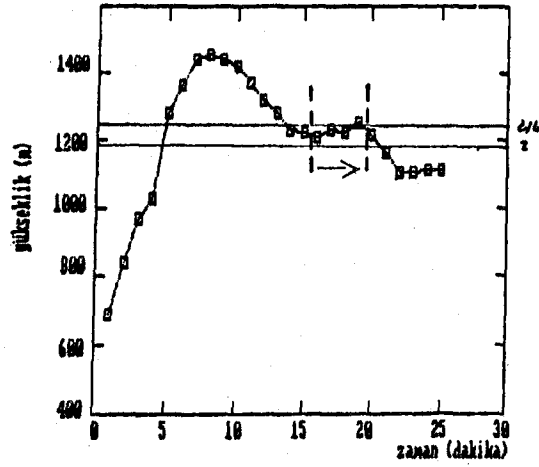
Şekil - 3.6

Sıvı su miktarı ölçeri kalibrasyon eğrisi, U_2/U_1 ölçümden sonraki ve önceki gerilim farkı oranı.

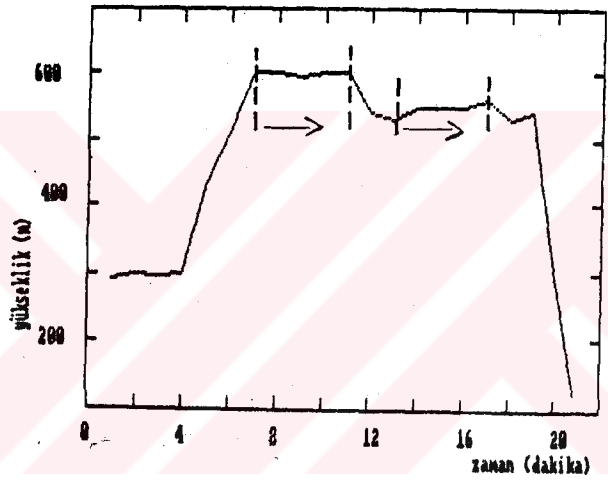
3.6. Ölçülen Parametrelerin Yatay Değişimleri

Tablo 3.1 de verilen parametrelere ait termal (veya cumulus) içinde ve civarlarında ölçülen değerlerin yatay değişimleri incelenmiştir.

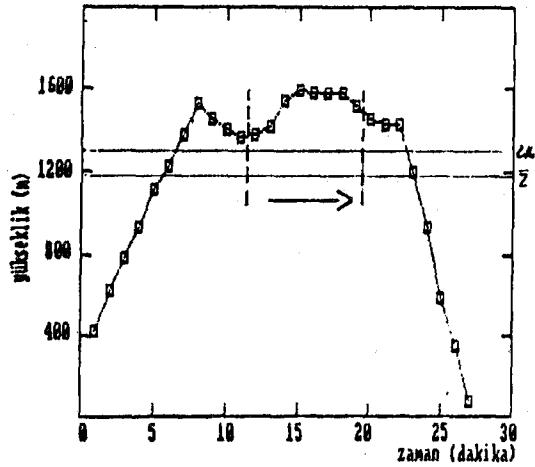
Şekil 3.7 de uçuş irtifasının zamanla değişimi görülmektedir. İrtifanın kaldırıcı kuvvetlerin etkisi ile artış gösterdiği



(a)
Puchacz SZD-50 (30/9/1985)



(b)
Puchacz (17/5/1986)



(c)
Cessna-207 (18/5/1986)

Şekil - 3.7

Uçuş irtifasının zamanla değişimi, termal ve bulut bölgeleri

kesitler, termal ve cumulus bulut alanlarıdır. Örneğin Şekil 3.7.a da planör uçuşu sırasında ilk 6 ve 7. dakika içinde planör çekici uçakla yükseltilmekte, sonra 1200-1250 metre irtifada yaklaşık 15-20. dakikalar arasında ise, termal etkisi ile irtifa kazanılmaktadır. Bu konvektif bölge içinde kaydedilen toplam yatay mesafe 6.5 kilometre civarındadır. Şekil 3.7.b de yaklaşık 7 ilâ 11 ve 13 ilâ 17. dakikalar arasında termal bölgelerine girilmiştir. Yarıçapı 300 metre dolayındaki termallerden oluşan bölgenin yatay ölçeği 5 kilometreye yakındır.

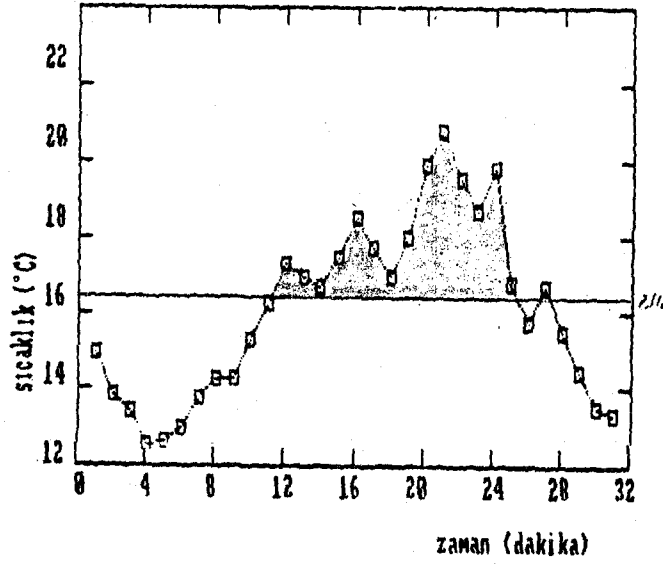
Termal bölgelerinin belirlenmesi amacı ile bir kriter saptanmasına çalışılarak, bu eşik değeri meteorolojik parametrelerin yatay değişimlerinin standart sapmasının $1/4$ 'ü olarak alınmıştır [37]. Şekil 3.7.c uçak ile alınan ölçümleri göstermektedir. Her üç şekilde de termal veya bulut alanları düşey kesikli çizgiler arasındaki bölgelerdir.

Şekil 3.8 deki gölgeli alanlar da sıcaklık değişimine dayanan kritere göre termal veya (cumulus) bölgeleri olarak yorumlanmıştır.

Şekil 3.9 da ise, uçuş esnasında bağıl nemin değişiminin standart sapmasının $1/4$ 'ü kriter olarak seçilmiştir. Gölgeli bölgeler bu kritere göre termal veya cumulus alanlarına karşı gelmektedir.

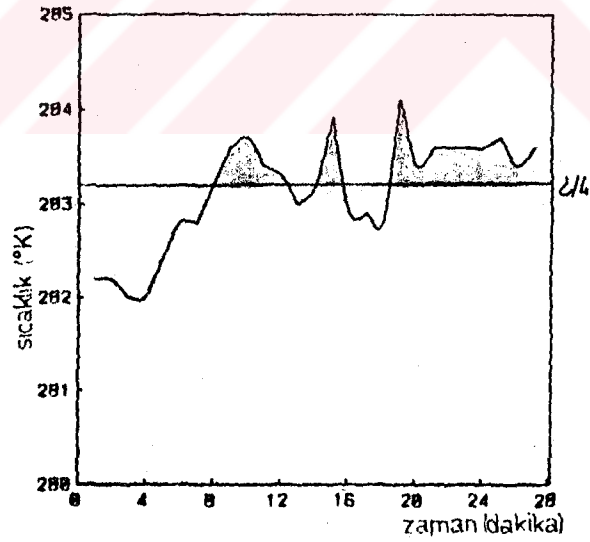
Şekil 3.10.a ve b'de düşey hızın uçuş esnasında zamanla değişimi verilmektedir. Gölgeli bölgeler termallerin pozitif hız alanlarına karşı gelmektedir. Sabit hız, sabit irtifa uçuşu sırasında basınç hızları (variometreden kaydedilen uçağın düşey hızı) düşey hava hızı olarak alınabilmektedir. Şekil 3.10.c de dördüncü dakikada, planörün çekici uçaktan ayrılmasından itibaren sabit hız ve sabit irtifa uçuş planı uygulanmıştır. Bu periyot boyunca düşey ivme değerlerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Uçuş irtifası 550-600 metre arasında değişmektedir (yaklaşık 16 km olan bu yatay uçuş periyodunda irtifa salınımlarındaki hata % 0.16 dır (Şekil 3.7.b)).

Şekil 3.11 de toplam statik enerji (H), toplam nem (Q) ve basıncın (P) uçuş boyunca değişimleri görülmektedir. Ölçümlerden hesaplanan bu değerlerden, özellikle enerji salınımlarının standart



(a)

Cessna-207 (18/5/1986 Ö.E.)

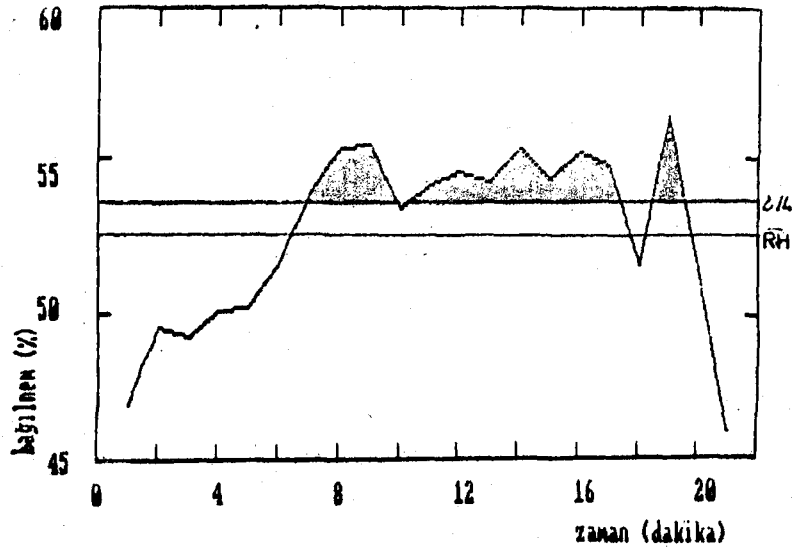


(b)

Siat (29/9/1985 Ö.S.)

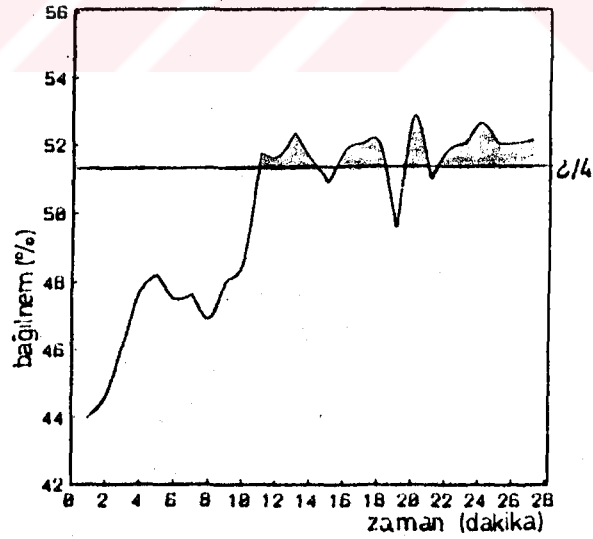
Şekil - 3.8

Sıcaklığın zamanla değişimi, termal ve bulut alanları



(a)

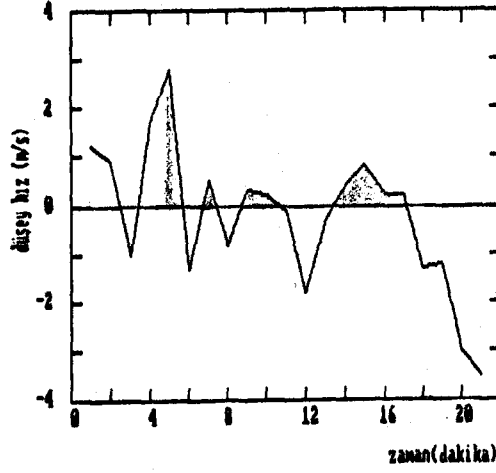
Puchacz SZD-50 (17/5/1986 Ö.S.)



(b)

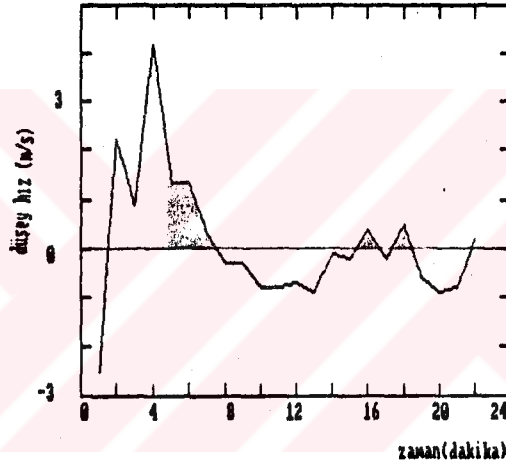
Siat (29/9/1985 Ö.S.)

Şekil - 3.9
Bağıl nemin zamanla değişimi ve termal bölgeleri



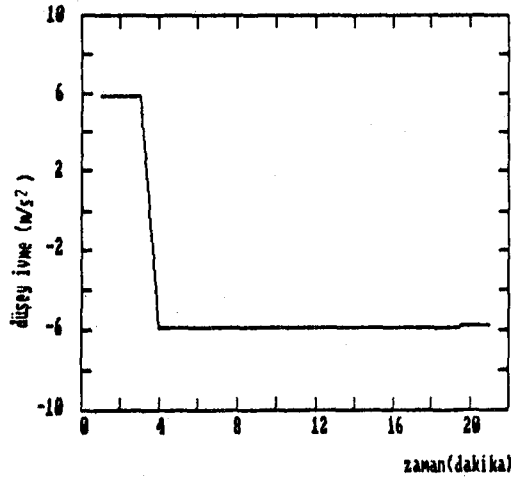
(a)

Puchacz SZD-50 (17/5/1986)



(b)

Puchacz SZD-50 (30/9/1985)

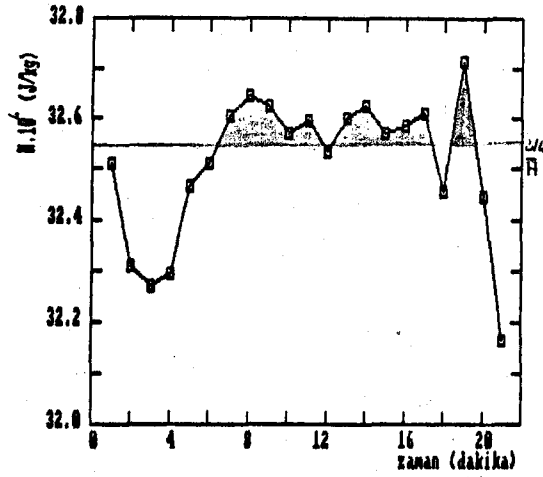


(c)

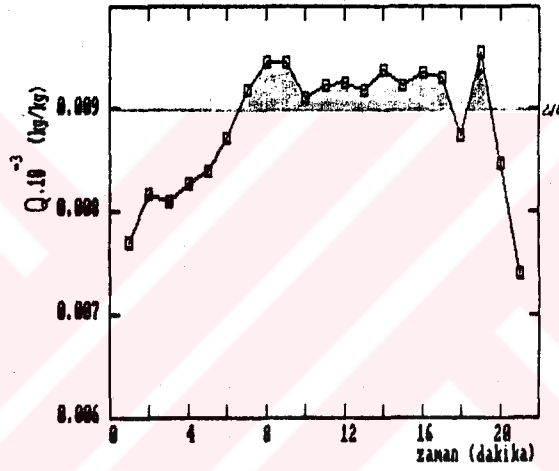
Puchacz SZD-50 (17/5/1986)

Şekil - 3.10

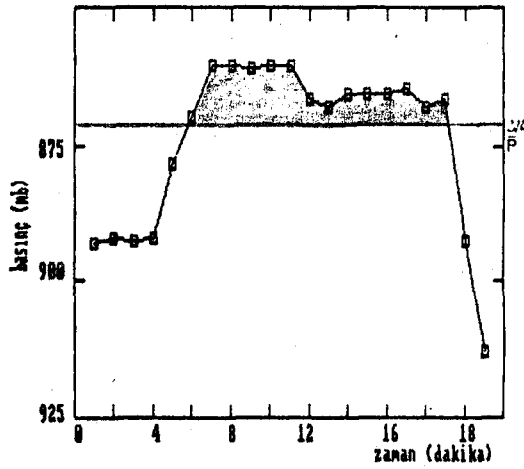
Düşey hız ve düşey ivmenin zamanla değişimi ve termal alanları



(a)



(b)



(c)

Şekil - 3.11

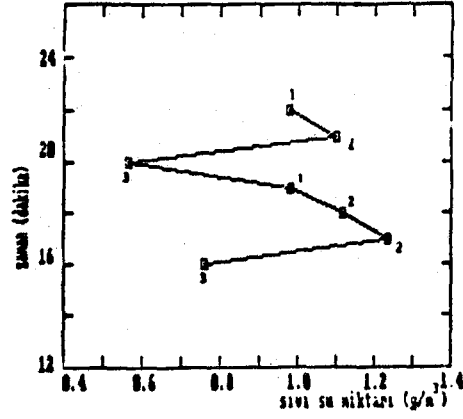
(a) Toplam statik enerji, (b) toplam sıvı su miktarı, (c) basıncın uçuş boyunca değişimi ve termal alanları. Puchacz SZD-50 (17/5/1986)

sapmasının 1/4'ünü aşan bölgeler, termal bölgeleri olarak yorumlandığında, gözlemlerle büyük uygunluk görülmüştür. (H, Q ve P ile ilgili program EK-B de verilmektedir). Bu kriter ile termallerin inici akım bölgeleri de belirlenebilmektedir. Örneğin Şekil 3.10.a ve Şekil 3.11 de 12. dakika civarı, termallerin inici akım bölgelerine karşı gelmektedir. İncelenen termaller içindeki düşey hız değerleri 1.5 m/s yi aşmadığından zayıf ve orta güçte termaller grubuna girmektedir [18].

Şekil 3.12 de sıvı su miktarının, bulut içindeki (bulut taban orta ve tepesinde) düşey değişimi görülmektedir. Bulut içinde mümkün olduğu kadar çok veri almak amacıyla ve kısa sürede manevra yapmak zorunluğu nedeni ile, hedef seçilen buluta önce bazen taban seviyesinden, bazen de tepe seviyesinden girilmiştir. Her seviyede yatay olarak Şekil 3.1 de belirtilen kelebek uçuşu yapılmıştır.

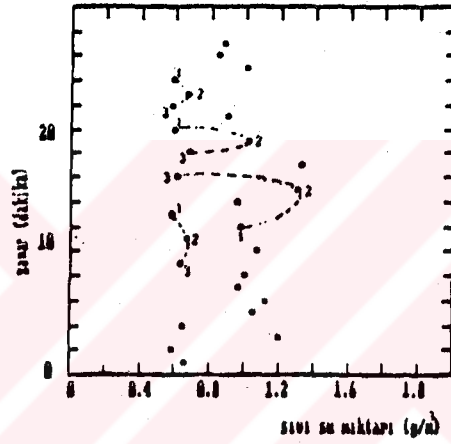
Çapları 600-1000 metre arasında değişen cumulus humilis ve cumulus mediocris bulutlarının taban ve tepe seviyelerinde bulut sıvı su miktarı 0.5 g/m^3 civarında iken, bulut orta seviyesinde $0.6-1.2 \text{ g/m}^3$ arasında kaydedilmiştir. Bu düşey profil, dördüncü bölümde verilen teorik sonuçlarla % 85 uyum sağlamaktadır.

Sıcaklık, nem ve toplam statik enerji değerlerinde artış olan bölgelerin termal alanları (veya cumulus bulutları) ile uygunluk gösterdiği gözlenmiştir. Ancak, sıcaklık değişimi termalin karışım bölgesinde temsili olmamaktadır. Ayrıca bulut içi ve bulut civarlarındaki ölçümlerde bağıl nem ölçerinin hassasiyeti azalmaktadır. Bu nedenle, toplam statik enerji değişimi hesaplanmış, ve böylece sıcaklık ve nem değişimi, enerji değişimi ile beraberce gözönüne alınmıştır. Hesaplanan statik enerji değişimi ile ilgili kriterin termal bölgelerini belirlemek için eşik değeri olarak alınması ile de ölçüm hatalarının katkısı azaltılmıştır.



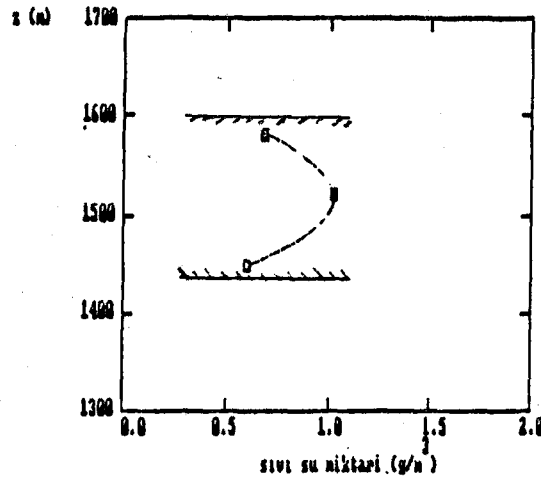
(a)

Cessna-207 (18/5/1986 Ö.E.)



(b)

Cessna-207 (18/5/1986 Ö.S.)



(c)

Cessna-207 (18/5/1986 Ö.S.)

