

تحلیل سینوپتیکی سیستم‌های باران‌زا و امکان افزایش بارش آنها بوسیله باروری ابرها در منطقه کرمان*

کمال امیدوار - دانشجوی دوره دکترای جغرافیای طبیعی (اقلیم‌شناسی) - گروه جغرافیا، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

برای مبارزه با پدیده خشکسالی و مشکل کم آبی، افزایش بارش از طریق بارورسازی ابرها بعنوان یکی از راههای نوین تأمین استحصال منابع آب مطرح گردیده و از طریق شناسایی قابلیت‌های سیستم‌های باران‌زا در تولید بارش و تحلیل سینوپتیکی آنها به این مقصود می‌توان نائل شد. پژوهش حاضر که در منطقه کرمان صورت گرفته است با استفاده از اطلاعات جو بالای منطقه و توجه به شرایط سینوپتیکی و دینامیکی جو و مطالعه ویژگیهای ترمودینامیکی هوایی که منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، سه الگوی سینوپتیکی: کم فشارهای سودانی، سیستم‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای و کم فشارهای مدیترانه‌ای استخراج گردیده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که برای اجرای پروژه‌های باروری ابرها و جبران کم آبی منطقه، لازم است تا از الگوهای مذکور استفاده شود.

واژگان کلیدی: مکان‌گزینی، افزایش بارش، بارورسازی ابرها، سینوپتیک، ترمودینامیک، چرخند

مقدمه

باروری ابرها^(۱) که با اهداف متفاوتی از جمله ایجاد بارش مصنوعی، از بین بردن مه، فرونشاندن تگرگ، تعدیل توفان‌های استوایی (هاریکن‌ها) و... انجام می‌گیرد، در واقع ایجاد انگیزش در ابر، برای از دست دادن بخار آب موجود در آن و یا تسریع در فرآیند بارش است.

چون ابرها دارای انرژی ذخیره شده می‌باشند، لذا این انرژی‌ها مکان مناسبی را برای تعدیل هوا به خود اختصاص می‌دهند. البته این حقیقت که ابرها حاوی کل رسوبات آب اتمسفر بر روی سطح زمین هستند، تعدیل آنها را از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌نماید و این مطلب روشن می‌سازد که چرا تقریباً تمام کوششهای تعدیل هوا تاکنون در جهت ابرها متمرکز شده است.

* این مقاله خلاصه بخشی از رساله دکترای اقلیم‌شناسی تحت عنوان «امکان‌سنجی باروری ابرها در ارتفاعات جنوبی کرمان» بوده که نگارنده با راهنمایی استاد ارجمند آقای دکتر هوشنگ قائمی مشاور سازمان هواشناسی کشور تهیه نموده است.

بعضی محققین سعی نموده‌اند تا با سوزاندن مقادیر زیادی نفت در سطح زمین و خروج مقدار زیاد انرژی از سطح زمین، ابرها را بطور مصنوعی افزایش دهند (دی سنز، ۱۹۶۴)^(۱) که به روش میتیوتورون^(۲) معروف است. این تجربه‌ها بطور نظری (تئوریک) بسیار مهم بوده، اما نتایج علمی رضایت‌بخشی نداشته است. قطرک‌های ابر در جو، توسط تراکم بخار آب روی ذرات موجود تشکیل می‌شوند (هسته‌بندی ناهمگن)^(۳). همچنین اغلب در اثر بهم پیوستن و جمع شدن مولکول‌های آب از حالت بخار، قطرک‌های آب خالص شکل می‌گیرند (هسته‌بندی همگن)^(۴). ذراتی که در مرحله تراکم بکار گرفته می‌شوند، هسته‌های تراکم یا CCN^(۵) نامیده می‌شوند. با تحقیقاتی که در چند دهه گذشته صورت گرفته، مشخص شده که جمعیت هسته‌های تراکم از روزی به روز دیگر و از مکانی به مکان دیگر تغییر کرده و این تغییرات، تأثیرات زیادی بر روی خصوصیات میکروفیزیکی ابرها دارند. این تفاوت در ویژگی‌های میکروفیزیکی ابرها به نوبه خود در نوع و میزان بارش آنها مؤثر واقع می‌شوند.