Şekil - 3.12

Sıvı su miktarının değişimi

1-bulutun taban seviyesi, 2-bulutun orta seviyesi, 3-bulutun tepe seviyesi

3.6.1. Hata Analizi

Bu çalışmada ölçümlerimizi etkileyen hata kaynakları deneysel ve hesaplama hatalarından oluşmaktadır. Deneylerimiz sırasındaki sistematik hatalar, okuma hataları, alet sıfır hataları, kalibrasyon hataları ve alet yerleştirme hataları şeklinde sıralanabilir [32, 43-55].

Meteorolojik parametrelerden sıcaklık ölçümü için kullanılan termocouple'nin hassasiyeti $\pm 5^\circ\text{C}$, bağıl nem ölçerinin $\pm 1.5\%$, sıvı su miktarı ölçerinin $\pm 10\text{ g/m}^3$ dür. Uçuş verilerinden, düşey basınç hızı (variometre) okumaları 7.5 m/s düşey ivme okumaları $\pm 1\text{ m/s}^2$, irtifa ise $\pm 5\text{ m}$ hassasiyetle yapılmıştır. Test amacı ile yapılan ilk iki uçuş hariç, kontrol paneline ait veriler, fotoğrafı tekniğiyle (micro-logger ile eş zamanlı olarak) elde edilmiştir [46-48].

Her uçuş öncesi, aletlerin sıfır ayarları yapılmış, portatif güç kaynağı olarak kullanılan akü ve bataryaların şarj durumları kontrol edilmiştir. Sıcaklık, bağıl nem, sıvı su miktarı ölçeri ve düşey akselerometrenin çıkış potansiyel değerleri (volt veya milivolt), micro-logger'ın kanallarının giriş potansiyel değerlerine göre ayarlanmış, bu amaçla faz bölücü devreler kullanılmıştır. Dirençlerin ısınmasından dolayı okunan değerlere katılan hata 5% den azdır.

Kullanılan meteorolojik aletlerden termocouple'un Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'nda, bağıl nem ölçerinin Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nde, sıvı su miktarı ölçerinin İstanbul Teknik Üniversitesi'nde ve düşey akselerometrenin Türk Hava Yolları'nda çeşitli sıcaklık ve nem koşullarında kalibrasyonları yapılmıştır. Uçak ve planörün kontrol paneline ait aletlerin kalibrasyonu ise Türk Hava Kurumu tarafından yapılmıştır.

Uçak ve planörde aletler ve sensörlerin yüzey akımının en az bozulduğu bölgelere yerleştirilmesine özen gösterilmiştir. Bu nedenle, çoğunlukla uçak ve planörün burun kısmı, sıcaklık ve bağıl nem

sensörleri için; pito tüpüne yakın bölgeler, sıcaklık, bağıl nem ve sıvı su miktarı sensörleri için ve ağırlık merkezi yakınındaki bölgeler de düşey akselerometre için seçilmiştir [48-50]. Uçuş sırasındaki titreşim etkilerinden kaçınmak amacı ile sensörler sıkı bir şekilde bağlanmıştır.

Tablo 3.2 de farklı termal veya cumulus humilis bulutları içinde ölçülen sıcaklık, bağıl nem, düşey hız, sıvı su miktarı, uçuş irtifası ve düşey ivme değerlerinin ortalamaları ve ortalamalarının bulunduğu güven aralığı ile güven dereceleri verilmektedir [43-45].

Örneğin Tablo 3.2 deki sonuçlara göre, anlamlılık derecesinin % 5 den küçük olan sıcaklık ve düşey ivme ortalamalarının verilen aralıkta olması "belirli"dir.

3.7. Ölçülen Parametreler Arasındaki İlişkiler

Bu çalışmada ölçülen (sıcaklık, bağıl nem, düşey hız, sıvı su miktarı, düşey ivme) ve ölçümlerden hesaplanan meteorolojik parametreler (toplam statik enerji, toplam özgül nem) arasındaki ikili ve çoklu lineer korelasyon katsayıları Tablo 3.3 de verilmektedir. Korelasyon katsayıları her bir ölçüm periyodunda termaller ve cumulus bulutları için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Termaller içindeki parametrelerin ikili korelasyon katsayıları incelendiğinde toplam özgül nem ile bağıl nem, sıcaklık ile toplam statik enerji, toplam özgül nem ile toplam statik enerji ve bağıl nem ile toplam statik enerji değerleri arasında kuvvetli bir korelasyon olduğu görülmektedir. Hesaplanan korelasyon katsayılarına (0.99, 0.93, 0.88 ve 0.86) uygulanan student's-t testi sonucunda, bu değerlerin "belirli" oldukları anlaşılmıştır. Bu değerlerin random (şans eseri) olarak meydana gelmelerinin olasılığı % 1 den küçüktür. Diğer parametreler arasında kuvvetli bir lineer ilişki olmadığından korelasyon katsayısı daha küçüktür. Bu durum, parametreler arasındaki ilişkinin lineer olmadığını, diğer bağıl değişkenlerin de etkin olduğunu göstermektedir.

Tablo - 3.2

Termal ve cumulus bulutları içinde ölçülen bazı parametrelerin ortalamalarının güven aralığı ve güven derecesi

		Ortalama	Güven Aralığı	Güven Derecesi
TERMAL I	T Sıcaklık	14.78	14.04-15.52	% 99
	RH Bağıl nem	54.08	53.27-54.89	% 86
	Z İrtifa	576.25	547-605	% 61
	a Düşey ivme	-5.9	-5.84-(-5.96)	% 99.5
TERMAL II	T Sıcaklık	14.38	13.66-15.13	% 99.8
	RH Bağıl nem	54.43	53.61-55.22	% 90
	Z İrtifa	583.75	554-613	% 91
	a Düşey ivme	-5.82	-5.81-(-5.93)	% 99.5
TERMAL III	T Sıcaklık	14.85	14.11-15.59	% 99.9
	RH Bağıl nem	54.28	53.47-55.09	% 87
	Z İrtifa	545	517-572	% 99.8
	W Ortalama düşey hız	-0.23	-0.21-(-0.25)	% 66
BULUT (LWC)	I	0.79	0.71-0.87	% 66
	II	0.93	0.84-1.02	% 66
	III	0.77	0.69-0.85	% 66
	IV	0.62	0.56-0.68	% 83
	Ortalama sıvı su miktarı	0.78	0.70-0.86	% 89

Tablo - 3.3
Ölçülen parametreler arasında ikili ve üçlü korelasyon

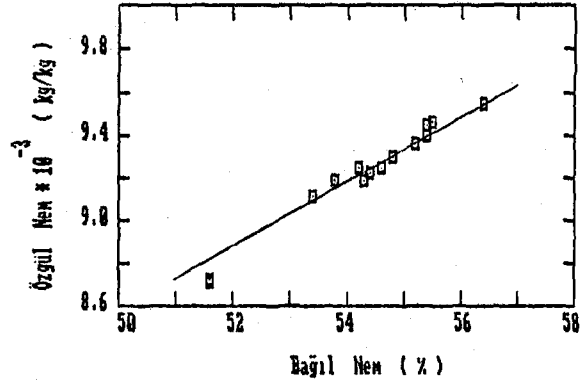
TERMAL	r	BULUT	r
Toplam özgül nem- bağıl nem	0.99	Toplam özgül nem- sıvı su miktarı	0.55
Sıcaklık-toplam statik enerji	0.93	Sıcaklık-toplam statik enerji	0.55
Toplam özgül nem- toplam statik enerji	0.88	Toplam özgül nem- toplam statik enerji	0.54
Bağıl nem-toplam statik enerji	0.86	Toplam statik enerji- sıvı su miktarı	0.35
Toplam özgül nem- sıcaklık	-0.47	Toplam özgül nem- sıcaklık	-0.32
Bağıl nem- sıcaklık	-0.39	Sıcaklık-sıvı su miktarı	-0.15
Sıcaklık-bağıl nem, toplam statik enerji	0.99	Sıcaklık-toplam statik enerji, toplam özgül nem	0.92
Bağıl nem-toplam statik enerji, toplam özgül nem	0.99	Sıcaklık-toplam statik enerji, sıvı su miktarı	0.66
Sıcaklık-toplam statik enerji, toplam özgül nem	0.76	Toplam statik enerji-özgül nem, sıvı su miktarı	0.54
Sıcaklık-bağıl nem, toplam özgül nem	0.71	Sıcaklık-toplam özgül nem, sıvı su miktarı	0.32

Bulut içindeki parametrelerin ikili korelasyon katsayıları termallere nazaran daha küçüktür. Bu, bulut içindeki mikrofizik-dinamik yapının termallerden daha komplike olmasına yorulabilir. En kuvvetli ilişkilerin toplam özgül nem-sıvı su miktarı, sıcaklık-toplam statik enerji ve toplam özgül nem-toplam statik enerji arasında olduğu görülmektedir.

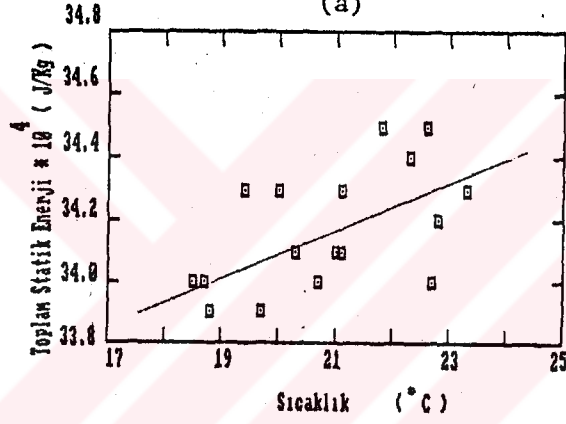
Parametrelerden birinin değişiminin diğer ikisinin değişimi üzerinde ne derece etki oluşturduğu Tablo 3.3 de verilen üçlü

korelasyon katsayılarından anlaşılmaktadır. (1) e yakın değerler, bu üç parametre arasında lineer bir ilişki olduğunu, (0) a yakın değerler ise bu ilişkinin lineer olmadığını göstermektedir. Örneğin termaller içinde, sıcaklığın değişimi ile bağıl nem ve toplam statik enerji değişimi arasında çok kuvvetli bir ilişki olduğu görülmektedir. Genelde bulut içinde parametreler arasında üçlü lineer ilişkinin termallere nazaran daha zayıf olduğu görülmektedir. Bu durum bulut içindeki dinamik ve mikrofizik yapının termallere nazaran daha karmaşık olmasından kaynaklanmaktadır. Bulut içinde ikili lineer korelasyon katsayılarının, üçlü lineer korelasyon katsayılarından daha düşük olması ise gözönüne alınan değişkenin birden fazla bağıl değişkene bağlı olmasından dolayıdır.

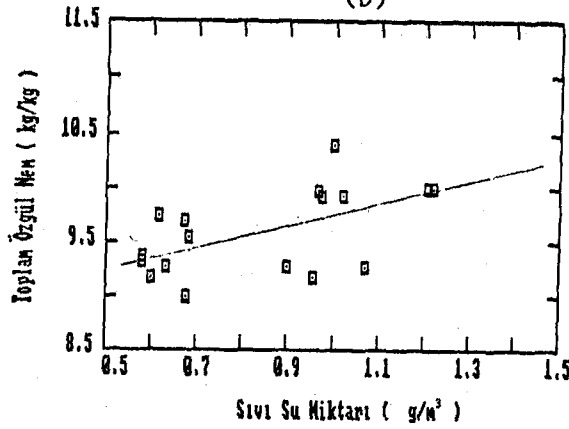
Bulut ve termallere ait bazı parametreler arasındaki ilişkilere grafiksel birer örnek olarak Şekil 3.13 verilmiştir. Şekil 3.13.a'da termal içindeki bağıl nem ile toplam özgül nem ilişkisi, b'de bulut sıcaklığı ile toplam statik enerji ilişkisi, c'de sıvı su miktarı ile toplam özgül nem ilişkisi görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil - 3.13

(a) Termal içinde bağıl nem toplam özgül nem ilişkisi, (b) bulut sıcaklığı ile toplam statik enerji ilişkisi, (c) sıvı su miktarı ile toplam özgül nem ilişkisi.

BÖLÜM 4

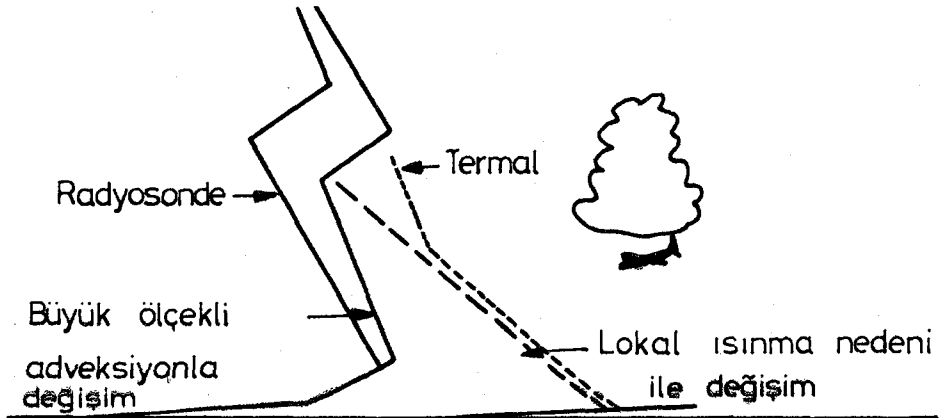
1-BOYUTLU TERMAL-CUMULUS MODELİ

Konvektif aktivitenin öngörüsünde termodinamik diyagramlar ve grafiksel yöntemler kullanılmakta ise de özellikle bilgisayar teknolojisindeki yenilikler, model çalışmaları konusunda olumlu gelişmeler sağlamıştır. Bu çalışmada, konvektif aktivitenin incelenmesini amaçlayan, termallerin ve cumulus bulutlarının gelişimini ve davranışını açıklayan bir boyutlu bir model ile sonuçları üzerinde durulmaktadır.

Termaller ve cumulus konveksiyonu gibi konvektif süreçler, aşağı atmosferde transfer edilen enerji miktarına, sıcaklık ve nemin yer ve zamanla değişimine bağlıdır. Genel olarak sıcaklık ve nem gün boyunca Şekil 4.1 de görüldüğü gibi [28]:

- a- büyük ölçekli adveksiyonla,
- b- diyabatik ısınma ile,
- c- konvektif salınımlarla

düşey olarak değişir.

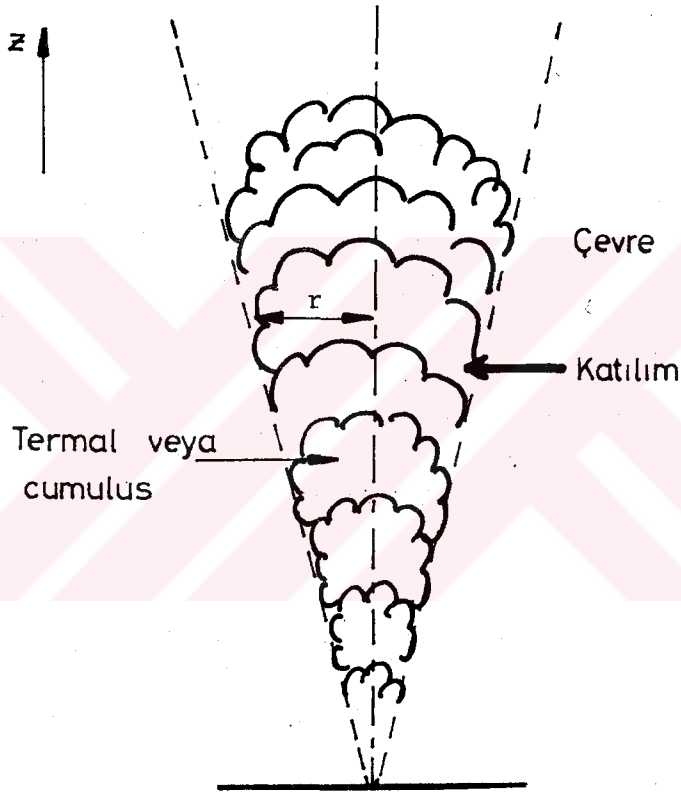


Şekil - 4.1

Termal ve çevre hava sıcaklığının düşey değişimi

4.1. 1-Boyutlu Termal-Cumulus Modeline İlişkin Denklem Takımı

Kütle, enerji ve nemin korunumu eşitliklerinden hareketle, yeryüzeyindeki bir nokta kaynaktan oluşan ve zahiri bir koni içinde yükselen tek bir termal veya cumulus bulutu içindeki yapı incelenerek, bir model oluşturulmuştur. Bu amaçla model, Şekil 4.2.a'da görüldüğü gibi tasarlanmış ve inceleme bölgesi düşey olarak 10'ar metre kalınlığında tabakalara bölünmüştür.



Şekil - 4.2.a
1-boyutlu termal-cumulus modelinin şematik görünümü

Bu modelde yapılan kabuller şöyle sıralanabilir:

1- Çevre hava, termal veya buluta sadece yanlardan katılmaktadır ve çevre havanın katılım hızı, bu seviyedeki düşey hızla orantılıdır. (Çevre havanın termal veya cumulus bulutuna tepeden katılımı ihmal edilmiştir.)

2- Düşey hız ve kaldırma kuvvetinin profilleri (yatay kesitteki) her seviyede benzerdir.

3- Akışkan sıkıştırılamaz kabul edilmiştir. Yoğunluktaki lokal değişim, referans yoğunluğu ile karşılaştırıldığında küçüktür

(referans yoğunluğu kaynak seviyesinde çevre havanın yoğunluğudur).

4- Termal veya cumulus bulutu orjini yeryüzünde bulunan zahiri bir koni içinde yükselmektedir. Koninin tepesindeki nokta kaynaktan oluşan bu konvektif hücrelerin geometrik şekli küre olarak kabul edilmiştir.

5- Termal (veya cumulus bulutları) içindeki termodinamik ve mikrofizik parametrelerin sadece düşey yöndeki değişimi gözönüne alınmıştır.

6- Hareket sürtünmesiz kabul edilmiştir.

7- Termal veya cumulus bulutu ile çevre hava arasındaki sıcaklık farkının $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ olduğu, başlangıç düşey hızının $w_0 = 1 \text{ m/s}$ olduğu ve başlangıç yarıçaplarının 100, 200, 500, 1000 ve 2000 m. olduğu kabul edilmiştir.

8- Konvektif hücreler içinde parametrelerin değişimi, $\Delta z = 10$ metrelik düşey dilimler için hesaplanmıştır.

Modelde kullanılan denklem takımları şöyle sıralanabilir [17, 23, 48]:

- a- Kütlenin korunumu,
- b- Nem eşitliği,
- c- Enerji eşitliği,
- d- Momentum eşitliği.

a- Kütlenin Korunumu:

z- doğrultusunda yükselmekte olan bir termal (veya cumulus bulutu) içindeki düşey kütle akısı, şematik olarak Şekil-4.2.b'de gösterilmektedir.

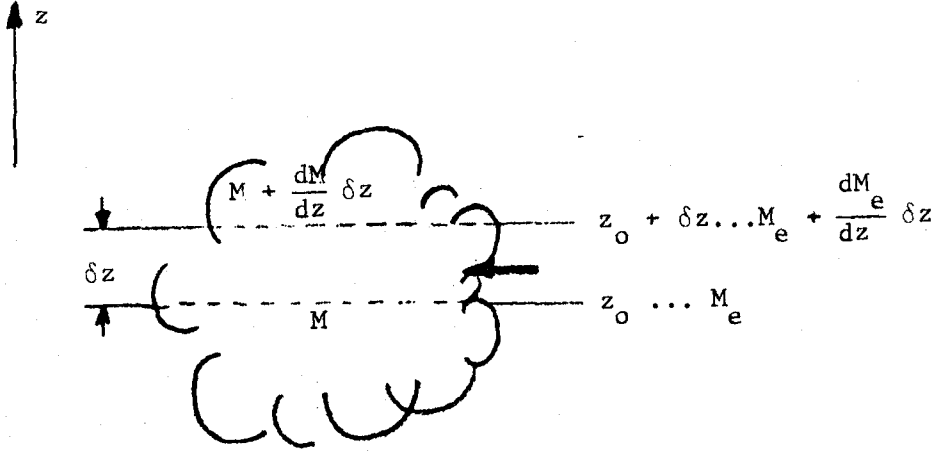
Şekle göre, z_0 - seviyesinden $z_0 + \delta z$ seviyesine olan toplam kütle akısı,

$$(M + \frac{dM}{dz} \delta z) - M = (M_e + \frac{dM_e}{dz} \delta z) - M_e$$

$$\frac{dM}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e \right) \quad (4.1)$$

$$\frac{dM}{dz} = 4\pi r^2 \rho_e \alpha$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, M: termalin toplam kütlesi, ρ_e : çevre havanın yoğunluğu, r: termalin yarıçapı, α : dr/dz 'dir.

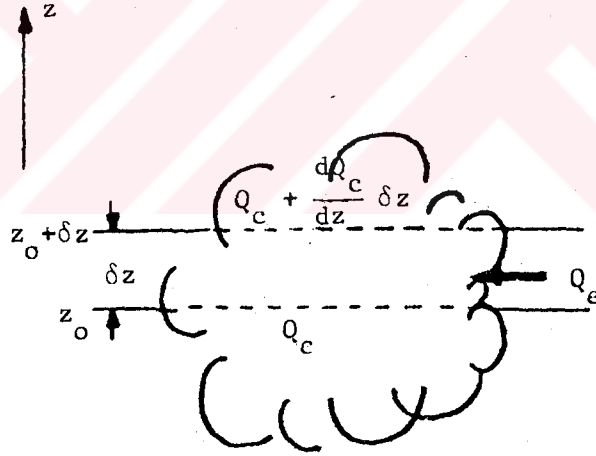


Şekil - 4.2.b

Bir termal veya cumulus bulutu içindeki düşey kütle akısının şematik gösterilimi

b- Nem Eşitliği:

z- doğrultusunda yükselmekte olan bir termal içindeki nem değişimi, Şekil-4.2.c'de şematik olarak gösterilmektedir:



Şekil - 4.2.c

Bir termal veya cumulus bulutu içinde nemin düşey taşınımı

Şekil-4.2.c'ye göre z_0 ve $z_0 + \delta z$ seviyeleri arasında düşey kütle akısı:

$$M + \delta M = M + \frac{dM}{dz} \delta z$$

şeklinde olup, Q_c : termal veya bulutun toplam nemi, Q_e : çevre havanın toplam nemini göstermek üzere düşey nem akısı:

$$(M + \frac{dM}{dz} \delta z)(Q_c + \frac{dQ_c}{dz} \delta z) - MQ_c = (M_e + \frac{dM_e}{dz} \delta z)Q_e - M_e Q_e$$

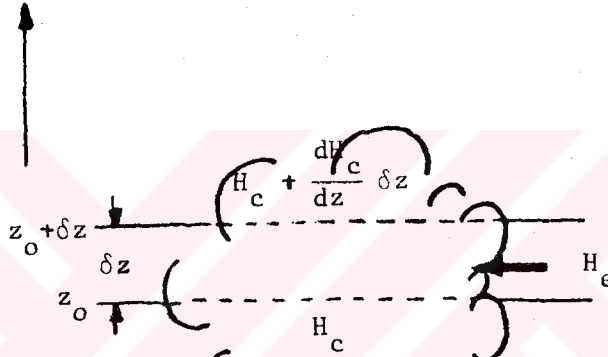
$$\frac{d(MQ_c)}{dz} = \frac{dM_e}{dz} Q_e \quad (4.2)$$

$$\frac{d}{dz} (MQ_c) = 4\pi r^2 \rho_e \alpha Q_e$$

şeklinde ifade edilebilir.

c- Enerji Eşitliği:

Bir termal veya cumulus bulutu içindeki düşey enerji akısı Şekil-4.2.d'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil - 4.2.d

Termal veya cumulus bulutu içinde düşey enerji akısı

H_c : termal veya cumulus bulutunun toplam enerjisi, H_e : çevre havanın toplam enerjisi olmak üzere düşey enerji akısı;

$$(M + \frac{dM}{dz} \delta z)(H_c + \frac{dH_c}{dz} \delta z) - M.H_c = (M_e + \frac{dM_e}{dz} \delta z)H_e - M_e H_e$$

$$\frac{d}{dz} (M.H_c) = 4\pi r^2 \rho_e \alpha H_e \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

d- Momentum Eşitliği:

Genel halde düşey momentum eşitliği; ϕ : enlem derecesi,

a: dünyanın yarıçapı olmak üzere,

$$\frac{dw}{dt} - 2\Omega u \cos \phi - \frac{u^2 + v^2}{a} = - \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

şeklinde ifade edilmektedir [8, 19]. Yatay hızlar sıfırdır ve hidrostatik eşitlik yardımı ile:

$$\frac{dw}{dt} = - \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

$$\frac{dw}{dz} = - \frac{1}{\rho_c} (-g\rho_e + g)$$

$$\frac{dw}{dz} = g \left(\frac{\rho_e - \rho_c}{\rho_c} \right)$$

şeklinde yazılabilir.

Şekil-4.2.e'ye göre, z_o 'daki düşey momentum akısı wM , $z_o + \delta z$ 'deki düşey momentum akısı:

$$(w + \frac{dw}{dz} \delta z)(M + \frac{dM}{dz} \delta z) - wM \approx \frac{d}{dz} (Mw) \delta z$$

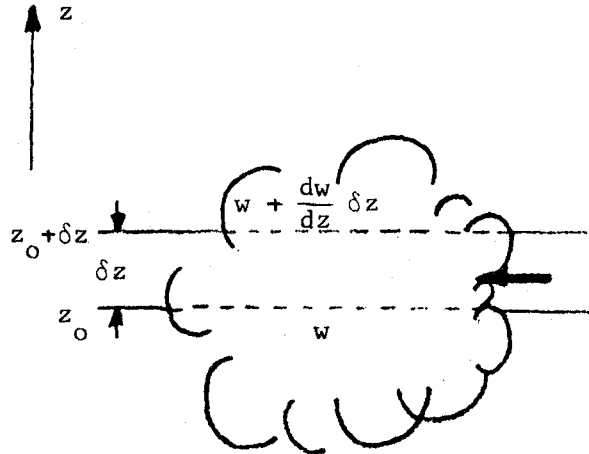
şeklinde yazılabilir. Termalin kütlesinin $M = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_c$ ve düşey hızın $w_c = dz/dt$ olduğu gözönüne alınarak,

$$\frac{d(Mw)}{dt} = Mg \left(\frac{\rho_e - \rho_c}{\rho_c} \right)$$

$$\frac{d(Mw)}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_c g \frac{(\rho_e - \rho_c)}{\rho_c} \quad (4.4)$$

$$w_c \frac{d(Mw_c)}{dz} = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_e - \rho_c)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil - 4.2.e

Bir termal veya cumulus bulutu içindeki düşey momentum akısının şematik gösterilimi

4.1.1. Başlangıç Koşulları

Konvektif bir hücrenin oluşumu için gerekli sıcaklık farkı (çevre havaya nazaran fark) $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ olarak alınmıştır. Bulut veya termal tabanındaki düşey hız $w = 0.5$ ve 1 m/sn olarak alınmıştır. Modelde, her tabakaya ait değerler, termal veya bulutun başlangıçta $r = 100, 200, 500, 1000$ ve 2000 metre yarıçapa sahip olduğu kabulüne göre hesaplanmıştır. Katılım hızı 4.1 eşitliğinden:

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} = \frac{3\alpha w}{r}$$

şeklinde elde edilir [17] .

Burada α katılım hipotezinden hareketle modeldeki eşitlikleri basitleştirmek için, termal veya cumulus bulutuna ve çevre havaya ait değerlerin, bulut veya termal sınırında eşit olduğu kabul edilmiştir:

$$\rho_c = \rho_e, Q_c = Q_e, H_c = H_e, w_c = w_e, T_c = T_e \quad (4.5)$$

Burada T_c bulut veya termal sıcaklığı, T_e çevre hava sıcaklığını göstermektedir.

4.1.2. Modelin Çözüm Yöntemi

Model, yer seviyesi ile 700HPa basınç seviyesi arasında uygulanmış olup, gözönüne alınan tabaka yaklaşık olarak 2800 metre kalınlığındadır. Gözönüne alınan tabaka $\Delta z = 10$ metrelik dilimlere ayrılmıştır.

Modele ait akış diyagramı EK - C1'de verilmiştir. İnönü'de radyosonde istasyonu olmadığından, bu modelde düşey sondaj verileri olarak, önce sadece Ankara'nın radyosonde verileri, daha sonra da İstanbul, Ankara ve Isparta sondaj verilerinin interpolasyonu ile elde edilen veriler kullanılmıştır. İnterpolasyon işleminde istasyonların rakımları da hesaba katılmıştır, (ortalama deniz seviyesinden itibaren, İnönü 842 m, Isparta 997 m, Ankara 894 m, İstanbul 39 m). İnönü için elde edilen düşey sondaj verilerinden hareketle 10 metre kalınlığındaki her tabaka için termal ve cumulus bulutlarına ait büyüklükler hesaplanmıştır. Yukarıdaki denklem takımları ile 1-boyutlu termal-cumulus

modelinin 4.1.1. de verilen başlangıç koşulları altında çözülmesi ile sıcaklık, bağıl nem, düşey hız, toplam özgül nem, toplam enerji ve bulut sıvı su miktarının düşey olarak nasıl değiştiği hesaplanmıştır (EK-C5, Program C).

Modelin çözüm yöntemi kısaca özetlenecek olursa;

1- Modelde çevre havayı temsil eden Ankara radyosonde verilerinden hareketle basınç, sıcaklık ve çığ noktası sıcaklığı değerlerinden çevre havanın z- seviyesindeki nem ve enerji değerleri, EK-C3 de verilen C3, C7 ve C8 eşitlikleri yardımı ile hesaplanmıştır [8, 19].

2- Başlangıç koşulları gözönüne alınmak suretiyle (EK-C2, Girdi Tanımı) termal veya cumulus bulutunun toplam kütlesi, nemi, enerjisi ve düşey hızının başlangıç değerleri hesaplanmıştır (EK-C3, C.20-C.22) [8, 19].

3- Konvektif hücrenin doyma seviyesine ulaşp ulaşamadığı (termalin cumulus bulutu haline dönüşüp dönüşemediği) üçlü nokta sıcaklığı ve enerjisinin hesaplanması ile belirlenmiştir (EK-C3, C.23-C.35) [8, 19].

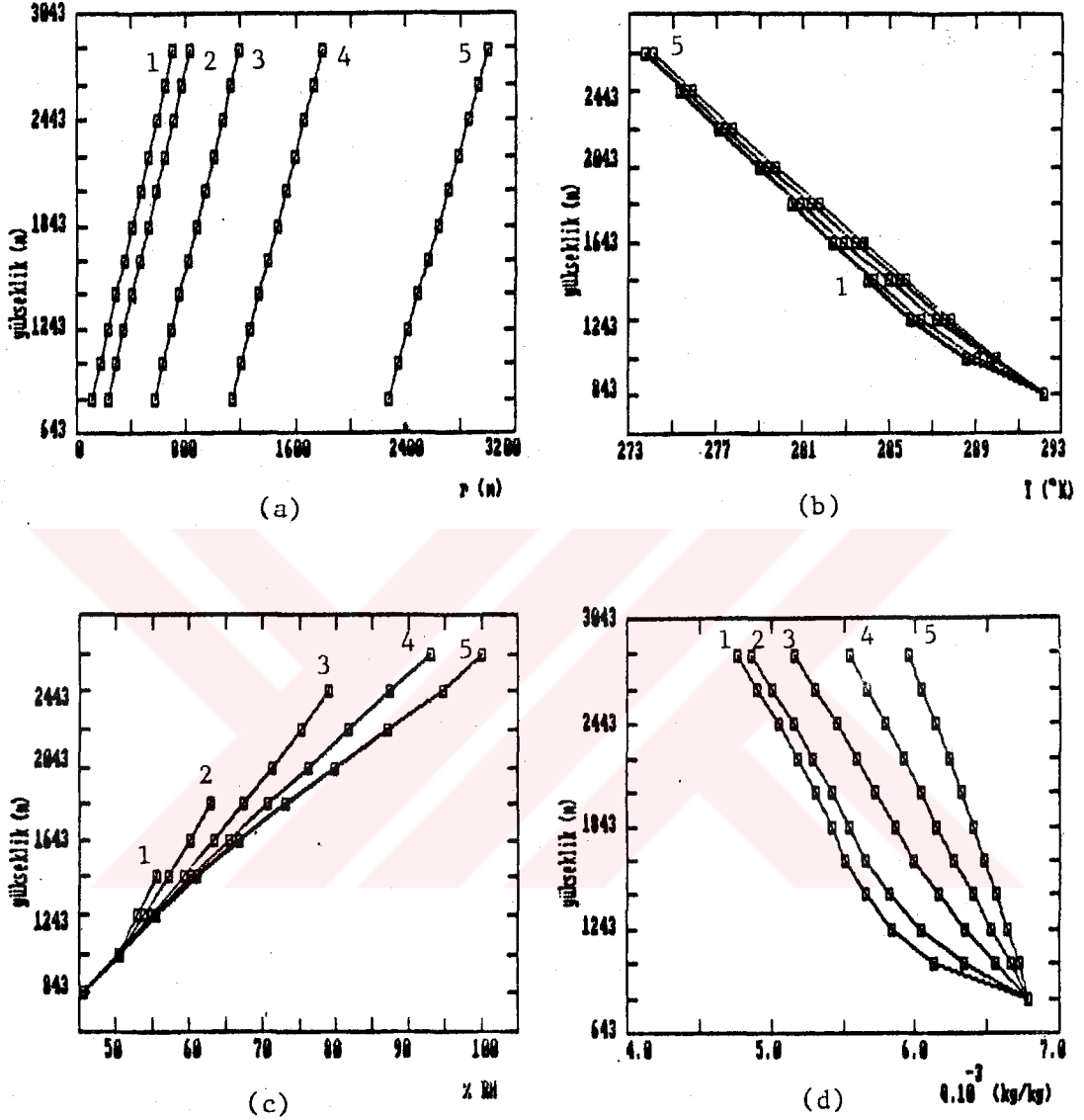
4- Kütlenin düşey değişimi (4.1) eşitliğinden her 10 metrelik dilim için katılım olayı gözönüne alınmak suretiyle hesaplanmakta ve konvektif hücre içindeki toplam nem, toplam enerji ve düşe hızın yükseklikle değişimi (4.1)-(4.4) eşitliklerinin EK-C6'da detayı verilen Runge-Kutta (4. mertebeden) sağ taraflı 1. dereceden diferansiyel denklem çözümü alt programı yardımı ile çözülmektedir. Böylece sözkonusu olan bu dört parametrenin termal veya cumulus bulutu içindeki düşey değişimi belirlenmiş olur.

4.2. Model Sonuçları ve Gözlemlerle Karşılaştırılması

4.2.1. Modelden Elde Edilen Sonuçlar

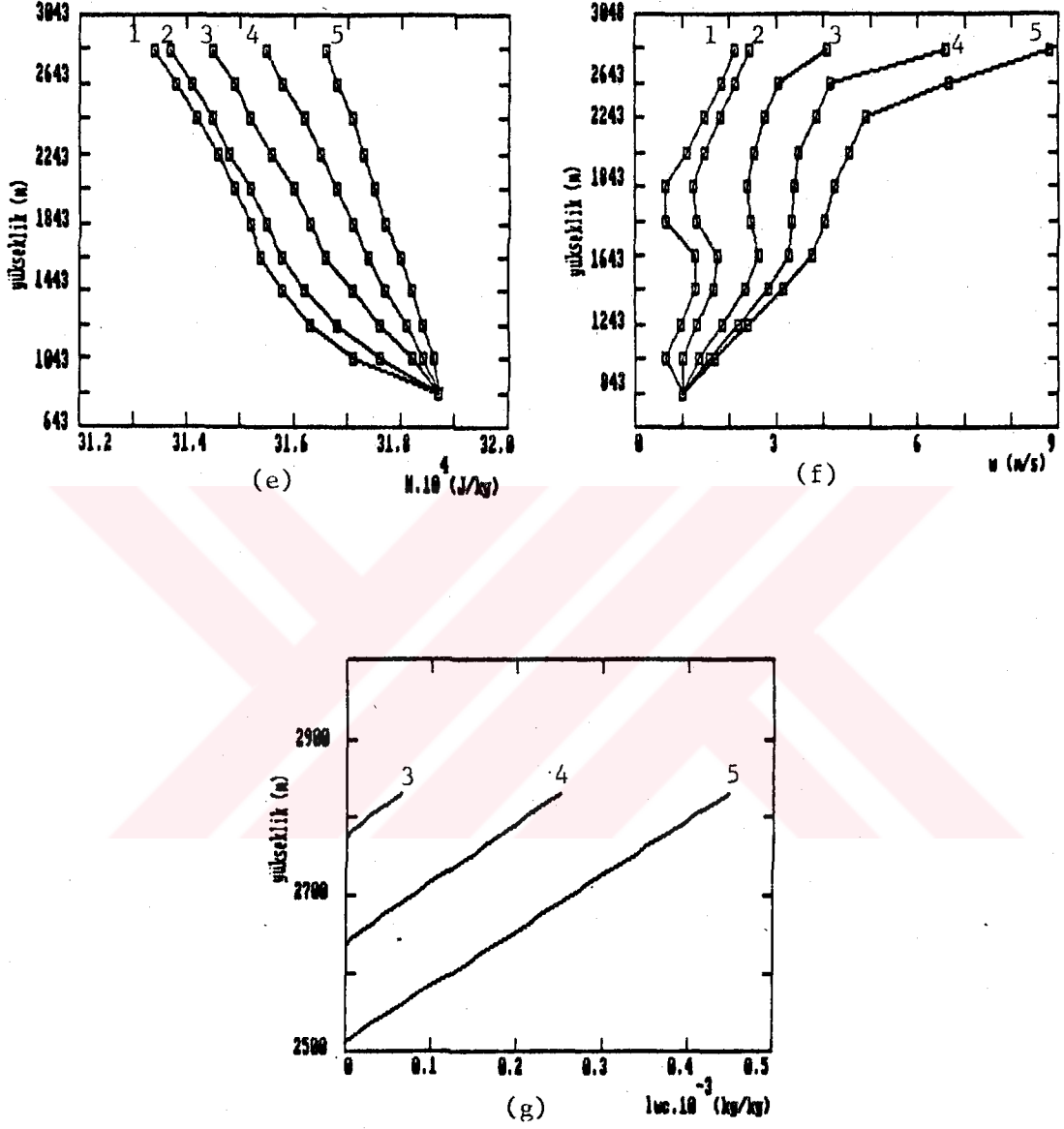
EK-C5'de programı verilen 1-boyutlu termal-cumulus modelinin uygulanmasıyla (sadece Ankara için sondaj verilerine göre farklı iki güne ait) elde edilen sonuçlardan bazıları Şekil 4.3 ve 4.4 de verilmektedir.

Şekil 4.3.a ve Şekil 4.4.a termal (veya cumulus bulutu) yarıçapının yükseklikle değişimini vermektedir. Her iki şekilden görüldüğü gibi yarıçap yükseklikle lineer olarak artmaktadır. Şekil 4.3



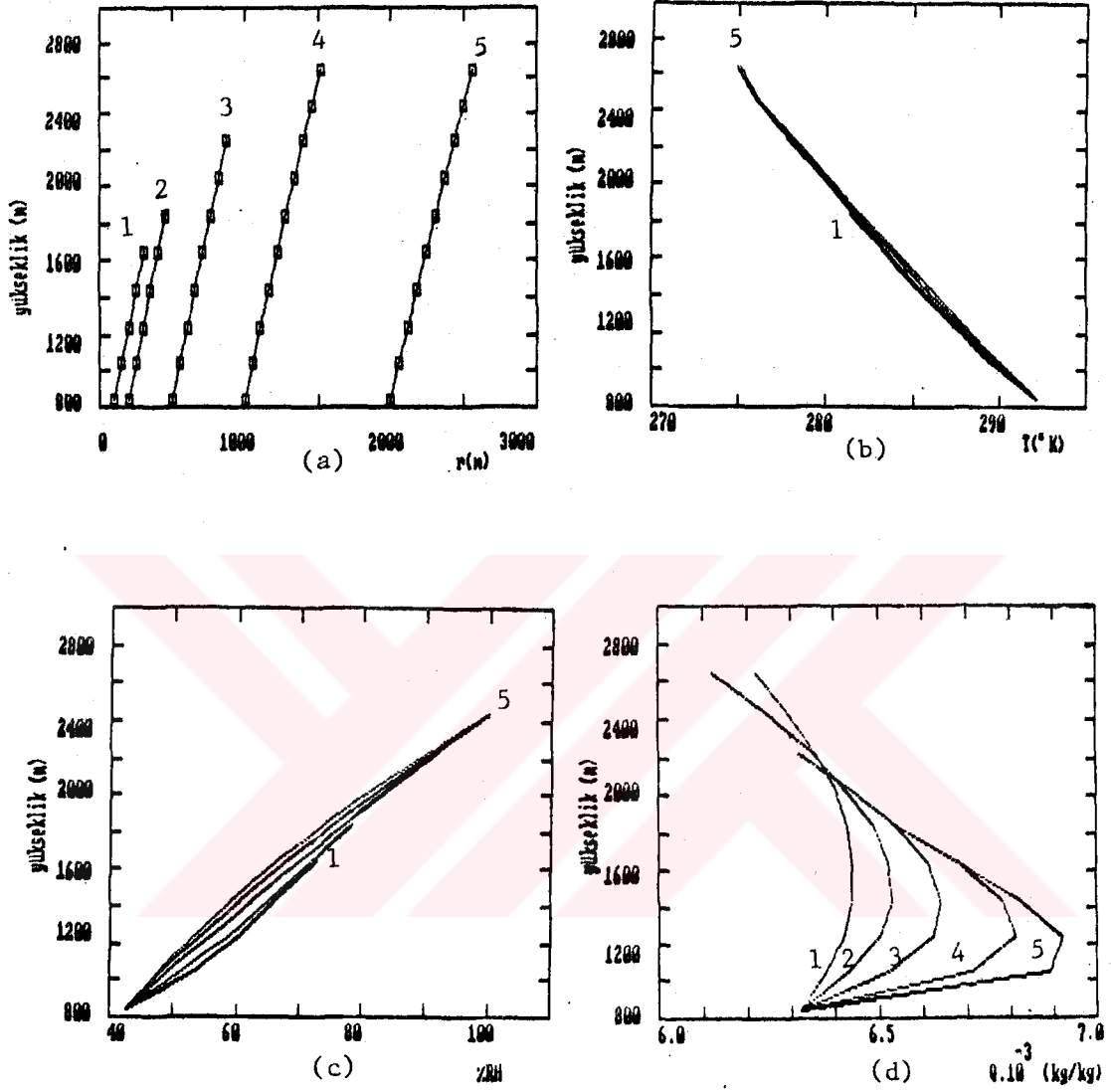
Şekil - 4.3

Ankara radyosonde verilerine göre model sonuçları (17/5/1986, 12⁰⁰ GMT)
(a) Termal veya bulut yarıçapının, (b) sıcaklığın, (c) bağıl nemin,
(d) toplam özgül nemin yükseklikle değişimi. (1) $r = 100$ m, (2) $r = 200$ m,
(3) $r = 500$ m, (4) $r = 1000$ m, (5) $r = 2000$ m.