تلاش‌های موفقیت‌آمیز در تعدیل ابرها شامل بعضی تغییرات مناسب در جمعیت CCNها می‌باشد که بر روی آنها قطرک‌ها تشکیل می‌شوند و یا تعدیل در جمعیت هسته‌های یخ‌ساز (IN)^(۶) که مسئول ظهور یخ بوده و در ایجاد بارش در بعضی ابرها اهمیت دارند.

بطور معمول شکل‌گیری قطره‌های آب باران به حضور CCNها نیاز دارد، به همین ترتیب در ایجاد بلورهای یخ، حضور هسته‌های یخ‌ساز اجتناب‌ناپذیر است. در صورتی که هسته‌های یخ‌ساز در هوا موجود نباشد، هسته‌بندی فاز یخ از آب فوق سرد معمولاً به دمای ۴۰- درجه سلسیوس نیاز دارد.

مبانی باروری ابرها از این حقیقت منشأ می‌گیرد که قطعات جامد اضافه شده در هوای فوق اشباع، می‌تواند با سرعت بخشیدن در انجماد قطرات، سبب تشکیل بلورهای یخ گردد. نمونه‌ای از ذرات بارورکننده ابر، هسته‌های یخ‌ساز (IN) مصنوعی داخل شده در قطرک‌های ابر فوق سرد به منظور تحریک و تسریع در انجماد آنهاست. واژه باروری ابرها برای تشریح کوشش‌های صورت گرفته در راه تعدیل ابرها که توسط هسته‌های مصنوعی انجام می‌گیرد و یا هر هواویزه‌ای^(۷) که برای دگرگونی ابرها وارد آن می‌گردد، بکار برده می‌شود و مطالعات مربوط در این راستا به نقش CCNها و INها بستگی دارد و این مطالعات به دانش مبتنی بر تجربه‌های آزمایشگاهی و داده‌های دیده‌بانی و ذرات معلق جو (هواویزه‌ها) نیازمند می‌باشد (دنيس^(۸) ۱۹۸۰). بشر از طریق برنامه باروری ابرها می‌تواند از لحاظ تعداد و نوع هسته‌های تشکیل بارش به طبیعت کمک نماید.

کمبود بارش در فلات مرکزی ایران مخصوصاً استان کرمان، همواره مشکلاتی را در پی داشته و بویژه آنکه عاملی محدودکننده در راستای توسعه و عمران این مناطق محسوب می‌شود.

متوسط بارش سالانه در استان کرمان حدود ۱۴۵ میلیمتر بوده که در مقایسه با میانگین بارش ایران (۲۵۰ میلیمتر) ناچیز است. از طرفی، میزان نزولات جوئی در این منطقه نوسانات شدیدی را نشان می‌دهد و توزیع بارش در سالهای مختلف بسیار نامنظم بوده و اغلب سیل‌آساست و بجای ذخیره در قشر خاک و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، بصورت سیلابهای مهیب جاری و در دشت‌ها، شوره‌زارها را ایجاد می‌کند؛ ولی بعلاوه وضعیت توپوگرافی خاص استان،

1- Dessens

3- Heterogeneous Nucleation

5- Cloud Condensation Nuclei

7- Aerosol

2- Meteoron

4- Homogeneous Nucleation

6- Icing Nuclei

8- Dennis

ارتفاعات جنوبی آن نقش مهمی در تعدیل آب و هوا دارند. ایجاد بارش مصنوعی و بارور نمودن ابرها در اغلب نقاط دنیا در ۵۰ سال اخیر مورد آزمایش قرار گرفته و تجربه جدید توانمندی انسان برای تولید بارش مصنوعی، به عنوان یکی از راههای تأمین استحصال منابع آب در بسیاری از کشورها، بویژه کشورهایی که بحران آب را پیش روی خود دارند؛ مطرح شده است.

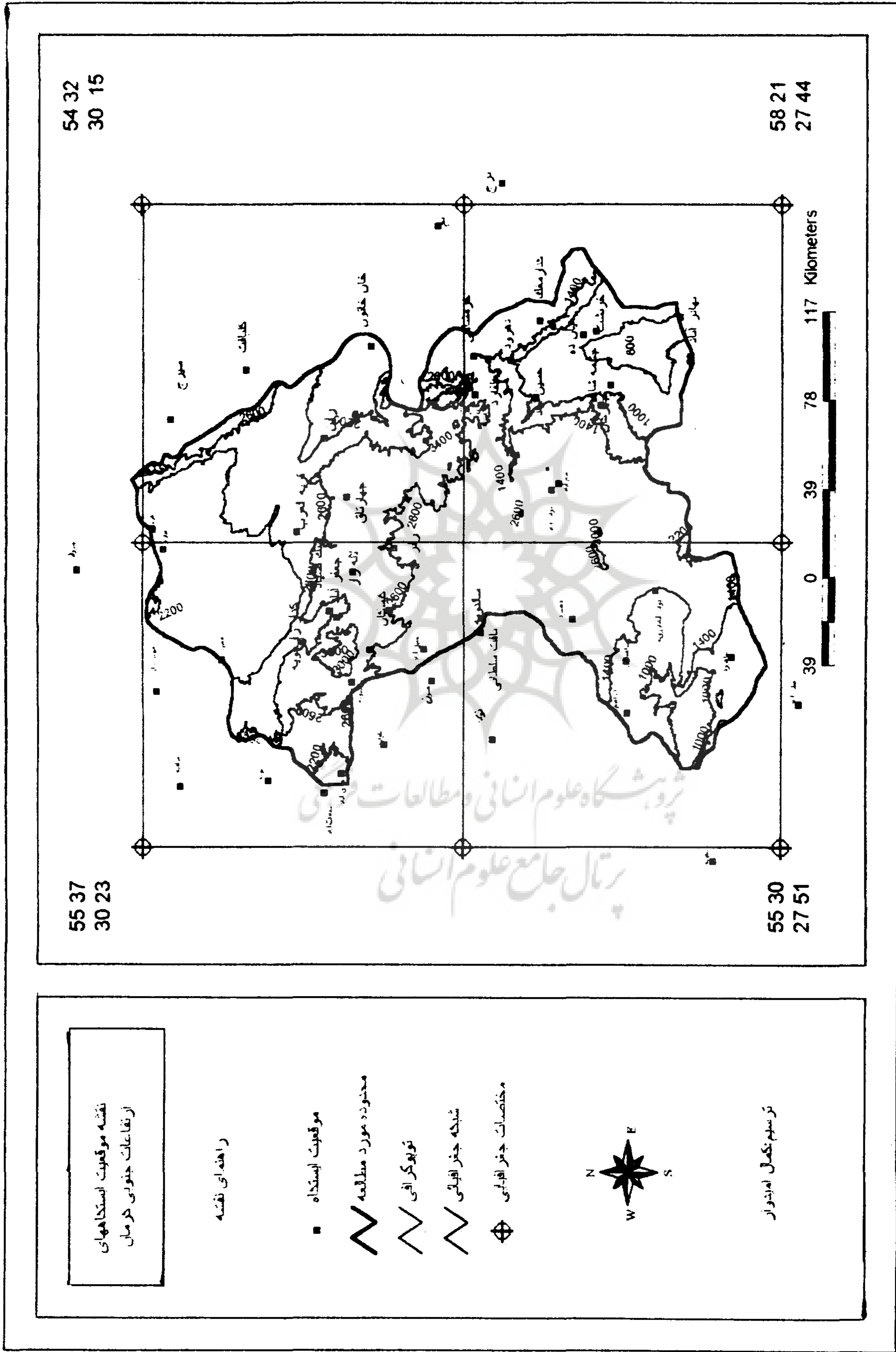
در ایران، طرح باروری ابرها تاکنون در حوضه آبریز رودخانه‌های کرج و جاجرود و استانهای یزد و گیلان به مرحله اجرا در آمده است؛ اما در منطقه کرمان با توجه به موقعیت ویژه جغرافیایی و داشتن ارتفاعات بلندی چون هزار، لاله‌زار و جبال بارز و برخورداری از سیستم‌های جو مناسب، کاری صورت نگرفته است. بدین جهت هدف این تحقیق شناخت و تحلیل سینوپتیکی سیستم‌های باران‌زا به منظور اجرای طرحهای باروری ابرها جهت افزایش بارش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