Şekil - 4.3

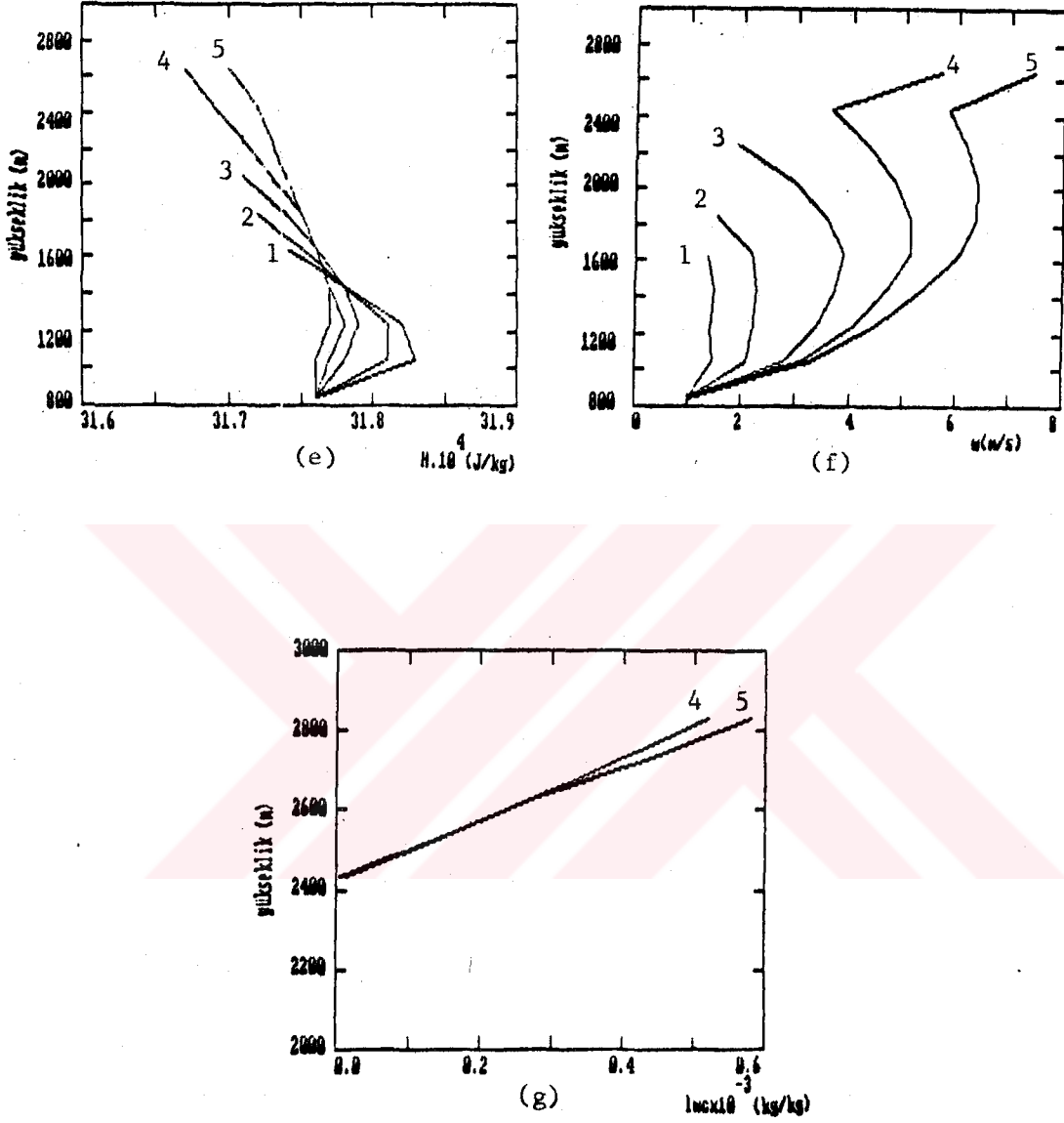
Ankara radyosonde verilerine göre model sonuçları (devam) (17/5/1986, 12⁰⁰ GMT), (e) Toplam statik enerjinin, (f) düşey hızın, (g) sıvı su miktarının yükseklikle değişimi.



Şekil - 4.4

Ankara radyosonde verilerine göre model sonuçları (18/5/1986, 12⁰⁰ GMT)

- (a) Termal veya bulut yarıçapının, (b) sıcaklığın, (c) bağıl nemin, (d) toplam özgül nemin yükseklikle değişimi. (1) $r = 100$ m, (2) $r = 200$ m, (3) $r = 500$ m, (4) $r = 1000$ m, (5) $r = 2000$ m.



Şekil - 4.4

Ankara radyosonde verilerine göre model sonuçları (devam) (18/5/1986, 12⁰⁰ GMT). (e) Toplam statik enerjinin, (f) düşey hızın, (g) sıvı su miktarının yükseklikle değişimi.

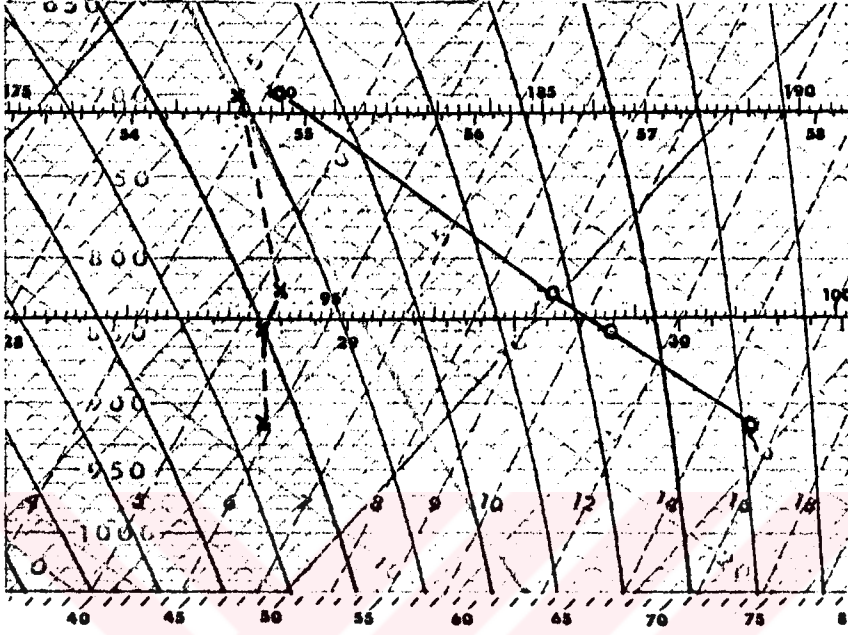
ve Şekil 4.4 de verilen eğriler (1), (2), (3), (4) ve (5) şeklinde numaralanmış olup, bu numaralar sırasıyla $r = 100$, $r = 200$, $r = 500$, $r = 1000$, $r = 2000$ metre termal veya cumulus bulutunun başlangıç yarıçapını göstermektedir.

Şekil 4.3.b ve Şekil 4.4.b'de termal (veya cumulus bulutu) içindeki sıcaklığın yükseklikle değişimi görülmektedir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi sıcaklık sistem içinde yükseklikle azalmaktadır. Şekil 4.4.b'de beş eğrinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da başlangıç yarıçapının, sıcaklığın yükseklikle değişiminde çok önemli olmadığını göstermektedir. Gerçekte 18/5/1986 tarihinde konvektif aktivite çok fazla olduğundan katılım olayı da daha etkin olmuştur.

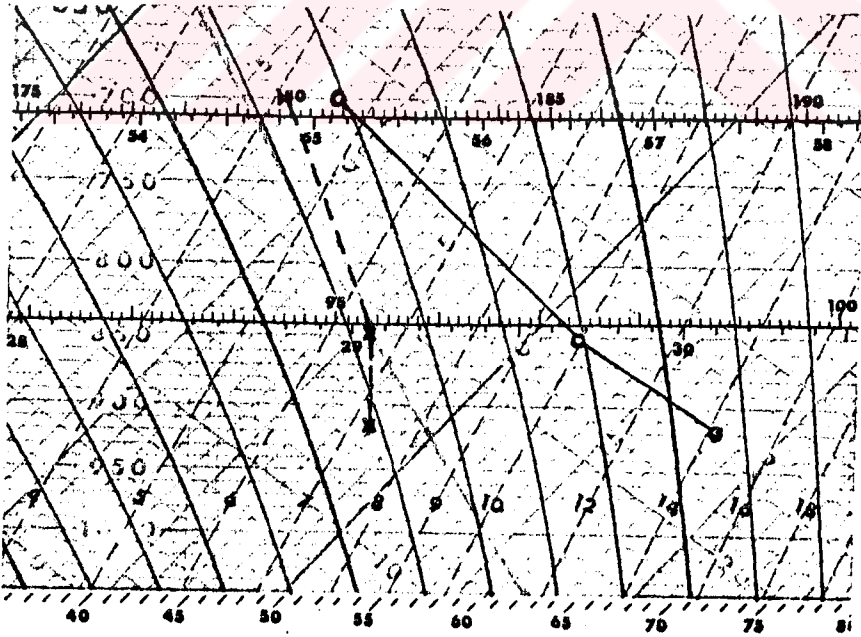
Şekil 4.3.c ve Şekil 4.4.c'de bağıl nemin yükseklikle değişimi görülmektedir. Termallerin yarıçapı arttıkça bağıl nemi yükseklikle artış göstermektedir. 17/5/1986 tarihli model sonuçlarına göre kuru termaller 2500 metreye kadar çıkabilmekte, bir sonraki gün ise 2400 metre dolayında doymaya ulaşarak, cumulus bulutu haline dönüşmektedir. Oluşan termaller kuru termaller olup, (5) eğrisi hariç diğer termallerde 2500 metre kadar yükselmelerine rağmen, hava doymaya ulaşamamaktadır (Şekil 4.3). 18/5/1986 tarihindeki termaller, bulut altı termali olup, 2400 metre civarında doyma meydana gelmektedir.

Toplam özgül nemin yükseklikle değişimi ise Şekil 4.3.d ve Şekil 4.4.d'de gösterilmektedir. 17/5/1986 tarihli model sonuçlarına göre kuru termaller içinde toplam nem yükseklikle azalmakta ve bu azalmanın, başlangıç yarıçapı 100-200 metre arasında olan termaller için daha hızlı olduğu görülmektedir. Şekil 4.3.d ve Şekil 4.4.d de görülen özgül nem profilleri çığ noktası sıcaklığına bağlı bir değişim göstermektedir (Şekil 4.5). Şekil 4.4.d'de özgül nem, termalin büyüklüğüne bağlı olarak 1200 metre ile 1500 metre arasında maksimumdan geçmektedir.

Şekil 4.3.e ve Şekil 4.4.e'de termal veya cumulus bulutu içindeki toplam enerjinin yükseklikle değişimi görülmektedir. Bu değişim nem değişimine benzerdir. Çünkü toplam enerji ifadesinde $(C T)_p$ ve (gz) enerjilerinde sıcaklık yükseklikle lineer veya lineere yakın bir



(a)



(b)

Şekil - 4.5
Ankara radyosonde verileri
(a) 17/5/1986-1200 GMT, (b) 18/5/1986-1200 GMT

şekilde değiştiğinden H'nin değişimi de toplam özgül nem değişimine benzerdir.

Düşey hızın yükseklikle değişimi Şekil 4.3.f ve 4.4.f'de verilmektedir. Büyük termallerde ((4) ve (5) eğrileri) düşey hız, yarıçapa bağlı olarak artmakta, küçük termallerde ise yarıçapa ilâveten basınç ve sıcaklığın etkisi de önem kazanmaktadır. Büyük termaller belirli bir yüksekliğe ulaştıktan sonra bulut oluşturabilmektedir. Bu yükseklik 2400-2500 metre civarındadır. Bulut oluştuktan sonra düşey hızın yükseklikle değişimi tabandan itibaren artma göstermektedir.

Sıvı su miktarı bulutlar için sözkonusu olup, yükseklikle değişimi Şekil 4.3.g ve Şekil 4.4.g'de verilmektedir. Şekil 4.3.g'de termallerin doymaya ulaşarak 2500 metre civarında cumulus bulutları haline dönüştüğü görülmektedir. Şekil 4.4.g'de ise bulut taban seviyesi yaklaşık 2400 metre dolayındadır. Başlangıç yarıçapı küçük olan bulutların büyük olanlara nazaran daha yukarı seviyede doymaya ulaştığı Şekil 4.3.g'de görülmektedir. Diğer bir deyişle, büyük yarıçaplı termallerle oluşan bulutların taban seviyeleri, diğerlerine nazaran daha aşağı seviyededir.

4.2.2. Model Sonuçlarının Gözlemlerle Karşılaştırılması

17-18 Mayıs günlerindeki uçuşlar esnasında gözlemlendiğine göre 18/5/1986 günü 17/5/1986 gününe nazaran daha nemli ve kararsız (türbülanslı) bir gündür. Ölçümler, 17 Mayıs tarihinde yerden 500-600 m yukarıda bulunan yaklaşık 250-300 metre yarıçapındaki termaller içinde, 18 Mayıs tarihinde ise, yerden 1600 metre yukarıdaki 500-1000 m yarıçaplı bulutlar içinde yapılmıştır.

1-boyutlu termal-cumulus modeli ile gözlem sonuçları karşılaştırılırsa:

a- Sıcaklık için model ve gözlem sonuçları arasındaki fark termallerde % 1, bulutlarda % 3.5 civarındadır.

b- Bağıl nem için model ve gözlem sonuçları arasındaki fark termallerde % 6-% 8 civarındadır.

c- Toplam özgül nem için modelle gözlem verileri arasındaki fark termallerde ve bulutlarda % 21 ile % 33 arasında bulunmuştur.

d- Toplam enerji miktarı için model ve gözlemlerden hesaplanan değerler arasındaki fark termaller içinde % 3, bulutlar içinde % 7 civarındadır.

e- Düşey hız değerleri için modelle gözlemler arasındaki fark, yaklaşık olarak % 33 dür.

f- Bulut sıvı su miktarı değerleri için model sonuçları ile gözlem verilerinin yaklaşık % 50 sinin uyum sağladığı belirlenmiştir.

1-boyutlu termal-cumulus modelinin üstün ve eksik yönleri özetle şöyle sıralanabilir:

1- Termal içinde her 10 metrelik tabaka için yoğunluk hesaplanmış ve böylece modelde basınç değişimi gözönüne alınmıştır.

2- Modelde katılımın sadece yanlardan olduğu kabul edilmiştir. Gerçekte bir cumulus bulutuna çevre havanın katılımı bulut tepelerinden de olmakta ve bu olay buharlaşmayı hızlandırmaktadır.

3- Modelde bulut su damlacığı konsantrasyonu gözönüne alınmamıştır.

Sonuç olarak, model ve gözlemler arasındaki farklılığın nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz:

1- 1-boyutlu termal-cumulus modelinin çalıştırılması için gerekli düşey sondaj verileri olarak, İnönü'de bir radyosonde istasyonunun bulunmaması nedeni ile Ankara radyosonde verileri kullanılmıştır. Her ne kadar rakımları birbirine çok yakın ise de iki istasyon arasında 250 km.lik bir mesafe olması nedeni ile İnönü'nün lokal coğrafi yapısının etkileri gözönüne alınamamıştır (Isparta, Ankara ve İstanbul radyosonde istasyonu verilerinin interpolasyonu sonucunda İnönü için hesaplanan düşey sondaj verilerinin modele uygulanması ile, hesaplanan değerlerin gözlemlerden çok daha farklı olduğu görüldüğünden burada yer verilmemiştir).

2- Ölçüm uçuşlarının radyosonde gözlem saati ile aynı saatlerde yapılması planlanmış ancak, teknik nedenlerden dolayı gözlemlere 1-1.5 saatlik bir farkla başlanabilmiştir (sabah saatlerinde yapılan gözlemler ise zaman farkının 3-4 saat olması nedeni ile model sonuçları ile karşılaştırılamamıştır).

3- Tablo C.1 de özellikle toplam özgül nem ve sıvı su miktarı değerlerinin de modelde gözlemlerden daha düşük olduğu saptanmıştır. Bu durum, modelde katılımın sadece yanlardan olduğu kabulüne, karışma olayının ve damlacık konsantrasyonunun gözönüne alınmamasına yorulmuştur.

4- Sıcaklık ve bağıl nem için model, gözlem sonuçları ile büyük uygunluk göstermiştir (% 92-% 99). Bir önceki maddede açıklanan nedenlerden dolayı, toplam enerji de gözlemlerden hesaplanan değerlere nazaran biraz düşük bulunmuştur. Ancak yine de gözlemlerle model sonuçları arasındaki farkın bir hayli düşük olduğu görülmektedir.

5- Modelde düşey hız değeri gözlemlere nazaran daha fazla bulunmuştur. Burada modelde, başlangıç koşulu olarak düşey hızın $w_0 = + 1$ m/s olarak seçilmesi etken olmuştur. Ayrıca yatay uçuş planı (sabit hız ve seviye uçuşu) sırasında, planörün variometre değerlerinin düşey hava hızı olarak kabul edilmesi, yeterli ölçüm verisinin olmayışı nedeni ile incelenememiştir.

6- Gerek termal ve gerekse bulut içinde yeteri kadar gözlem verisi olmadığından model ve gözlem sonuçları arasında bir korelasyon yapılamamıştır.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma gözlem ve ölçüm bölümü ve teorik bölüm olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Üçüncü bölümde verilen gözlem ve ölçüm kısmı ile ilgili sonuçlar şöyle sıralanabilir: Çalışmada sığ cumulus bulutları içindeki sıvı su miktarını ölçmek amacı ile sıcak tel prensibine dayanan bir sensör geliştirilmiştir. Laboratuvarlarımızda yapılan bu sensör, rüzgâr tüneline kalibre edilmiş, 1986 yılı Mayıs ayında yapılan ölçümler sırasında denenmiştir. Bu sensörle bulut taban, orta ve tepe seviyelerinde yapılan çeşitli ölçümlerle bir cumulus bulutu içindeki sıvı su miktarının düşey profili çıkarılmıştır. Bulut tabanından itibaren artmaya başlayan sıvı su miktarının, bulut tepesine doğru tekrar azalmaya başladığı, gözönüne alınan ve yarıçapı 250-500 metre olan cumulus-humilis ve cumulus-mediocris bulutları içindeki sıvı su miktarı değerlerinin $0.5-1.2 \text{ g/m}^3$ arasında değiştiği görülmüştür. Sıvı su miktarına ilâveten, uçak ve planöre uygun şekilde monte edilen bir termo-couple, bağıl nem-ölçeri ve düşey akselerometre yardımı ile termaller ve cumulus bulutları içinde ve civarlarında sıcaklık, bağıl nem ve düşey ivme değerleri bir 'micro-logger'a kaydedilmiştir. Uçuş parametrelerinin (yükseklik, hız, düşey hız, düşey ivme) ve gözlemlerden hesaplanan toplam özgül nem ile toplam enerji değerlerinin yatay değişimleri incelenmiştir. Buna göre termal veya cumulus alanlarında kaldırıcı kuvvetlerin etkisi ile uçuş irtifasının arttığı gözlenmiştir. Aynı zamanda söz konusu alanlarda sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde de artışlar

kaydedilmiştir. Bu değişimlerden, termal bölgelerinin belirleyicisi olarak gözönüne alınan parametreler için bir eşik değerinin tayinine çalışılmıştır. Ancak sıcaklık değerleri, termallerin karışım bölgelerinde temsili olmamaktadır. Bu nedenle toplam özgül nem ve toplam statik enerji değerleri hesaplanmış, bu değerlerin standart sapmasının $1/4$ 'ü termal bölgeleri için bir eşik değeri olarak seçilmiştir. Bu kritere göre tayin edilen termal alanları gözlemlerle büyük ölçüde uyum sağlamaktadır.

Sabit hız, sabit irtifa uçuşu sırasında planör kontrol paneline ait variometre değerleri düşey hava hızı olarak yorumlanmıştır. Termal bölgeleri belirlendikten sonra, bu bölgelerdeki düşey hava hızı değişiminin incelenmesi ile termallerin pozitif ve negatif hız bölgeleri tayin edilmiştir.

Gözlem ve ölçüm çalışmaları sırasında kaydedilen meteorolojik parametreler arasında ikili ve üçlü lineer ilişkiler araştırılmış, hesaplanan korelasyon katsayılarına göre ilişkilerin, termaller içinde bulutlara nazaran daha kuvvetli olduğu bulunmuştur. Bu durum, bulutların mikrofizik yapısının termallerden daha karmaşık olmasındandır. Termal alanlarında en kuvvetli ilişkilerin, toplam özgül nem ile bağıl nem, toplam özgül nem ile toplam statik enerji, bağıl nem ile toplam statik enerji arasında olduğu görülmüştür. Üçlü lineer korelasyon katsayılarına göre, parametrelerden birinin değişiminin diğer ikisinin değişimi üzerinde ne derece etki oluşturduğu anlaşılabilmektedir. Termaller içinde, sıcaklığın değişimi ile bağıl nem ve statik enerji değişimi arasında çok kuvvetli lineer ilişki olduğu görülmektedir.

Dördüncü bölümde verilen teorik kısım ile ilgili sonuçlar şöyle sıralanabilir: Çalışmanın teorik kısmında, geliştirilen 1-boyutlu termal-cumulus modelinde çevre verileri olarak radyosonde değerleri kullanılmıştır. Ölçümlerin yapıldığı İnönü (Eskişehir)'de bir radyosonde istasyonu bulunmadığı için Ankara radyosonde istasyonuna ait veriler modele uygulanmıştır. Modelde termal veya cumulus bulutlarının başlangıçta 100, 200, 500, 1000 ve 2000 metre yarıçaplı bir koni içinde yükseldiği kabul edilmiş, meteorolojik parametrelerin

termaller (veya cumulus bulutları) içindeki düşey değişimleri hesaplanmıştır. Model sonuçlarına göre, sıcaklığın yükseklikle azaldığı ve termal veya cumulus bulutunun başlangıç yarıçapı değerinin sıcaklığın yükseklikle değişimine çok etki etmediği belirlenmiştir. Termaller içinde bağıl nem değerleri yükseklikle artış göstermektedir. Doyma seviyesine ulaşan termaller, 2400 ve 2500 metre civarında cumulus bulutları haline dönüşmüştür. Toplam enerjinin yükseklikle değişimi, toplam özgül nem değişimine çok benzer bir durum göstermektedir. Yükseklikle termallerin yarıçapı arttıkça, düşey hızları da önce artmakta, sonra azalmaya başlamaktadır. Bulut tabanından itibaren düşey hız değerleri tekrar artma göstermektedir. Modelde sıvı su miktarı değerleri de yaklaşık 2400-2500 metre civarında oluşan bulut tabanından itibaren artmaktadır.

Gözlem sonuçları ile model sonuçları karşılaştırıldığında, sıcaklık, bağıl nem ve toplam enerji değerleri arasındaki fark % 8 den azdır. Modelde Ankara radyosonde verilerinin uygulanması nedeniyle özellikle düşey hız ve sıvı su miktarı değerlerinde gözlemlerle model sonuçları arasında farklılık oluşmuştur. Modelde hesaplanan düşey hız ve sıvı su miktarı değerleri ile gözlemler arasındaki farklılığın nedenleri şu şekilde sıralanabilir. Rakım değerleri yakın olmakla beraber, İnönü ile Ankara radyosonde istasyonu arasında yaklaşık 250 kilometrelik bir mesafenin bulunması ve İnönü'nün özel coğrafi yapısı (NE-SW doğrultusunda uzanan 300 m yüksekliğindeki tepeler) önemli etken olmaktadır. Ölçüm uçuşlarının radyosonde gözlemleri ile eş zamanlı olarak yapılmasına çalışılmış, ancak teknik nedenlerden dolayı bazı ölçümlerde 1-1.5 saatlik bir zaman farkı olmuştur. Ayrıca modelde katılımın sadece yanlardan olduğu kabul edildiğinden ve bulut içindeki damla konsantrasyonu dağılımı gözönüne alınmadığından dolayı toplam özgül nem gözlemlere nazaran düşük hesaplanmıştır. Buna karşılık 1-boyutlu termal-cumulus modelinde bulut ve termal içinde her 10 metrelik tabaka için yoğunluk hesaplanmış olup, buna göre model, termal veya cumulus bulutları içinde sıcaklık, bağıl nem, toplam statik enerjinin düşey değişimlerinin hesaplanmasında iyi sonuç vermektedir.

Yukarıda sıralanan sonuçları özetlersek:

1- Sıcaklık, bağıl nem, toplam özgül nem, toplam statik enerji, düşey hız, sıvı su miktarı ve uçuş irtifasının zamanla değişimi incelenmiştir. Termal (veya cumulus bulutu) bölgelerinde bu değerlerin artış gösterdiği gözlenmiştir. Gözlenen termaller, zayıf ve orta güçte termaller grubuna girmekte ve düşey hız değerleri 1.5 m/s yi aşmamaktadır.

2- Sıvı su miktarının ölçümü amacı ile sıcak tel prensibine dayanan platin telli bir sensör geliştirilmiştir. Sensör rüzgâr tünelinde sıkı cumulus bulutlarının simülasyonu ile uçuş hızını temsil eden hava hızında kalibre edilmiştir. Sıvı su miktarının bulut tabanından itibaren bulut orta seviyesine doğru arttığı ve bulut tepesine doğru tekrar azaldığı gözlenmiştir. Ölçülen sıvı su miktarı değerleri 0.5-1.2 g/m³ arasında değişmektedir.

3- Gözlem sonuçlarına göre, özellikle toplam özgül nem ve statik enerji salınımlarının standart sapmasının 1/4'ü termal bölgesinin varlığını belirten bir kriter olarak saptanmıştır. Bu eşik değerinin aşıldığı bölgeler, termal alanları olarak yorumlanmış ve gözlenmiştir.

4- Bulutların mikrofizik ve termodinamik yapılarının termallere nazaran daha karmaşık olması nedeni ile parametreler arasındaki lineer korelasyon katsayılarının termaller için, bulutlarınkine nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür.

5- Ankara radyosonde verilerinin 1-boyutlu termal-cumulus modeline uygulanması ile elde edilen sonuçların gözlemlerle ortalama olarak % 90 uyum sağladığı görülmüştür.

Aşağı troposferdeki konvektif aktivitenin gözlem ve ölçümlerle ve teorik olarak incelendiği bu çalışma, daha sonraki çalışmalara bir temel teşkil edecektir.

Yukarıda sunulan sonuçların ışığında, bu konu ile ilgili olarak daha sonraki çalışmalar için şu öneriler getirilebilir:

1- Gerek sıcaklık ve gerekse bağıl nem ölçerinin hassasiyeti bulut içinde azalmaktadır. Bu sensörlerle termaller içinde, bulutlara nazaran daha hassas ölçümler alınmıştır. Özellikle bulut içi ölçüm tekniklerini geliştirmek ve daha hassas ölçüm almak amacı

ile, platin resistanslı termometreler, Lyman-Alpha higrometresi (sırasıyla sıcaklık ve nem ölçümleri için)'nin kullanılması önerilebilir.

2- Düşey hız ölçümü için planör-variometresi kullanılmıştır. Ancak bu ölçümlerin sabit hız ve irtifa uçuşu koşulu ile yapılması gerekmektedir. Bu iki koşulun sağlanamadığı durumlarda, bir cirometre ve attak açısı ölçerinin ilâvesi ile düşey hava hızı değerleri hesaplanabilir [36, 41, 49, 50].

3- Platin telli sıvı su miktarı ölçerine ilâveten bakır telli bir sıvı su miktarı ölçerinin yapılması ve her iki sistemin aynı anda denenmesi, sıvı su miktarı ölçümlerinin kalitesini artıracaktır. Bu sistemin kalibrasyonu daha kolay olmakla beraber kontrol devresi çok komplikedir [3, 42].

4- Veriler, her 1 veya 2 saniyede bir okunarak, birer dakikalık ortalamalar şeklinde bir micro-logger'a kaydedilmiştir. Çalışmamızda, maksimum veri toplayabilmek için çok düşük hızlarda uçulmuş, özel uçuş planları uygulanmıştır. Daha geliştirilmiş bir kayıt sisteminin (örneğin data-acquisition sistemi) kullanılması ile daha sık ve daha hassas bir kayıt yapılabilir.

5- Daha fazla veri ile termallerin büyüklüğünün yükseklikle değişimi ve termallerin sayısı konusunda istatistiksel bir çalışmaya gidilebilir.

6- Termaller içindeki pozitif hız alanları özellikle planörlerin irtifa kazanması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada İnönü için özgül nem ve toplam enerji değerlerindeki artışlar (standart sapmalarının 1/4'ünü aşan bölgeler) termal alanları olarak yorumlanmıştır. Termal alanlarının ve özellikle bu alanlardaki pozitif hız bölgelerinin (yukarı akış bölgelerinin) belirlenebilmesi için planörlerin kanat uçlarına monte edilecek nem sensörlerinden yararlanılabilir. Uçuş sırasında aralarında yaklaşık 17 m mesafe bulunan bu sensörlerden göstergesinde artma gösteren sensör tarafına doğru manevra yapılarak, termallerin kaldırıcı bölgeleri kolayca bulunabilir ve planörlerin daha uzun süre havada kalması sağlanabilir. (Bu sistem Scorer tarafından sıcaklık ölçümü için önerilmiştir, ancak sıcaklık elemanı özellikle termallerin karışma bölgelerinde nem kadar temsili olmamaktadır. Bu nedenle sıcaklık ölçümleri ile yapılan manevraların bazıları sonuçsuz kalmıştır [10]).

7- Termal konveksiyonun şiddetinin tayini için günlük maksimum sıcaklığı bilmek gerekmektedir. İyi bir şekilde öngörülen bu maksimum sıcaklık değeri ve radyosonde istasyon verileri yardımı ile, gözönüne alınan bölge için özel abaklar geliştirilebilir. Bu abaklar yardımı ile konveksiyon tabakasının tepesi ve termallerin şiddeti tayin edilebilir. Daha uzun ve istatistiksel bir çalışmayı gerektiren bu işlem, aynı zamanda, İnönü Hava Eğitim Merkezinin faaliyet dönemlerinde gerçek atmosfer koşullarında da denenebilir [18].

8- Çalışmanın teorik bölümünde geliştirilen 1-boyutlu termal-cumulus modeli ile meteorolojik parametrelerin düşey değişimi ve termallerin çeşitli seviyelerdeki gücü hakkında bilgi sağlanmaktadır. Modele zaman değişkeninin ilâvesi ile, konvektif hücre (termal veya cumulus bulutu) içindeki meteorolojik parametrelerin zamanla değişimi de incelenebilir [17].

9- Bu çalışma, bulut modifikasyonu konuları için bir temel teşkil etmektedir. Sıvı su miktarı ölçümleri ve model öngörülleri ile bulutun sıvı su potansiyeli hakkında bilgi elde edilmektedir. Bu potansiyelin modifiye edilmesi, bu çalışmanın ışığında incelenebilecek konulardan birisidir. Yani daha ileri ölçüm olanaklarının sağlanmasıyla konvektif aktivitenin gücü ve ömrü, yağış kontrolü ve bulut modifikasyonu konularında önemli adımlar atılabilir [51-55].

KAYNAKLAR

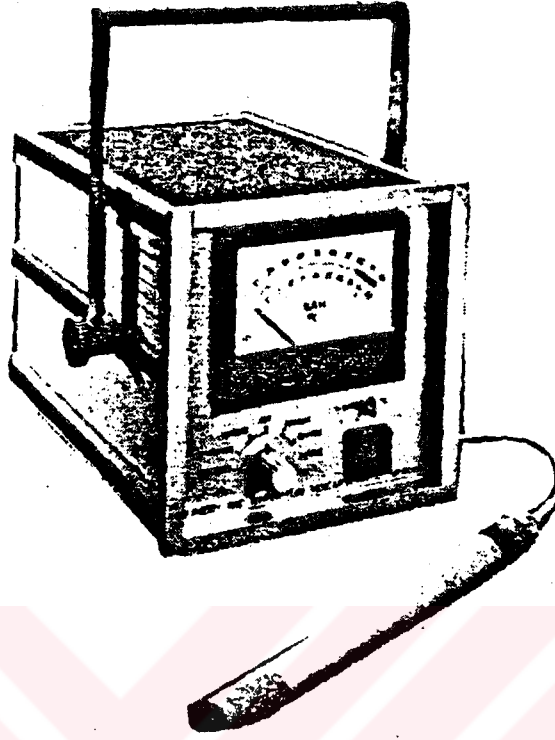
- [1] BEYNON, W.J.G., Notes for Three Introductory Lectures, ICTP-SMR/113-20, Trieste (1984).
- [2] BAYERS, H.R., General Meteorology, Mc-GrawHill Book Company, New York, (1974).
- [3] LATHAM, J., Cloud Microphysical Process, ICTP, Trieste (1985).
- [4] LUDLAM, P.H., Clouds and Storms, The Penn. State Univ. Press, University Park (1980).
- [5] ROGERS, R., A Short Course in Cloud Physics, Pergamon Press, Oxford (1976).
- [6] The Boundary Layer Sub-Programme, Gate Report, No.5, (1973).
- [7] Convection Sub-Programme, Gate Report, No. 7, (1974).
- [8] IRIBARNE, J.V. and W.L. GODSON, Atmosphere Thermodynamics, Reidel Publishing Company, Netherlands (1982).
- [9] LONGHETTO, A., Atmospheric Planetary Boundary Layer Physics, Elsevier Scientific Publishing Company, New York (1980).
- [10] SCORER, R.S., Environmental Aerodynamics, Coll House Press, (1978).
- [11] DAVIS, L.G., An Investigation of the Dynamics and Microphysics of Clouds, NSF Report, The Penn. State Univ. Press (1967).
- [12] FLEAGLE, R.G. and J.A. BUSINGER, An Introduction to Atmosphere Physics, Academic Press, London (1963).
- [13] BUSINGER, J.A. and J.S.KHALSA, On the Structure of Convective Elements in the Air Near the Surface Turbulent Fluxes Through Sea Surface; Wave, Wave Dynamics and Prediction, Plenum Press, (1977).
- [14] PALMER, T.N., Notes for Lectures on Dynamics, ICTP, SMR/113-19, Trieste (1984).

- [15] PROPPACHER, H.R., Microphysics of Clouds and Precipitation, D. Reidel Publishing Company (1980).
- [16] TUNA, T. and Y. DAYLAN, Bulut Fizigi, D.M.İ. Gn. Md.lüğü, (1971).
- [17] BAKER, M., Cloud Modelling, ICTP Workshop Notu, Trieste (1985).
- [18] Handbook of Meteorological Forecasting for Soaring Flight, WMO-No.95, (1978).
- [19] BERRY, F.A., Handbook of Meteorology, The Maple Press Company, (1973).
- [20] MASON, B.J., The Physics of Clouds, 2nd Ed., Clarendon Press, (1971).
- [21] MASON, B.J., Clouds, Rain and Rain Making, 2nd Ed., Cambridge University Press (1975).
- [22] MATVEEV, I.T., Cloud Dynamics, D.Reidel Publishing Company, Holland (1984).
- [23] MORTON, B.R., Turbulent Gravitation Convection From Maintained and Instantaneous Sources, Proc. Roy. Soc. A., Volume 234 (1955).
- [24] PIGGOT, D., Gliding-A Handbook of Soaring Flight, Adam and Charles Black, London (1958).
- [25] RIEHL, H., Energy Transfer in the Tropical Subcloud Layer Measured with DC-6 Aircraft During GATE, Tellus, 30, 524-536 (1976).
- [26] DAS, P.K., Numerical Models, ICTP, SMR/113-14-26 (1984).
- [27] BRADENTHAL, R.E., M.B. BAKER, Convection and Entrainment Accross Stratified Interfaces, Journal Geophysical Research, Vol. 90, No.D7, pp.13055-13062 (1985).
- [28] HEIMANN, D., A simple Numerical Model of Thermals Cumulus Convection, Aero Revue, Vol.2, 26-34 (1986).
- [29] TELFORD, J.W., Convective Plumes in a Convective Field, Journal of the Atm. Sciences, Vol. 27, No.3, 347-358 (1970)..
- [30] WARNER, J. and J.W. TELFORD, Convection Below Cloud Base, Journal of the Atm. Sciences, Vol. 24, 374-382 (1967).
- [31] LAUNDER, B.E., Studies in Convection, Vol. 2, Academic Press, London (1977).
- [32] AKMAN, S., Deney ve Ölçme Tekniğine Giriş, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası (1978).

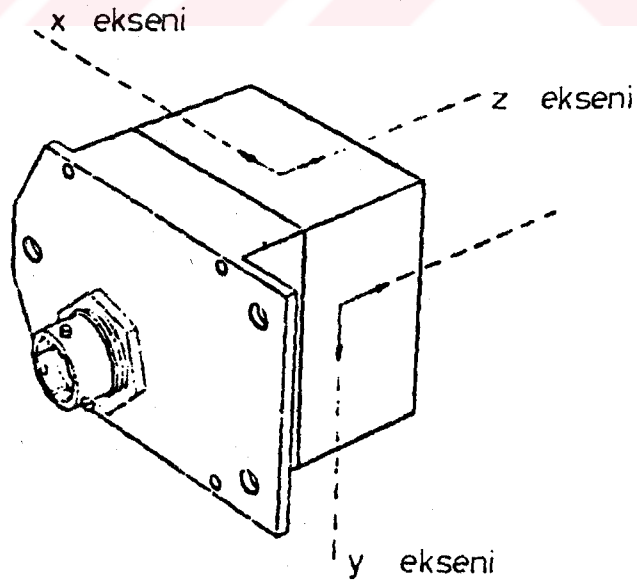
- [33] AYTAÇ, M., Fotogrametri, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İTÜ (1973).
- [34] BARNET, J.J., Measuring Techniques and Measurements, ICTP-SMR/113,15,18 (1984).
- [35] THOMAS, L., Measuring Techniques and Measurements, ICTP, SMR/113-10.
- [36] LAWSON, R.P., On the Airborne Measurement of Vertical Air Velocity, J. Appl. Meteor., 19, 1416-1419 (1980).
- [37] LENSCHOW, D.H. and P.L. STEPHENS, The Role of Thermals in the Convective Boundary Layer, Bound. Layer Meteor., 19, 509-533 (1980).
- [38] ÖZELGİN, Z.G., Uçuş Tecrübeleri, İTÜ Makina Fakültesi, Uçak İnşaatı Kürsüsü, (1979).
- [39] SIMPSON, J. and D.K. LILLY, Mesoscale Meteorology Theories, Observations and Models, D.Reidel Publishing Company (1983).
- [40] JOCHUM, A., and H. WILLAKE, Tessungen zum Initialimpuls bei der Ausbildung Atmosphärischer Konvektion und zur Thermisch/Dynamischen Turbulenz, DFVLR, (1984).
- [41] LARSEN, H.R., Aircraft Measurements of Mountain Wave Cloud. Communication à la VIII eme Conférence Internationale sur la Physic des Fuages, Vol.1, France, 157-160 (1980).
- [42] KAMPE, H.J., A Continuously Recording Water-Content Meter, J. Met., 13, 64-66 (1955).
- [43] BARLA, M.C., İstatistik, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Semineri (1986).
- [44] ERSOY, Y., M.MERT, Boyut Analizi ve Fiziksel Ölçmeler, ODTÜ, Ankara (1977).
- [45] PEREMECİ, E., Sayısal Deney Yöntemleri, İTÜ Makina Fakültesi-Uçak Elemanları ve Motorları Kürsüsü, Gümüşsuyu (1983).
- [46] WARNER, J., Time Variation of Updraft and Water Content in Small Cumulus Clouds, J. Atmos. Sci. 34, 1306-1312 (1977).
- [47] WARNER, J., Photogrametry From Aircraft Side Camera Movies Winter Monex, J. Appl. Meteor., 20, 1510-1526 (1981).
- [48] TELFORD, J.W., Aircraft Observations in the Planetary Boundary Layer Under Stable Conditions, Boundary Layer Meteorology, 10, pp. 353-377 (1976).
- [49] GAMO, M., S. YAMAMOTO ve O. YOKOYAMA, Airborne Measurements of the Free Convective Internal Boundary Layer During the Sea Breeze, J. Meteor. Soc. Japan, 60, 1284-1298 (1982).

- [50] GROSSMAN, R.L., A Procedure for the Correction of Bias in Winds Measured From Aircraft, J. Appl. Meteor. 16, 654-658 (1977).
- [51] ÖNEY, S. ve Y. BORHAN, Yukarı Troposfer ve Aşağı Stratosferdeki Düşey Hareketler, İTÜ Dergisi, Cilt 37, Sayı 1 (1979).
- [52] DALMAZ, M., Dik Gelişmeli Bir Bulutun Enerji ve Yağış Kapasitesi, Eskişehir Devlet Müh. Mim. Akademisi Dergisi, S.2, s. 131-147 (1977).
- [53] ASLAN, Z., "Termaller, Termal Konveksiyon ve Dispersiyon", Hava Kirliliği Sempozyumu, İstanbul, (1985).
- [54] ÖNEY, S., "Thermals at Central Anatolia", XIXth OSTIV Congress, Rieti, (1985).
- [55] ASLAN, Z., "Models and Glider Measurements in Thermals", XIXth OSTIV Congress, Rieti, (1985).