روش مطالعه

یکی از عوامل مهمی که در انتخاب جایگاه مناسب برای باروری ابرها مورد توجه طراحان این نوع پروژه‌ها قرار می‌گیرد، مطالعه و شناخت دقیق شرایط سینوپتیکی و دینامیکی غالب برای وقوع ابرهای مستعد بارش می‌باشد. ابتدا دوره‌های بارش نمونه انتخاب می‌شود، سپس مسیریابی توده‌های هوا مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از مسیریابی و تعیین منابع رطوبتی سیستم‌های چرخندی و واچرخندی موثر بر منطقه، نحوه اثر سمت و تندی باد و شرایط و مواردی که رطوبت و دما در لایه‌های زیرین و میانی جو، ناپایداری مناسب را فراهم می‌کند، بررسی می‌شود. بنابراین در مطالعات باروری ابرها، شناخت الگوها و مدل‌های سینوپتیکی که در منطقه ایجاد ناپایداری و بارش می‌کند، ضروری می‌باشد. به منظور رسیدن به اهداف فوق و با توجه به آمار و اطلاعات مورد نیاز، ده دوره بارشی نمونه در طول دوره آماری ۲۰ ساله (۱۹۵۵ - ۱۹۷۶) که هم از نظر کمیت بارش و هم از نظر تعداد روزهای متوالی بارش متفاوت بوده، انتخاب گردیده است؛ بنحوی که در اکثریت ایستگاههای منطقه بویژه ارتفاعات جبال بارز، هزار، لاله‌زار و کرمان بارش داشته و تقریباً بارش آنها فراگیر باشد (شکل ۱). با توجه به کمبود نقشه‌های سینوپتیکی و داده‌های جو بالا، بارش‌هایی انتخاب شده که هم اطلاعات جو بالای آن در دسترس و هم نقشه‌های آن موجود باشد (جدول ۱).

جهت شناسایی موقعیت‌های وضع هوا و بررسی سیستم‌های سینوپتیکی، از نقشه‌های سطح زمین و ترازهای ۸۵۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال و در صورت نیاز از نقشه‌های ۷۰۰ هکتوپاسکال برای ساعات 0000UTC و 1200UTC از ۲ روز قبل از وقوع بارش، تا پایان بارش در هر نمونه بارشی استفاده شده است.

برای مطالعه خصوصیات ترمودینامیکی هوایی که منطقه را مورد تهاجم قرار می‌دهد (از نظر پایداری و ناپایداری) و بررسی ویژگیهای دینامیکی از نظر امکان تقویت و تضعیف سیستم‌های فشاری و جبهه‌ها در ناحیه از داده‌های جو بالای ایستگاههای بندرعباس و کرمان برای هر دوره بارشی نمونه استفاده شده است. بدین منظور از داده‌های فشار، ارتفاع، دما، نقطه شبنم، سمت و تندی باد از سطح زمین و سطوح فوقانی جو استخراج گردیده و با استفاده از برنامه کامپیوتری، نمودارهای ترمودینامیکی^(۱) برای هر روز ترسیم شده است. همچنین سایر پارامترهای مورد نیاز در بررسیهای



شکل ۱- نقشه موقعیت ایستگاههای منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- تاریخ دوره‌های بارشی نمونه انتخابی جهت مطالعه وضعیت‌های سینوپتیکی منطقه مورد مطالعه

ردیف	سال میلادی	ماه	روز	سال شمسی	ماه	روز
۱	۱۹۸۴	مه	۹-۱۳	۱۳۶۳	اردیبهشت	۱۹-۲۳
۲	۱۹۸۸	فوریه	۱۲-۱۶	۱۳۶۶	بهمن	۲۳-۲۷
۳	۱۹۸۸	مارس	۲۵-۲۸	۱۳۶۷	فروردین	۵-۹
۴	۱۹۸۹	دسامبر	۱۲-۱۶	۱۳۶۸	آذر	۲۱-۲۵
۵	۱۹۹۱	ژانویه	۱۸-۲۲	۱۳۶۹	دی - بهمن	۲۸ دی - ۲ بهمن
۶	۱۹۹۱	دسامبر	۱ ژانویه - ۲۸ دسامبر	۱۳۷۰	دی	۷-۱۱
۷	۱۹۹۲	دسامبر	۱۸-۲۲	۱۳۷۱	آذر - دی	۱ دی - ۲۷ آذر
۸	۱۹۹۳	ژانویه - فوریه	۱ فوریه - ۲۸ ژانویه	۱۳۷۱	بهمن	۸-۱۲
۹	۱۹۹۴	مارس	۵-۸	۱۳۷۲	اسفند	۱۴-۱۷
۱۰	۱۹۹۵	فوریه	۱-۴	۱۳۷۳	بهمن	۱۲-۱۵

ترمودینامیکی از قبیل دما، نسبت آمیزه، دمای پتانسیل خشک و تر و ... در سطح زمین و ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ هکتوپاسکال محاسبه شده و براساس آنها نوع توده‌های هوای وارده به منطقه تعیین شدند. سپس بر روی نمودارهای ترمودینامیکی C.C.L^(۱)، L.C.L^(۲)، LFC^(۳)، سمت و تندی باد، ضخامت ابر، سطوح مثبت و منفی انرژی مورد نیاز جهت آزاد شدن ناپایداری و آب قابل بارش مشخص و محاسبه شده و سرانجام با استفاده از روش مذکور، اهداف مطالعه تأمین شده است.

یافته‌های تحقیق

با مطالعه و بررسی‌های صورت گرفته در طول دوره‌های بارشی نمونه، سه الگوی سینوپتیکی استخراج گردید:

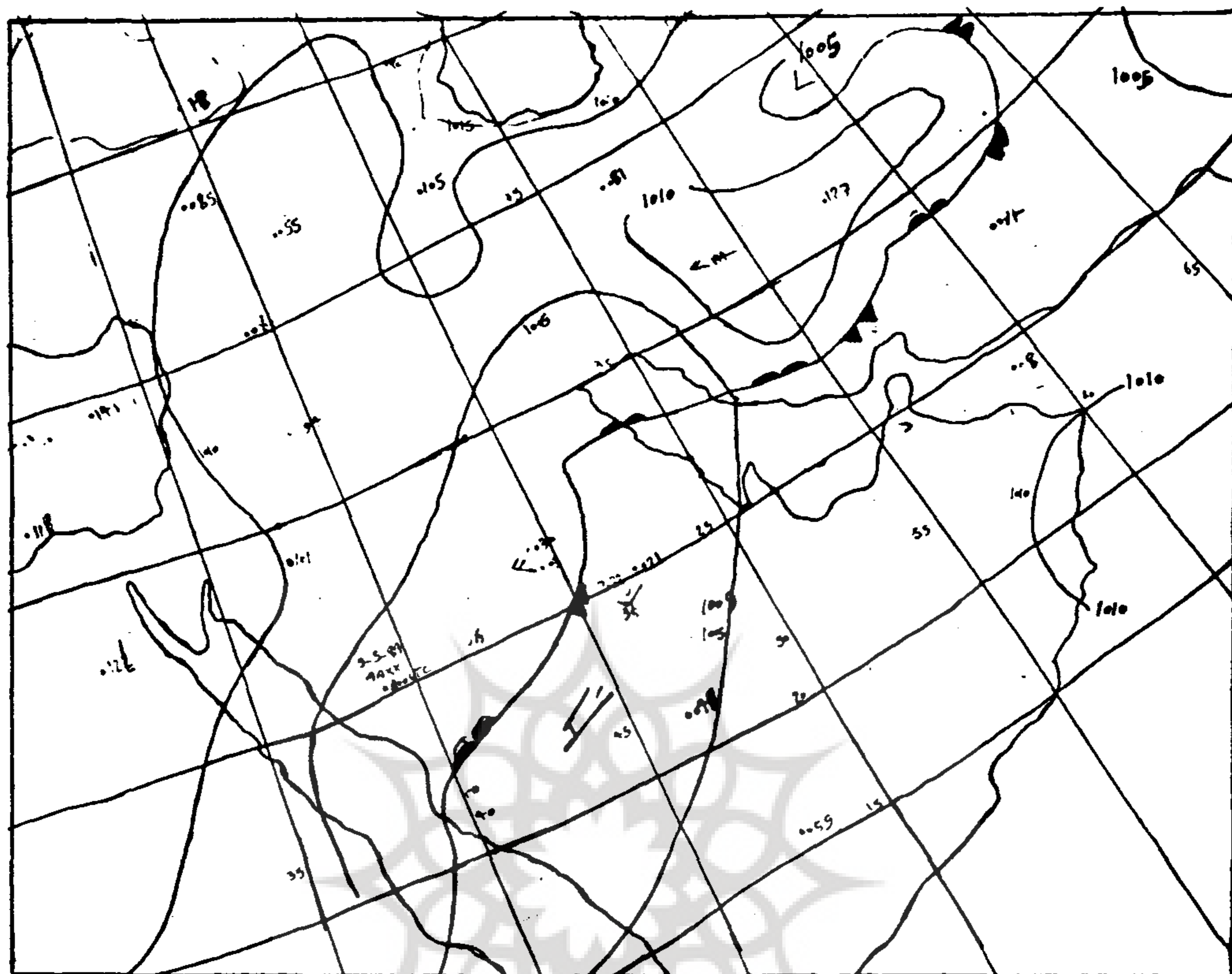
۱- الگوی سیستم‌های سودانی

این الگو طبق نقشه‌های سطح زمین و ترازهای ۸۵۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال روز ۹ مه ۱۹۸۴ مشاهده می‌شود. در این روز مرکز کم فشاری (۱۰۰۰ هکتوپاسکال) روی شبه جزیره عربستان مستقر بوده که هم فشار ۱۰۰۵ هکتوپاسکال آن پس از عبور از شمال عربستان، جنوب، مرکز و شمال شرق ایران به افغانستان منتقل می‌شود و سلول پرفشار ضعیفی (۱۰۱۰ هکتوپاسکال) در جنوب شرقی ایران دیده می‌شود. وجود این مرکز پرفشار سبب تغذیه رطوبت و در نتیجه تقویت کم فشار مستقر بر روی شبه جزیره عربستان می‌شود (شکل ۲). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، مرکز کم ارتفاعی (۱۴۴ ژئوپتانسیل دکامتر) در شرق مدیترانه و شبه جزیره عربستان و جنوب غرب ایران دیده می‌شود. در شمال تنگه هرمز مرکز پر ارتفاعی (۱۵۲ ژئوپتانسیل دکامتر) در شرق این مرکز کم ارتفاع مستقر بوده و جریانهای جوئی به طریقی است که از روی دریای عمان، هوای گرم و مرطوب را به سوی شبه جزیره عربستان و نواحی جنوبی و مرکزی ایران منتقل نموده و موجب فعال شدن این سیستم کم فشار شده و بارش‌های مناسبی را ایجاد کرده است (شکل ۳).