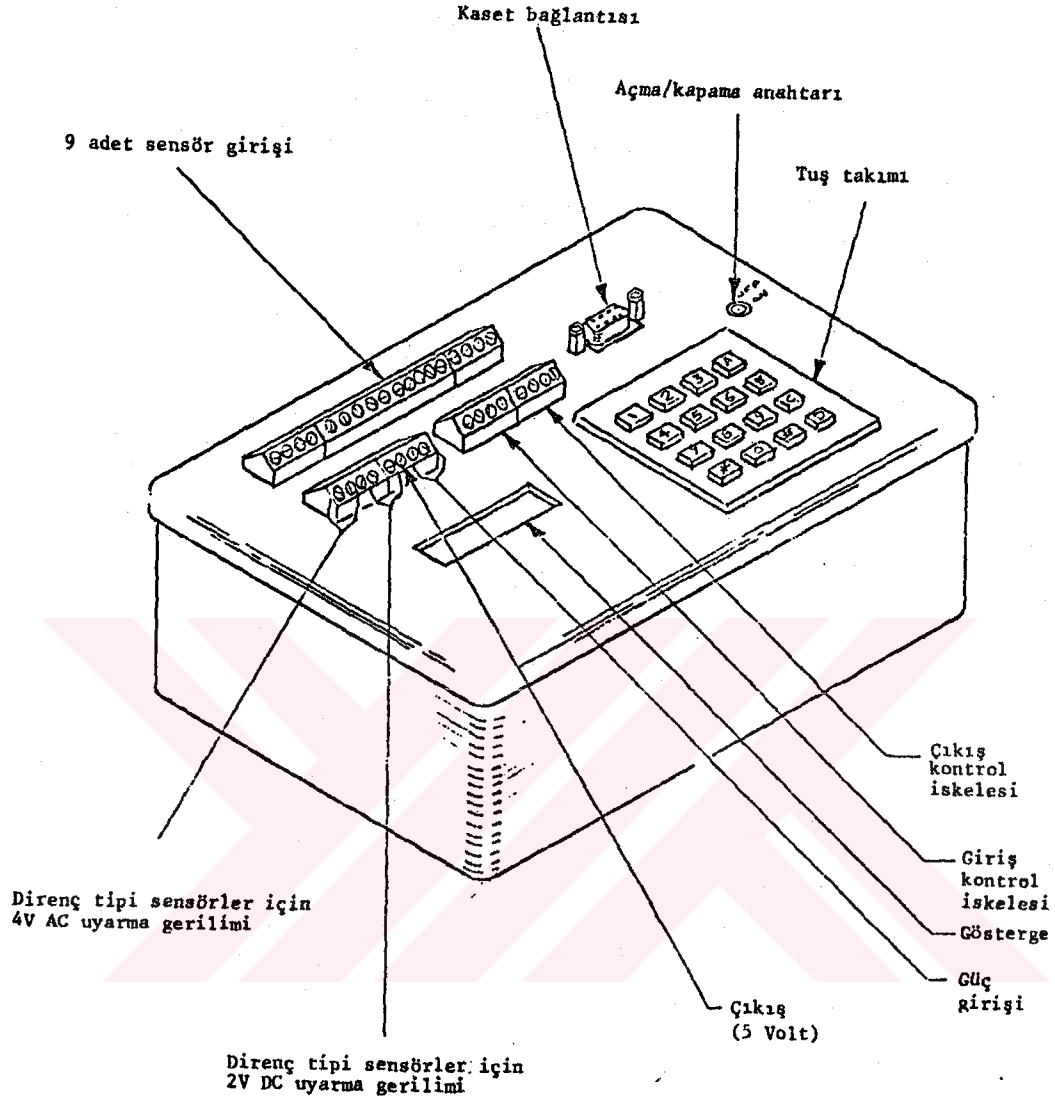
EK - A



Şekil - A.1
Bağıl nem ölçeri



Şekil - A.2
Düşey akselerometre



Şekil - A.3
Veri kayıt sistemi (CR-21 micrologger)

TABLO - A.1 - Ankara radyosonde verileri (12⁰⁰ GMT)

	17/5/1986					18/5/1986			
P	916	1000	850	821	700	917	1000	850	800
Z	0	149	1545		3130	0	162	1556	3140
T	19		12.4	9.8	-3.3	18		11.4	-1.9
T _d	5		2.4	1.8	-4.5	8		5.4	-3.3

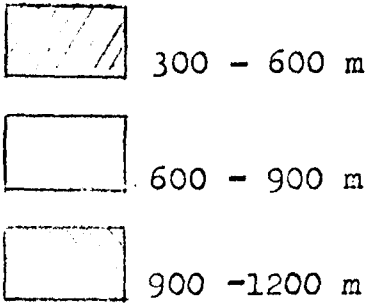
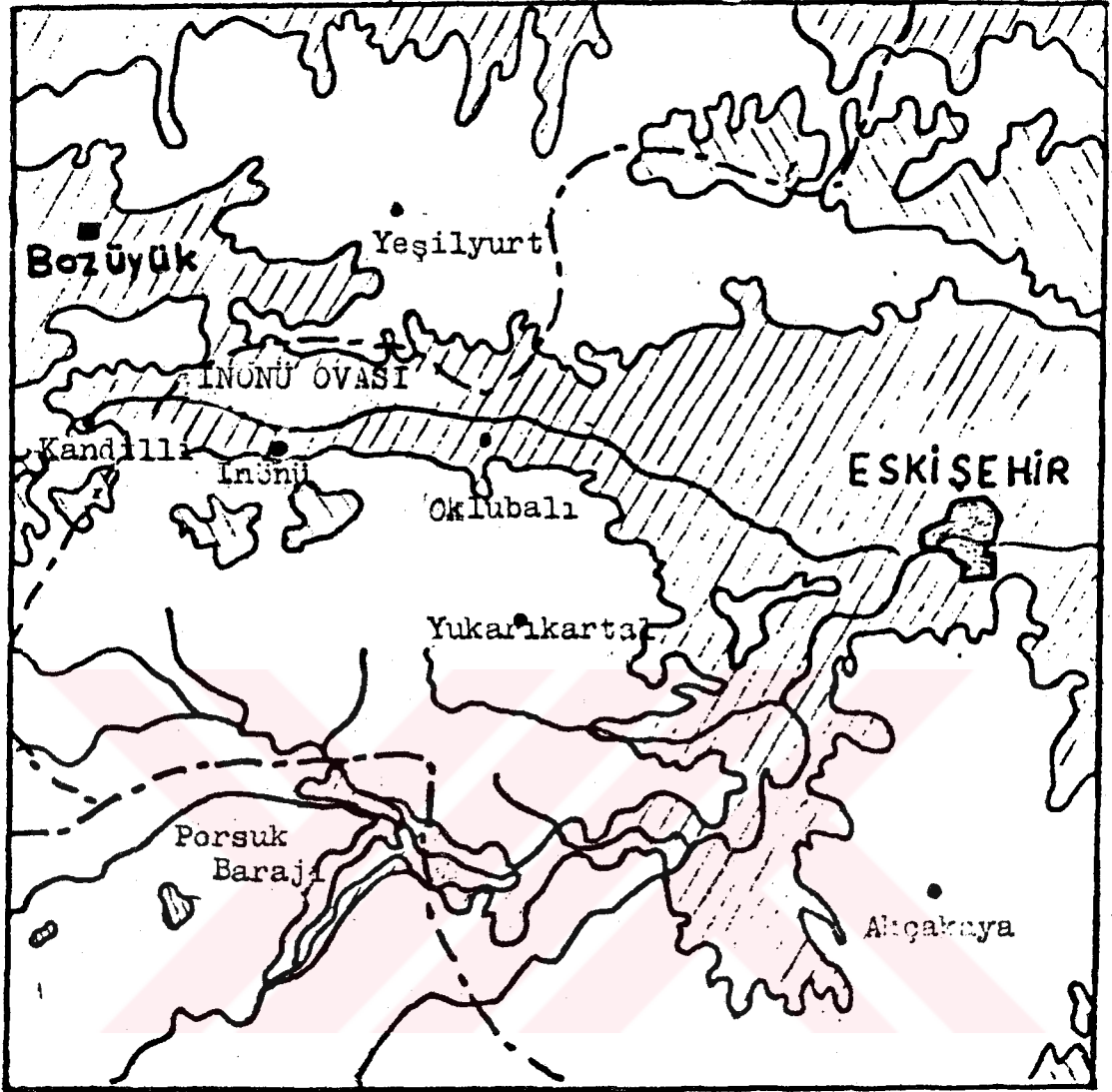
TABLO - A.2

Sıvı Su Miktarı Ölçerinin Kalibrasyonu Sırasında Kullanılan Rüzgâr Tünelinin Karakteristik Özellikleri (*)

Devir Sayısı	:1000 devir/dakika
Güç	:20 kV AC.
Fan	:V- Kayışlı
Difüzer	:3 bölmeli sabit basınç tipli
Dinlenme Odasının Büyüklüğü	:1.5 m ²
Deney Odasının İç Kesiti	:457x457 mm (açık deney odası)
Deney Odası Pencere Büyüklüğü (3 Adet)	:572x267 mm
Malzeme	:Maun üzerine kaplanmış hus ağacı kontroplağı
Deney Odası Basıncı	:Yaklaşık atmosfer basıncı
Deney Odası Maximum Hava Hızı	:33 m/sn
Tünelin Toplam Büyüklüğü	:4.6x8.2x2.2 m

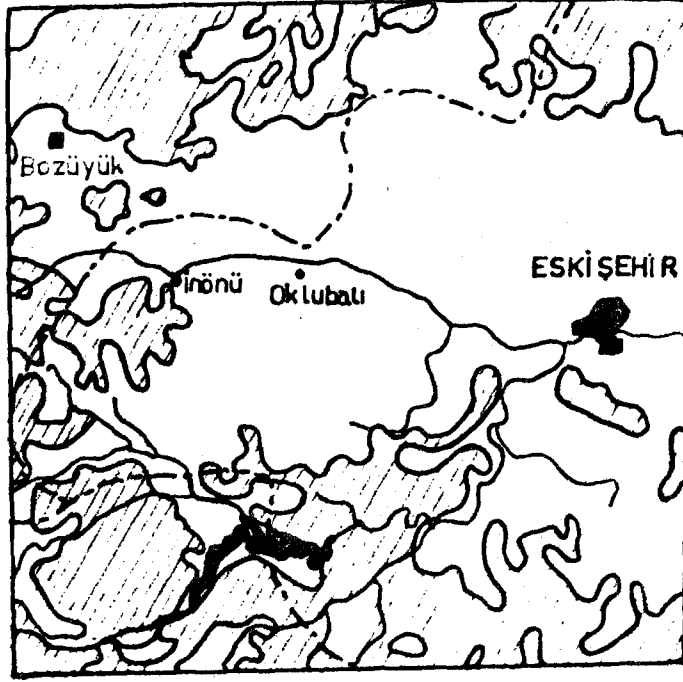
NOT: Kalibrasyon çalışmaları sırasında hava hızı yaklaşık 30 m/s ye ayarlanmış, sıcaklık (0°C - 28°C), bağıl nem değerleri (% 35 - % 65) arasında ölçülmüştür.

(*) Hava Harb Okulu Aerodinamik Laboratuvarında bulunan üfleme, açık devreli bir ses altı hava tüneldir.



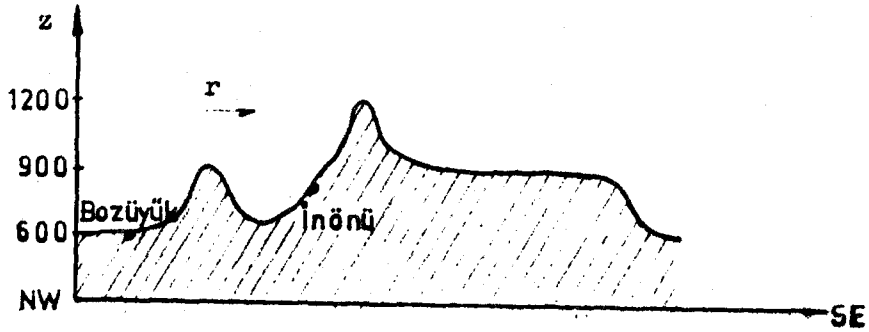
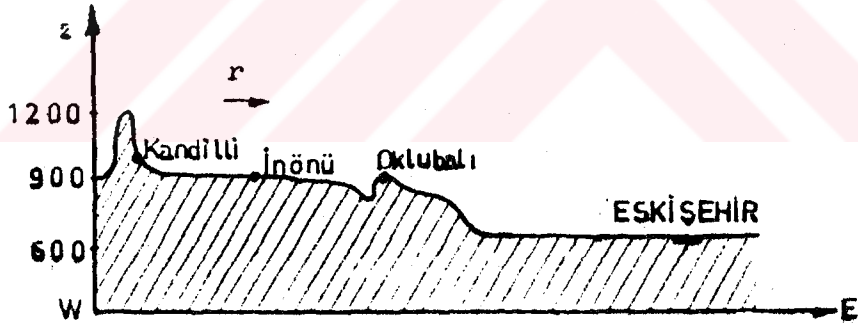
10 km.

Şekil - A.4.a
İnceleme bölgesinin topolojik haritası



bitki örtüsü 10 km.

Şekil - A.4.b
İnceleme bölgesinin bitki örtüsü haritası



Şekil - A.4.c
İnceleme bölgesinin hakim rüzgâr yönüne paralel topoğrafik kesiti

EK - B

TABLE - B.1- 1985 yılı gözlem verileri
(a) 29/Eylül/1985 (Siat-ö.E.), (b) 29/Eylül/1985 (Siat-ö.S.), (c) 30/Eylül/1985 (Fuchacz)

t	a			b			c		
	Z	T	RH	Z	T	RH	Z	V	T
1	1615.4	281.8	41.6	1846.1	282.2	44.0	690	-2.5	282.8
2	1670.3	281.5	40.8	1837.5	282.2	44.6	840	2.2	281.9
3	1682.5	281.9	39.7	1828.8	282.0	46.1	970	0.9	281.3
4	1673.4	282.4	38.3	1822.7	282.0	47.7	1025	4.2	279.0
5	1682.5	282.7	36.5	1798.3	282.4	48.2	1280	1.3	278.3
6	1682.5	282.7	29.3	1767.6	282.8	47.5	1360	1.3	277.8
7	1694.7	282.3	33.8	1719.1	282.8	47.6	1440	0.3	277.5
8	1706.9	282.2	33.2	1700.8	283.2	46.9	1460	-0.3	278.0
9	1706.9	281.5	32.8	1682.5	283.6	48.0	1440	-0.3	279.3
10	1700.8	281.2	36.9	1691.6	283.7	48.6	1420	-0.8	279.5
11	1673.4	280.5	34.8	1682.5	283.4	51.7	1370	-0.8	280.4
12	1676.4	280.5	39.7	1682.5	283.3	51.6	1320	-0.7	280.2
13	1664.2	280.7	40.8	1700.8	283.0	52.3	1280	-0.9	281.3
14	1679.4	280.8	46.1	1688.6	283.2	51.5	1225	-0.1	281.8
15	1682.5	277.4	44.5	1679.4	283.9	50.9	1220	-0.2	281.5
16	1687.7	280.7	47.5	1639.8	282.9	51.8	1205	0.4	281.0
17	1679.4	281.4	46.3	1676.4	282.9	52.0	1230	-0.2	280.9
18	1684.0	281.7	40.8	1706.9	282.8	52.0	1220	0.5	281.2
19	1684.0	281.5	33.7	1713.0	284.1	49.6	1250	-0.6	286.2
20	1688.6	281.4	35.5	1713.0	283.4	52.8	1215	-0.9	282.0
21	1699.7	281.3	32.4	1706.9	283.6	51.0	1160	-0.8	282.7
22	1702.0	282.2	35.4	1703.8	283.6	51.8	1100	0.2	282.2
23	1713.0	281.9	32.6	1703.8	283.6	52.0			
24	1706.9	281.7	31.4	1691.6	283.6	52.6			
25	1703.8	281.3	31.8	1688.6	283.7	52.0			
26	1700.6	281.5	33.6	1691.6	283.4	52.0			
27	1685.6	281.6	34.6	1685.5	283.6	52.1			
28	1673.4	281.5	32.4	1688.6	283.6	52.2			
29	1676.4	281.5	33.3						
30	1676.4	281.5	37.8						
31	1655.1	281.0	40.2						

TABLO - B.2 - 1986 yılı gözlem verileri
(c) 18/5/1986 (Cessna, Ö.E.), (d) 18/5/1986 (Cessna, Ö.S.)

c		d							
t	T	RH	LWC	T	Z	LWC	P	Q $\times 10^{-3}$	H $\times 10^4$
1	15.0	43.1		19.0	416.8	0.660	880.9	8.59	32.7
2	13.8	34.6		18.4	620.8	0.587	860.1	8.60	32.8
3	13.4	48.9		18.0	779.8	1.199	844.2	9.20	33.1
4	12.5	55.9		17.9	925.8	0.647	829.9	8.88	33.2
5	12.6		0.923	17.8	1111.8	1.050	812.0	8.88	33.3
6	13.0		0.929	17.5	1230.8	1.124	800.7	9.79	33.7
7	13.7		0.898	18.5	1382.8	0.966	786.5	9.96	34.0
8	14.3		1.152	19.4	1528.8	0.998	773.2	10.4	34.3
9	14.3		0.893	18.7	1438.8	0.631	784.9	9.27	34.0
10	15.3		1.254	20.7	1400.8	1.072	784.9	9.27	34.0
11	16.3		0.929	21.1	1367.8	0.671	787.9	9.69	34.1
12	17.3		0.942	20.3	1376.8	0.975	787.1	9.92	34.1
13	17.0		0.968	19.7	1419.8	0.581	783.1	9.31	33.9
14	16.7		1.05	18.8	1541.8	0.956	772.0	9.18	33.9
15	17.5		1.054	20.0	1595.8	1.208	767.2	9.99	34.3
16	18.5		0.87	21.1	1571.8	0.614	769.3	9.73	34.3
17	17.7		0.917	21.8	1580.8	1.220	768.5	10.0	34.5
18	17.0		1.078	22.3	1580.8	0.681	768.5	9.55	34.4
19	18.0		0.905	22.6	1519.8	1.022	774.0	9.92	34.5
20	19.9		0.949	22.8	1449.8	0.600	780.3	9.18	34.2
21	20.8		0.788	23.3	1425.8	0.900	782.4	9.26	34.3
22	19.6		1.181	21.0	1425.8	0.581	782.4	9.38	34.1
23	18.7			22.7	1199.8	0.676	803.2	8.99	34.0
24	19.8	32.5		24.2	925.8	0.588	828.9	8.81	33.8
25	16.8	43.3		23.7	589.8	1.005	861.5	8.82	33.4
26	15.7	46.5		23.1	346.8	0.842	886.0	8.62	33.1
27	16.7	37.5		23.1	77.8	0.873	913.9	8.37	32.7
28	15.5	35.2							
29	14.4	36.0							
30	13.5	34.8							
31	13.3	39.2							

EK - B

PROGRAM B - Gözlem verilerine dayalı olarak basınç seviyesi, toplam
nem ve enerjinin hesaplanması

```
dimension t(100),rh(100),z(100)
character*20 file1,file2
call getarg(1,file1)
open(3,file=file1)
rewind 3
call getarg(2,file2)
open(4,file=file2)
rewind 4

c
c
c   define constants
c   g=9.8
c   rd=287.
c   al=2.5e6
c   cp=1.004e3
c   read the airport pressure(pascal), temperature (degC) and altitude
c   (FEET)
c   read(3,*) pzero,tzero,zzero
c   tzero=tzero+273.16
c   zzero=zzero*0.3048
c   do 10 i=1,100
c       read(3,*,end=50) t(i),rh(i),z(i)
c       z(i)=z(i)+zzero
c       t(i)=t(i)+273.16
c       use this for data above airport
10  continue
50  continue
    nmax=i-1

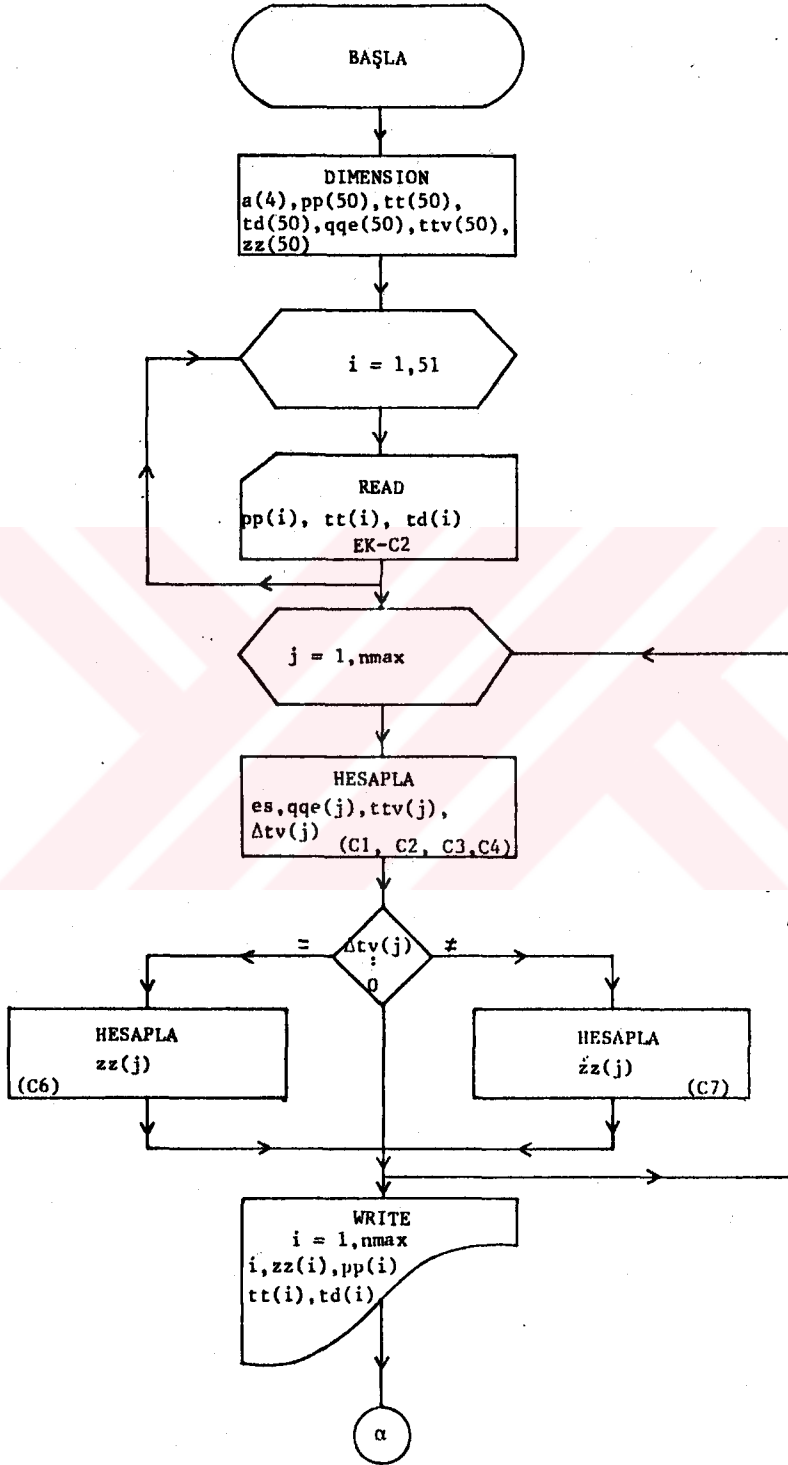
c   find pressure level for each altitude measurement
c
c
c   write(4,9000) pzero
c   write(4,9010) tzero
c   write(4,9020) zzero

c
c   write(4,8010)
c   p=pzero
c   do 30 i=1,nmax
c       find pressure level of current observation
c       if(i.eq.1) then
c           p=pzero*exp(-2.*g*(z(i)-zzero)/(rd*(t(i)+tzero)))
c       else
c           p=p*exp(-2.*g*(z(i)-z(i-1))/(rd*(t(i)+t(i-1))))
c       endif
c       es=esfunc(t)
c       qs=0.61*es/p
c       q=rh(i)/100.*qs
c       h=cp*t(i)+al*q+g*z(i)
c       write(4,8000) i,t(i),t(i)-273.16,rh(i),z(i),z(i)-zzero,p,q,h
8000  format(i4,2f8.2,2f8.2,2f8.2,f10.2,f8.5,f12.2)
30  continue
8010 format('   i      t(K)      t(C)      rh  z(msl)  z(gl)      p'
c      '      q      h')
9000 format('pressure at airport:  ',f10.2,' Pa')
9010 format('temperature at airport:',f10.2,' K')
9020 format('altitude of airport:  ',f10.2,' m')
    stop
    end

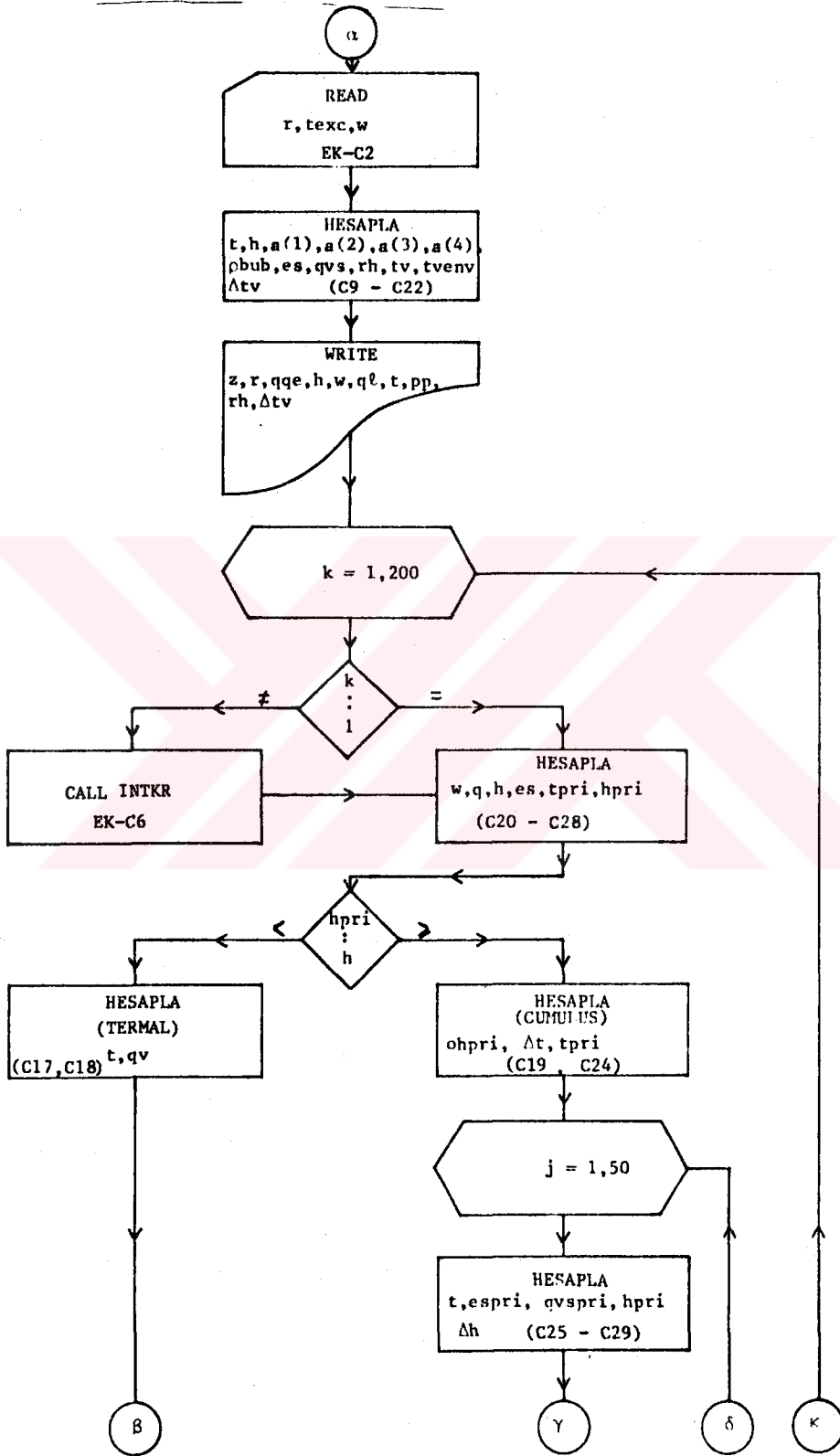
c
c
c   function esfunc(t)
c   calculate saturated water vapor pressure as function of t
c   esfunc=6.103e2*(273.16/t)**5.0065*exp(24.846*(1.-273.16/t))
c   return
c   end
```

EK - C1

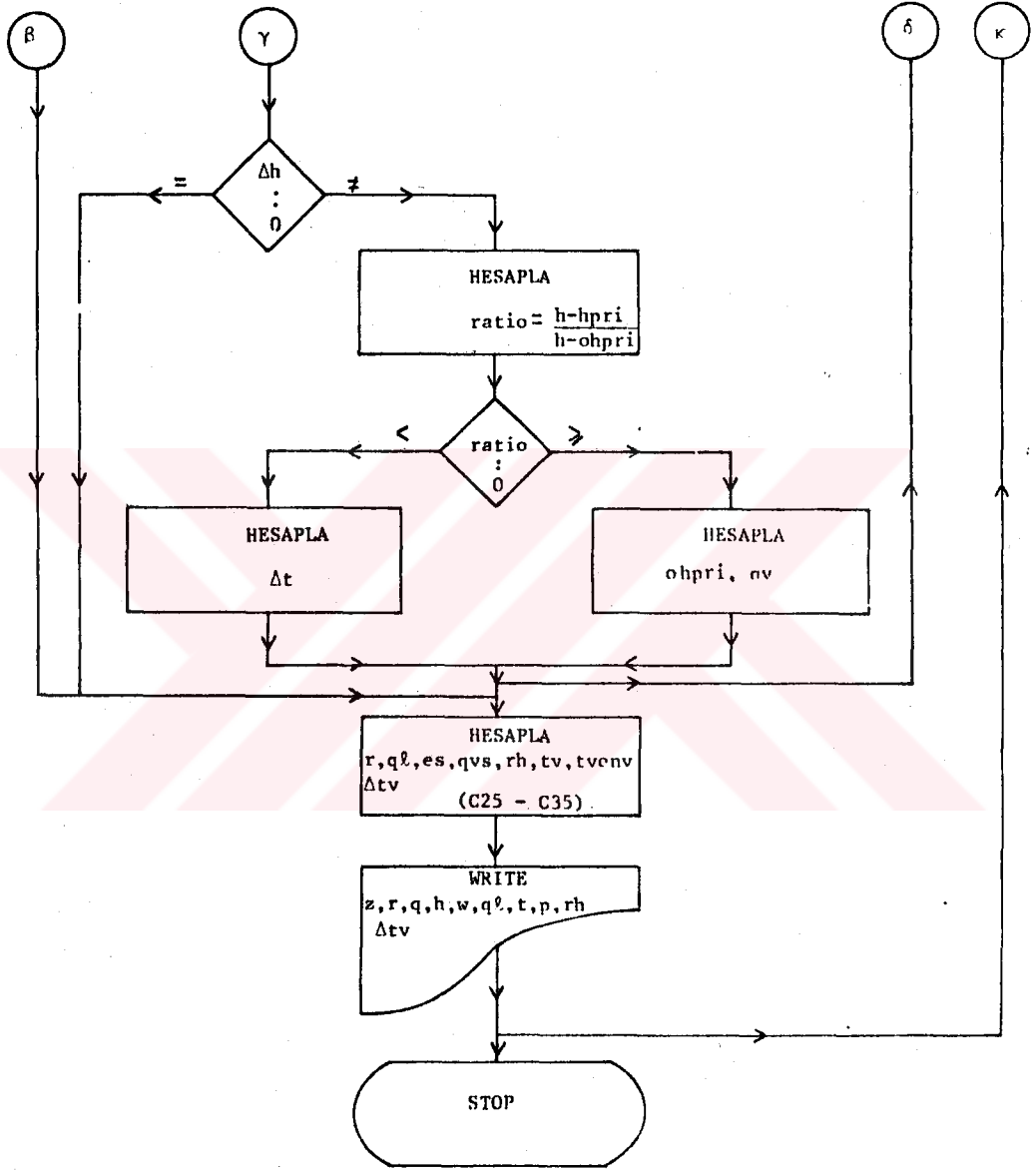
1-Boyutlu Termal-Cumulus Modeli Bilgisayar Programının Akış Diyagramı



AKIŞ DİYAGRAMI (devam)



AKIŞ DİYAGRAMI (devam)



NOT: C1 - C35 bağıntıları EK - C3 de verilmiştir.

EK - C2

1-Boyutlu Termal-Cumulus Modeli Girdi Tanımı

Ankara radyosonde verileri:

T: Çevre hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$),

T_a : Çevre havanın çığ noktası sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$),

P : Basınç (HPa).

Başlangıç Koşulları:

r: Termal veya cumulus bulutunun başlangıç yarıçapı (100, 200, 500, 100, 2000 m olarak alınmıştır),

ΔT : Termal veya cumulus bulutu ile çevre hava sıcaklığı arasındaki fark (1°C),

w : Termalin düşey hızı (1 m/s).

Sabitler:

ϵ : 0622

R_d : 287 ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$), kuru havanın gaz sabiti,

g : 9.8 (m/s), yerçekimi ivmesi,

c_p : $1.0046 \cdot 10^3$ ($\text{J/kg}^{\circ}\text{K}$), Sabit basınçta havanın özgül ısısı,

L : $2.5 \cdot 10^6$ (J/kg), yoğunlaşma gizli ısısı,

R_v : 461.5 ($\text{J/kg}^{\circ}\text{K}$), nemli havanın gaz sabiti,

α : $dr/dz = 0.25$.

EK - C3

1-Boyutlu Termal-Cumulus Modelinde Kullanılan Diğer Termodinamik Bağıntılar

Buhar basıncı (e_s) sıcaklığın fonksiyonu, özgül nem (q_e) buhar basıncının fonksiyonu, virtüel sıcaklık da özgül nemin fonksiyonu olarak şu şekilde verilmektedir [8, 19]:

$$e_s = 6.103.10^2 \left(\frac{273.16}{T} \right)^{5.0065} \times e^{24.846 \left(1 - \frac{273.16}{T} \right)} \quad (C.1)$$

$$q_e = 0.622 \frac{e_s}{p} \quad (C.2)$$

$$T_v = T(1 - 0.61 \times q_e) \quad (C.3)$$

Virtüel sıcaklık farkı:

$$\Delta T_v = T_{v_j} - T_{v_{j-1}} \quad (C.4)$$

Hidrostatik eşitlik:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho \quad (C.5)$$

Eğer atmosferin düşey sıcaklık gradyanı sabit ise ($\gamma = dT/dz = \text{sbt}$ ise):

$$z_2 = z_1 - \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) R_d \ln(p_2/p_1)}{g \cdot \ln(T_{v_2}/T_{v_1})} \quad (C.6)$$

Eğer $\Delta T_v = 0$ ise (izotermal atmosfer)

$$z_2 = z_1 - \frac{R_d \cdot T_{v_2}}{g} \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (C.7)$$

Burada R_d kuru havanın gaz sabitidir.

Çevre havanın nemli statik enerjisi [8, 17, 19]:

$$h_e = c_p T + Lq + gz \quad (C.8)$$

olup, burada c_p sabit basınçta özgül ısı, L yoğunlaşma gizli ısıdır.

Termalle çevresi arasındaki sıcaklık farkı:

$$\Delta T = T_1 + \Delta T \quad (C.9)$$

Termalin başlangıçtaki enerjisi:

$$h = c_p T + Lq + gz \quad (C.10)$$

Termalin toplam kütlesi:

$$M = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{p}{R_d T (1 - 0.61 q_e)} \quad (C.11)$$

Toplam nem:

$$M.Q = M.q_e \quad (C.12)$$

Toplam enerji:

$$M.H = M.h \quad (C.13)$$

Düşey momentum akısı:

$$M.w = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e w \quad (C.14)$$

Bulut veya termal yoğunluğu:

$$\rho_c = \frac{p}{R_d \cdot T (1 + 0.61 q_e)} \quad (C.15)$$

Doymuş buhar basıncı:

$$e_s = 6.103.10^2 \left(\frac{273.16}{T} \right)^{5.0065} \cdot e^{24.846 \left(1. - \frac{273.16}{T} \right)} \quad (C.16)$$

Özgül nemi:

$$q_v_s = 0.622 \frac{e_s}{p} \quad (C.17)$$

Virtüel sıcaklık:

$$T_v = T (1 + 0.61 \cdot q_e) \quad (C.18)$$

Termalle çevre sıcaklık farkı:

$$\Delta T_v = T_v - T_{v_e} \quad (C.19)$$

Düşey hız:

$$w = M w_e / M \quad (C.20)$$

Özgül nem:

$$q = M.q_e / M \quad (C.21)$$

Özgül enerji:

$$h = M.h_e / M \quad (C.22)$$

Üçlü nokta sıcaklığı (yoğuşma) ve enerji değerlerini hesaplamak için:

$$e_s = p \cdot q / 0.622 \quad (C.23)$$

$$T_{yog} = 1 / \left(1/273.16 - \frac{R_v}{L} \ln \frac{e_s}{6.103.10^2} \right) \quad (C.24)$$

Eğer $h_{pri} > h$ ise konvektif hücre (termal), bulut haline dönüşür ve bu durumdaki sıcaklığı, buhar basıncı, özgül nemi, enerjisi

$$T_{yoğ} = T_{yoğ} - \Delta T \quad (C.25)$$

$$e_{syog} = e_s f(T_{yoğ}) \quad (C.26)$$

$$q_{v_{syog}} = 0.622 \cdot e_{syog}/p \quad (C.27)$$

$$h_{yoğ} = c_p \cdot T_{yoğ} + L \cdot q_{v_{syog}} + gz \quad (C.28)$$

$$\Delta h = h - h_{yoğ} \quad (C.29)$$

Termal veya cumulus bulutunun yarıçapı:

$$r = \left(\frac{3M}{4\pi\rho_c} \right)^{1/3} \quad (C.30)$$

Bulutun sıvı su miktarı:

$$q_l = q - q_v \quad (C.31)$$

Son durum için bulutun doymuş buhar basıncı, bağıl nemi, virtüel sıcaklığı, çevre hava ile sıcaklık farkı şu bağıntılardan hesaplanır:

$$q_{v_s} = \frac{0.622}{p} e_s \quad (C.32)$$

$$rh = (q_v/q_{v_s}) \cdot 100 \quad (C.33)$$

$$T_v = T(1 + 0.61 - q_v - q_l) \quad (C.34)$$

$$\Delta T_v = T_v - T_e(1 + 0.61q_e) \quad (C.35)$$

EK - C4

1-Boyutlu Termal-Cumulus Modelinde Kullanılan Parametreler ve Değişkenlerin tanımı

pp	: Çevre hava basıncı (HPa),
tt	: Çevre hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$),
qqe	: Çevre havanın özgül nemi (kg/kg),
td	: Çevre havanın çığ noktası sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$),
ttv	: Virtüel sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$),
zz	: Yükseklik (m),
we	: Çevre havanın düşey hızı (m/s),
rhoenv	: Çevre havanın yoğunluğu (kg/m^3),
te	: Çevre havanın sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$),
tvenv	: Çevre havanın virtüel sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$),
qtot	: Toplam özgül nem (kg/kg),
h	: Nemli statik enerji (j/kg),
es	: Doymuş buhar basıncı (HPa),
texc	: Sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{K}$),
a(1)	: M, toplam kütle (kg),
a(2)	: MQ, toplam nem (kg),
a(3)	: MH, toplam enerji (J),
a(4)	: wM, düşey momentum (kgm/s),
q ℓ	: Sıvı su miktarı (kg),
rhobub	: Termalin yoğunluğu (kg/m^3),
qvs	: Özgül buhar kütlesi (kg/kg),
rh	: Bağıl nem,
deltv	: tv-tvenv, termal ve çevre hava virtüel sıcaklıkları arasındaki fark ($^{\circ}\text{K}$),
tpri	: Yoğuşma olayının başladığı durumda sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$),
hpri	: Yoğuşma durumunda enerji miktarı (j/kg),
aL	: Yoğunlaşma gizli ısısı (j/kg),
espri	: Yoğuşma durumunda doymuş buhar basıncı (HPa),
qvspri	: Yoğuşma durumunda özgül nem (kg/kg),
radius	: r, termal veya bulut yarıçapı (m),
alpha	: dr/dz,
aa(1)	: dM/dz (kg/m),
aa(2)	: d(MQ)/dz (kg/m),
aa(3)	: d(MH)/dz (j/m),
aa(4)	: d(Mw)/dz (kg/s),
gamma	: $-\Delta T/\Delta Z$ ($^{\circ}\text{K/m}$).