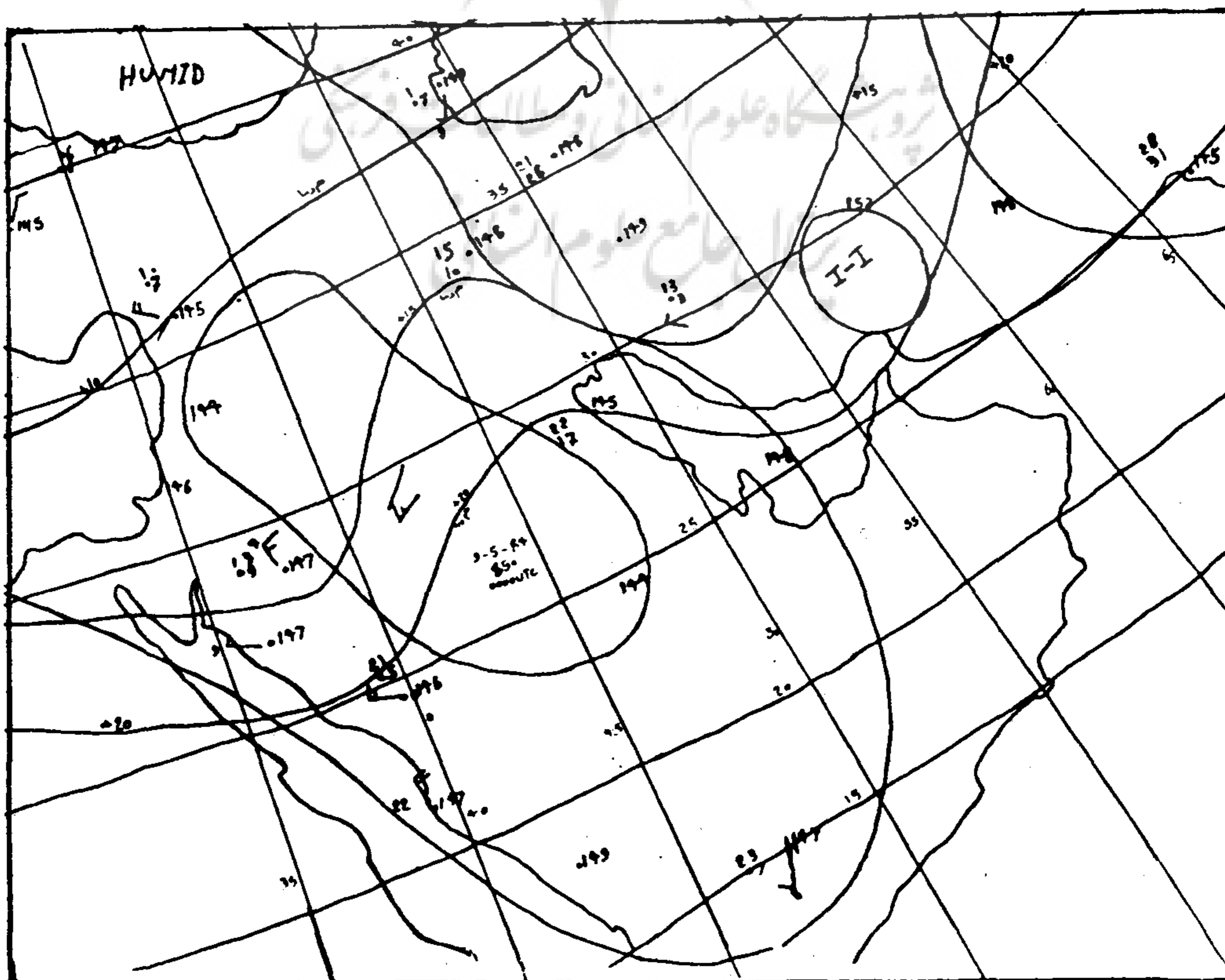
1- Convective Condensation Level (تراز میعان همرفتی)

2- Lifting Condensation Level (تراز میعان بالابر)

3- Level of Free Convection (تراز همرفت آزاد)



شکل ۲- نقشه سطح زمین در روز ۹ ماه ۹ ۱۹۸۴ ساعت ۰۰۰۰UTC



شکل ۳- نقشه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز ۹ ماه ۹ ۱۹۸۴ ساعت ۰۰۰۰UTC

در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، ناوه عمیقی بر روی مرکز و شمال شبه جزیره عربستان و غرب ایران مستقر بوده و وجود جریانهای جنوبغربی بخوبی مشهود است و کورانهای شدید همراه با این سیستم، زیاد قوی نبوده و اکثراً در نواحی جنوبی ایران قرار داشته و تندی آنها به ۶۰ تا ۷۰ نات می‌رسد.

ساختار قائم دما و رطوبت ایستگاه کرمان در این روز نشان می‌دهد که توده هوا از نوع حاره‌ای دریایی (mT) است (جدول ۲).

جدول ۲- ویژگیهای توده هوای ایستگاه کرمان در روز ۹ مه ۱۹۸۴

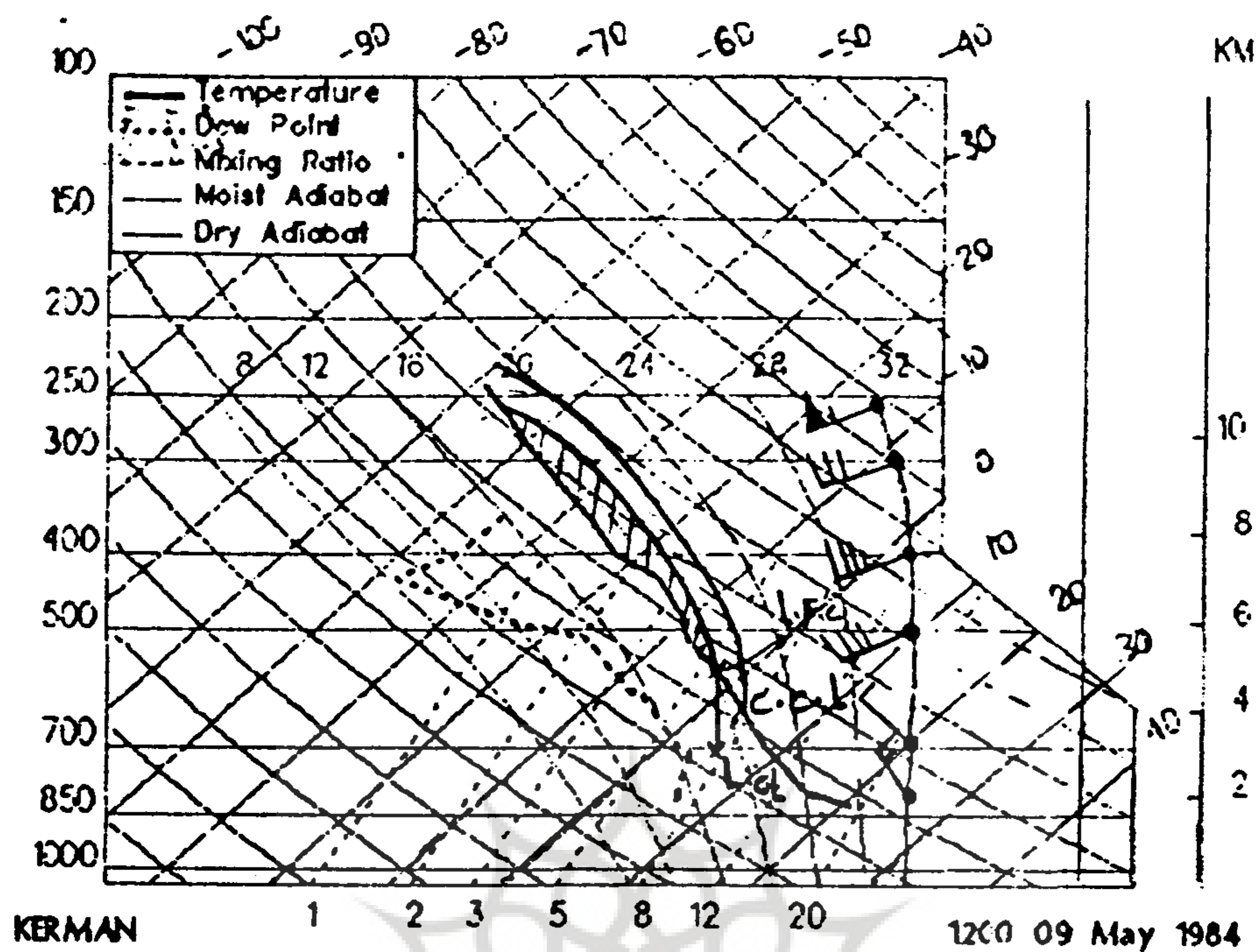
نقشه	دما °C	نسبت آمیزه g/Kg	دمای پتانسیل خشک °C	دمای پتانسیل تر °C	نوع توده هوا
سطح زمین	۲۰/۶	۷/۲	۱۸/۳	۱۳/۵	حاره‌ای
۷۰۰ هکتوپاسکال	۸/۱	۶	۳۸	۱۸/۵	دریایی
۵۰۰ هکتوپاسکال	-۹	۱/۶	۴۹	۱۸	(mT)

سمت جریانهای جوئی در سطح زمین ۳۴۰ درجه (با تندی ۱۲ نات) و در ارتفاع ۷۰۰ هکتوپاسکال ۳۲۰ درجه (با تندی ۳ نات) و در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ۲۴۰ درجه (با تندی ۴۲ نات) می‌باشد. پس جریانهای جوئی از لایه زیرین به بالا مخالف عقربه‌های ساعت بوده و فرارفت هوای سرد را در این منطقه مشخص می‌سازد؛ زیرا در لایه زیرین جو، پشته‌ای بین منطقه مرکزی و غرب ایران دیده می‌شود.