EK - C5

PROGRAM C - 1-boyutlu termal-cumulus modeli bilgisayar programı

```
c      program bubble
c      dry/wet thermal program
c
c      dimension a(4),pp(50),tt(50),td(50),qqe(50),ttv(50),zz(50)
c      character*50 file1,file2
c
c      common /sound/ pp,tt,qqe,ttv,zz,nma
c      common /envi/ p,qe,he,we,rhoenv,ts,tvenv
c      common /init/ ii
c      common /consta/ epsilo,rd,rv,cpa,al,g,alpha,pi
c      common /main/ z
c
c      -----
c      this next block opens data-file (3) and result-file (4)
c
c      call getarg(1,file1)
c      open(3,file=file1)
c      rewind 3
c      call getarg(2,file2)
c      open(4,file=file2)
c      rewind 4
c      -----
c
c      define constants
c      epsilo=0.622
c      rd=287.
c      g=9.80
c      cpa=1.0046e3
c      al=2.5e6
c      rv=461.5
c      alpha=0.25
c      pi=acos(-1.)
c
c
c
c      read environmental sounding (pp,tt,td)
c      do 10 i=1,51
c      read(3,*,end=20) pp(i),tt(i),td(i)
c      pp(i)=pp(i)*100.
c      tt(i)=tt(i)+273.16
c      td(i)=td(i)+273.16
c      10 continue
c      20 continue
c      nmax=i-1
c      nma=nmax-1
c      ii=1
c
c      convert environmental (pp,tt,td)-sounding into
c      (zz,ttv,qtot,h)-sounding
c
c      find altitude of sounding points
c      do 1000 j=1,nmax
c      es=esfunc(td(j))
c      qqe(j)=epsilo*es/pp(j)
c      ttv(j)=tt(j)*(1.+0.61*qqe(j))
c      1000 continue
c      zz(1)=843.
c      assume that virtual temperature (ttv) varies linearly with height
c      or alternatively that the atmosphere is isothermal
```

```

c      between a set of sounding points
      do 1010 j=2,nmax
diff=ttv(j)-ttv(j-1)
if(diff.ne.0.) then
c      constant lapse rate atmosphere
      zz(j)=zz(j-1)-(ttv(j)-ttv(j-1))*rd*log(pp(j)/pp(j-1))/
      c      (g*log(ttv(j)/ttv(j-1)))
else
c      isothermal atmosphere (this is probably very rare)
      zz(j)=zz(j-1)-rd*ttv(j)*log(pp(j)/pp(j-1))/g
      endif
1010 continue
c
      hhei=cpa*tt(j)+al*qqe(j)+g*zz(j)
1020 continue
      write(4,8020)
      write(4,8030)
      do 1030 i=1,nmax
write(4,8040) i,zz(i),pp(i),tt(i),td(i)
1030 continue
c
c
c
c      initial conditions
      write(6,8000)
8000 format('for the thermal type in:')
      write(6,8010)
8010 format('initial radius, temperature excess and vertical velocity')
      read(5,*) radius,texc,w
      write(4,8050) radius
      write(4,8060) texc
      write(4,8070) w
      t=tt(1)+texc
      h=cpa*t+al*qqe(1)+g*zz(1)
      a(1)=4.*pi*pp(1)*radius**3/(3.*rd*t*(1.+0.61*qqe(1)))
      a(2)=a(1)*qqe(1)
      a(3)=a(1)*h
      a(4)=a(1)*w
c      altitudes on output will be above MSL.
      z=843.
c
      ql=0.
      rhobub=pp(1)/(rd*t*(1.+0.61*qqe(1)))
      es=esfunc(t)
      qvs=epsilo*es/pp(1)
      rh=(qqe(1)/qvs)*100.
      tv=t*(1.+0.61*qqe(1))
      tvenv=tt(1)*(1.+0.61*qqe(1))
      deltv=tv-tvenv
      write(4,8018)
      write(4,8019) z,radius,qqe(1),h,w,ql,t,pp(1),rh,deltv
c
c
c
c      set integration routine control parameters
c
      z1=0.
      z2=10.
      mstep=1
      n=4
c
c
c
c      main loop
      do 100 k=1,200
if(k.eq.1) go to 101

```

```

call intkr(z1,z2,mstep,n,a)
z=z+z2
101 continue
w=a(4)/a(1)
q=a(2)/a(1)
h=a(3)/a(1)
c      determine saturation or sub-saturation
      call env(z)
es=p*q/epsilo
tpri=1./(1./273.16-rv/a1*log(es/6.103e2))
hpri=cpa*tpri+a1*q+g*z
if(hpri.lt.h) then
c      sub-saturated thermal
t=h/cpa-a1/cpa*q-g/cpa*z
qv=q
else
c      saturated thermal
ohpri=0.
deltat=1.
tpri=270.
c      iteration loop
do 110 j=1,50
tpri=tpri+deltat
t=tpri
espri=esfunc(tpri)
qvspri=epsilo*espri/p
hpri=cpa*tpri+a1*qvspri+g*z
deltah=h-hpri
if(deltah.gt.-1.e-6.and.deltah.lt.1.e-6) go to 120
ratio=(h-hpri)/(h-ohpri)
if(ratio.lt.0.) deltat=-0.5*deltat
ohpri=hpri
qv=qvspri
110 continue
endif
120 continue
if(mod(k,1).eq.0) then
radius=(3.*a(1)/(4.*pi*rhoenv))**(1./3.)
ql=q-qv
es=esfunc(t)
qvs=epsilo*es/p
rh=(qv/qvs)*100.
tv=t*(1.+0.61*qv-ql)
tvenv=te*(1.+0.61*qs)
deltv=tv-tvenv
write(4,B019) z,radius,a(2)/a(1),a(3)/a(1),a(4)/a(1),
c      ql,t,p,rh,deltv
endif
100 continue
c
c
c
c      format section
B018 format('height      radius      G-tot      H',
c      '      u',
c      '      ql      t      p      rh deltv')
B019 format('f6.0,f12.5,e12.5,f7.2,f8.0,f7.1,f6.2)
B020 format('--- Sounding characteristics ---')
B030 format('level height      pres      temp      t-dew')
B040 format(i5,f8.0,3f9.1)
B050 format('initial radius =',f6.0,' m')
B060 format('initial temperature excess =',f4.1,' degC')
B070 format('initial velocity =',f6.2,' ms-1')
stop
end

```

```

C      subroutine intr(z1,z2,mstep,n,y)
C      -----
C      mstep allows you to divide the length of a height-step into
C      several pieces (set it to 1 in main program)
C      n is number of equations to integrate
C      y is the array "a" from main program to be integrated
C      -----
C      dimension y(4),wid(4),w2d(4),wy(4)
C      h=(z2-z1)/float(mstep)
C      h2=h/2.
C      h6=h/6.
C      z=z1
C      do 50 k=1,mstep
C          zh=z+h
C          call rside(y,wid)
C          do 10 j=1,n
C              wy(j)=y(j)+h2*wid(j)
10      continue
C          call rside(wy,w2d)
C          do 20 j=1,n
C              wid(j)=wid(j)+2.*w2d(j)
C              wy(j)=y(j)+h2*w2d(j)
20      continue
C          call rside(wy,w2d)
C          do 30 j=1,n
C              wid(j)=wid(j)+2.*w2d(j)
C              wy(j)=y(j)+h*w2d(j)
30      continue
C          call rside(wy,w2d)
C          do 40 j=1,n
C              y(j)=y(j)+h6*(wid(j)+w2d(j))
40      continue
C          z=zh
C      50 continue
C      return
C      end

C
C
C      subroutine rside(a,aa)
C      dimension a(4),aa(4)
C
C      common /envi/ p,qe,he,we,rhoenv,te,tvenv
C      common /init/ ii
C      common /consta/ epsilo,rd,rv,cpa,al,g,alpha,pi
C      common /main/ z
C
C      call env(z)
C
C      w=a(4)/a(1)
C      if(w.lt.0.) then
C          write(4,8000)
C          stop
C      endif
C      qtot=a(2)/a(1)
C      h=a(3)/a(1)
C      write(6,7000) w,we,qtot,qe,h,he
C      7000 format('w,we,qtot,qe,h,he',6e12.5)
C
C
C      the next section is necessary for finding the parcels virtual
C      temperature, tv, which is used in: aa(4)= .....
C      determine saturation or subsaturation

```

```

      es=p*qtot/epsilo
      tpri=1./(1./273.16-rv/al+alog(es/6.103e2))
      hpri=cpa*tpri+al*qtot+g*z
c      write(6,7010) es, tpri, hpri
7010 format('es, tpri, hpri', 3e12.5)
      if(hpri.lt.h) then
c        print *, 'sub-saturated'
c        subsaturated thermal
      t=h/cpa-al/cpa*qtot-g/cpa*z
      qv=qtot
      ql=0.
c      write(6,7020) t, te, qv, qe, ql
7020 format('sub-saturated therm - t, te, qv, qe, ql', 5e12.5)
      else
c        saturated thermal
c        print *, 'saturated'
      ohpri=0.
      deltat=1.
      tpri=270.
c      iteration loop
do 10 j=1,500
      tpri=tpri+deltat
      espri=esfunc(tpri)
      qvspri=epsilo*espri/p
      hpri=cpa*tpri+al*qvspri+g*z
      deltah=h-hpri
      qv=qvspri
      ql=q-qv
      t=tpri
      if(deltah.ge.-1. and deltah.lt.1.) go to 20
      ratio=(h-hpri)/(h-ohpri)
      if(ratio.lt.0.) deltat=-0.5*deltat
      ohpri=hpri
      if(j.eq.500) then
        write(4,9600) deltat
        stop
      endif
10    continue
      endif
20    continue
      tv=t*(1.+0.61*qv-ql)
      rhobub=p/(rdet*(1.+0.61*qv))
      radius=(3.*a(1)/(4.*pi*rhobub))**(1./3.)
c      write(6,7030) rhobub, rhoenv, radius, p, t, qv, w
7030 format('rhobub, rhoenv, radius, p, t, qv, w', 7e12.5)
c      end of section to find the virtual temperature for aa(4)=.....
c
c
c
c      right sides
      aa(1)=4.*pi*rhoenv*radius**2*alpha
c      write(6,7040) aa(1), pi, radius, alpha, w, rhoenv
7040 format('aa(1), pi, radius, alpha, w, rhoenv', 6e12.5)
      aa(2)=aa(1)*qe
      aa(3)=aa(1)*he
      aa(4)=4.*pi*radius**3*g*(rhoenv-(rhobub+ql*rhobub))/(3.*a(4)/a(1))
c      write(6,7049) a(1), a(2), a(3), a(4)
c      write(6,7050) aa(1), aa(2), aa(3), aa(4)
7049 format('a(1), a(2), a(3), a(4)', 4e12.5)
7050 format('aa(1), aa(2), aa(3), aa(4)', 4e12.5)
      www=w-w
      qqq=qe-qtot
      hhh=he-h
c      print *, '(w-w), (qe-qtot), (he, h)', www, qqq, he, h
c
c

```

```

C      format section
8000 format(' ----- w goes negative, calculation terminated -----')
9600 format(' ----- sat, j above 500, deltat= ', f10.8)
      return
      end

C
C
C
C
C      function esfunc(t)
C      calculate saturated water vapor pressure as function of t
      esfunc=6.103e2*(273.16/t)**5.0065*exp(24.846*(1.-273.16/t))
      return
      end

C
C
C
C
C      subroutine env(z)
      dimension pp(50),tt(50),qqe(50),zz(50),ttv(50)
C
      common /sound/ pp,tt,qqe,ttv,zz,nma
      common /envi/ p,qe,he,we,rhoenv,te,tvenv
      common /consta/ epsilo,rd,rv,cps,al,g,alpha,pi
      common /init/ ii

C
C      if(z.ge. zz(nma+1)) then
write(4,8050)
stop
      endif
      do 10 i=1,nma
if(z.ge. zz(i).and. z.lt. zz(i+1)) go to 20
      10 continue
      20 continue
      ii=i

C
C      assume that t and qv each vary linearly with z between
C      any two grid points
C
      zratio=(z-zz(i))/(zz(i+1)-zz(i))
      te=tt(i)+(tt(i+1)-tt(i))*zratio
      qe=qqe(i)+(qqe(i+1)-qqe(i))*zratio
      tv=te*(1.+0.61*qe)
      he=cps*te+al*qe+g*z
      we=0.
      gamma=-(ttv(i+1)-ttv(i))/(zz(i+1)-zz(i))
      p=pp(i)*(tv/ttv(i))**(g/(rd*gamma))
      rhoenv=p/(rd*te*(1.+0.61*qe))
      tvenv=tv

C
C
C
C      format section
8050 format('thermal ascended up above top sounding level, stop')
      return
      end
```

EK - C6

1-Boyutlu Termal-Cumulus Modelinde Kullanılan Runge - Kutta Metodu

(4.1)-(4.4) sağ taraflı diferansiyel denklemlerinin çözümü için, 4. mertebeden Runge - Kutta Metodu kullanılmıştır. Her adımda, türev (1 kez başlangıçta, 3 kez orta noktada ve 1 kez son noktada olmak üzere) 4 kez değerlendirilmiştir. Bu türevlerden:

$$y_{n+1} = y_n + k_1/6 + k_2/3 + k_3/3 + k_4/6 + O(h^5)$$

ve k_1, k_2, k_3, k_4 değerleri:

$$k_1 = hf'(x_n, y_n)$$

$$k_2 = hf'(x_n + h/2, y_n + k_1/2)$$

$$k_3 = hf'(x_n + h/2, y_n + k_2/2)$$

$$k_4 = hf'(x_n + h, y_n + k_3)$$

şeklindedir.

TABLO - C.1 - Ankara radyosonde verilerine göre model sonuçları (17/5/1986 - 12⁰⁰ GMT)
I) r=100 m, II) r=200 m, III) r=500 m, IV) r=1000 m, V) r=2000 m

Z	yariçap (r)					bağıl nem (RH)					(P)	sıcaklık (T)				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V		I	II	III	IV	V
843	100.0	200.0	500.0	1000.0	2000.0	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	917.2	292.2	292.2	292.2	292.2	292.2
1043	150.7	251.2	552.8	1055.5	2060.8	45.5	47.0	48.7	49.5	49.9	896.0	290.2	290.2	290.2	290.2	290.2
1243	201.7	302.8	606.0	1111.4	2122.2	48.1	49.7	52.2	53.7	54.6	875.2	288.2	288.2	288.2	288.2	288.2
1443	252.9	354.6	659.5	1167.7	2184.0	51.9	53.4	56.3	58.3	59.8	854.7	286.2	286.2	286.2	286.3	286.3
1643	304.6	406.8	713.5	1224.6	2246.8	56.3	57.7	60.9	63.6	65.7	834.5	284.2	284.2	284.3	284.3	284.3
1843	356.5	459.3	767.8	1281.9	2310.1	61.5	62.8	66.3	69.5	72.2	814.7	282.2	282.3	282.3	282.3	282.4
2043	408.6	512.8	822.3	1339.3	2373.4	67.2	68.5	72.2	76.0	79.4	795.2	280.3	280.3	280.4	280.4	280.4
2243	461.1	565.2	877.2	1397.2	2437.1	73.3	74.7	78.8	83.2	87.5	776.0	278.4	278.4	278.4	278.4	278.4
2443	514.0	618.6	932.4	1455.4	2498.1	80.3	81.5	86.0	91.3	96.5	757.2	276.4	276.4	276.4	276.5	276.5
2643	567.1	672.3	988.0	1514.0	2566.0	87.2	89.0	94.1	100.0	100.0	738.7	274.4	274.4	274.4	274.5	274.9
2833	617.9	723.7	1041.1	1570.1	2628.0	94.9	96.8	100.0	100.0	100.0		272.5	272.5	272.7	273.2	273.8

TABLO - C.1 - Ankara radyosonde verilerine göre model sonuçları (17/5/1986 - 12⁰⁰ GMT)
I) r=100 m, II) r=200 m, III) r=500 m, IV) r=1000 m, V) r=2000 m

LWC				düşey hız (w)					toplam statik enerji H×10 ⁴					toplam nem Q ×10 ⁻³				
Z	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
843				1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	31.87	31.87	31.87	31.87	31.87	31.87	6.78	6.78	6.78	6.78
1043				0.66	1.00	1.35	1.58	1.68	31.71	31.76	31.82	31.84	31.86	31.86	6.13	6.34	6.56	6.72
1243				0.96	1.31	1.85	2.17	2.38	31.63	31.68	31.76	31.81	31.84	31.84	5.84	6.04	6.35	6.64
1443				1.27	1.66	2.34	2.82	3.15	31.58	31.62	31.71	31.77	31.82	31.82	5.65	5.82	6.16	6.40
1643				1.27	1.74	2.62	3.28	3.78	31.54	31.58	31.66	31.74	31.80	31.80	5.51	5.65	5.99	6.27
1843				0.64	1.31	2.45	3.32	4.01	31.52	31.55	31.63	31.71	31.77	31.77	5.42	5.54	5.86	6.15
2043				0.66	1.23	2.39	3.40	4.24	31.49	31.52	31.60	31.68	31.75	31.75	5.31	5.42	5.72	6.04
2243				1.09	1.48	2.53	3.48	4.55	31.46	31.48	31.56	31.65	31.73	31.73	5.18	5.29	5.59	5.92
2443				1.49	1.81	2.77	3.85	4.91	31.42	31.45	31.52	31.62	31.71	31.71	5.05	5.15	5.45	5.79
2643	0.000	0.005	0.185	1.84	2.14	3.05	4.15	6.66	31.38	31.41	31.49	31.58	31.68	31.68	4.9	5.00	5.30	5.66
2833	0.065	0.250	0.448	2.14	2.44	4.08	6.60	8.83	31.34	31.37	31.45	31.55	31.66	31.66	4.76	4.86	5.16	5.54

TABLO - C.2 - Ankara radyosonde verilerine göre model sonuçları (18/5/1986)
1) r=100 m, II) r=200 m, III) r=500 m, IV) r=1000 m, V) r=2000 m

Z	Yarıçap (r)					Bağıl nem (RH)					Basınç (P)					Sıcaklık (T)				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
843	100.0	200.0	500.0	1000.0	2000.0	42.6	42.6	42.6	42.6	42.6	918.2	918.2	918.2	918.2	918.2	292.2	292.2	292.2	292.2	292.2
1043	150.6	251.1	552.5	1054.8	2059.4	53.4	51.4	49.2	48.2	47.6	896.9	896.9	896.9	896.9	896.9	289.5	289.8	290.0	290.1	290.1
1243	201.6	302.7	605.8	1110.8	2120.9	60.2	58.6	55.9	54.3	53.3	876.0	876.0	876.0	876.0	876.0	287.4	287.6	287.8	288.0	288.1
1443	252.9	354.5	659.3	1167.2	2182.8	66.4	65.4	62.8	60.9	59.5	855.4	855.4	855.4	855.4	855.4	285.3	285.4	285.7	286.0	286.1
1643	304.6	406.8	713.4	1224.2	2245.9	72.6	72.0	70.0	68.0	66.3	835.2	835.2	835.2	835.2	835.2	283.3	283.4	283.7	283.9	284.1
1843	304.6	459.4	767.9	1281.8	2309.6	72.6	78.4	77.2	75.5	73.8	835.2	815.3	815.3	815.3	815.3	283.3	281.5	281.7	281.9	282.1
2043	304.6	459.4	822.7	1339.8	2373.8	72.6	78.4	84.6	83.4	82.0	835.2	815.3	795.8	795.8	795.8	283.3	281.5	279.8	279.9	280.1
2243	304.6	459.4	877.8	1398.1	2438.4	72.6	78.4	92.2	91.9	90.9	835.2	815.3	776.6	776.6	776.6	283.3	281.5	277.8	278.0	278.2
2443	304.6	459.4	877.8	1456.8	2503.5	72.6	78.4	92.2	100.0	100.0	835.2	815.3	776.6	758.7	758.7	283.3	281.5	277.8	276.2	276.3
2643	304.6	459.4	877.8	1515.9	2569.1	72.6	78.4	92.2	100.0	100.0	835.2	815.3	776.6	739.3	739.3	283.3	281.5	277.8	274.9	275.1

TABLO - C.2 - Ankara radyosonde verilerine göre model sonuçları (18/5/1986)
I) r=100 m, II) r=200 m, III) r=500 m, IV) r=1000 m, V) r=2000 m

Z	LWC $\times 10^{-3}$		düşey hız (w)					toplam statik enerji H $\times 10^4$					toplam nem Q $\times 10^{-3}$				
	V	VI	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
843			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	31.76	31.76	31.76	31.76	31.76	6.32	6.32	6.32	6.32	6.32
1043			1.46	2.10	2.77	3.08	3.25	31.83	31.81	31.78	31.77	31.76	6.89	6.71	6.52	6.43	6.38
1243			1.41	2.22	3.38	4.04	4.45	31.82	31.81	31.79	31.78	31.77	6.92	6.81	6.62	6.50	6.42
1443			1.49	2.30	3.74	4.71	5.39	31.78	31.78	31.78	31.77	31.77	6.82	6.78	6.64	6.53	6.44
1643			1.35	2.20	3.87	5.14	6.09	31.74	31.75	31.76	31.76	31.76	6.68	6.68	6.61	6.52	6.44
1843			1.35	1.55	3.57	5.14	6.39	31.74	31.72	31.74	31.75	31.75	6.68	6.54	6.54	6.49	6.43
2043			1.35	1.55	2.94	4.85	6.41	31.74	31.72	31.71	31.73	31.74	6.68	6.54	6.43	6.42	6.40
2243			1.35	1.55	1.90	4.30	6.18	31.74	31.72	31.71	31.71	31.73	6.68	6.54	6.30	6.34	6.35
2443	0.027	0.020	1.35	1.55	1.90	3.63	5.84	31.74	31.72	31.71	31.69	31.72	6.68	6.54	6.30	6.24	6.29
2643	0.291	0.314	1.35	1.55	1.90	5.71	7.44	31.74	31.72	31.71	31.67	31.70	6.68	6.54	6.30	6.12	6.22
2833	0.524	0.578				7.22	8.85				31.65	31.69				6.00	6.14

ÖZGEÇMİŞ

Zafer ASLAN 1954 yılında Artvin'de doğdu. İlk ve orta (İstanbul Kız Lisesi) eğitimini İstanbul'da tamamladı. 1971 yılında DSİ Genel Müdürlüğü Bursunu kazanarak, İTÜ Temel Bilimler Fakültesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı, 1975 yılında mezun oldu. 1976-1979 yılları arasında DMİ Genel Müdürlüğü Atatürk Hava Limanı Meteoroloji İstasyonu'nda Meteoroloji Mühendisi olarak çalıştı ve 17/8/1979 tarihinde İTÜ Temel Bilimler Fakültesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü'ne naklen atandı. 1979 yılında Meteoroloji Mühendisliği Bölümü'nden yüksek lisans derecesi aldı.

1984 yılında ICTP (Uluslararası Teorik Fizik Merkezi) Bursu ile "Troposfer, Stratosfer, Mesosfer" konusundaki kursa (Trieste) katıldı. 1985 yılında ICTP Bursu ile "Bulut Fizigi" konusundaki Workshop'a (Trieste) katıldı. 1986 yılında Nato Bursu ile Washington Üniversitesi'ndeki "Air-Sea Interaction Process" konulu kursa (Seattle) katıldı. Aynı yıl ICTP-İtalyan Laboratuvarlarında Araştırma ve Eğitim Bursu ile Roma Atmosfer Fizigi Enstitüsü'nde "Konvektif ve Tabaka Bulutu Yağışları" konusundaki araştırma projesinde görev aldı. 1984 yılından itibaren TÜBİTAK tarafından desteklenmekte olan "Aşağı Troposferde Atmosferik Parametreler Üzerinde Teorik ve Deneysel Bir Çalışma" konusundaki projede araştırma uzmanı olarak görev alan Zafer ASLAN, halen İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü'nde yüksek mühendis olarak çalışmaktadır.

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi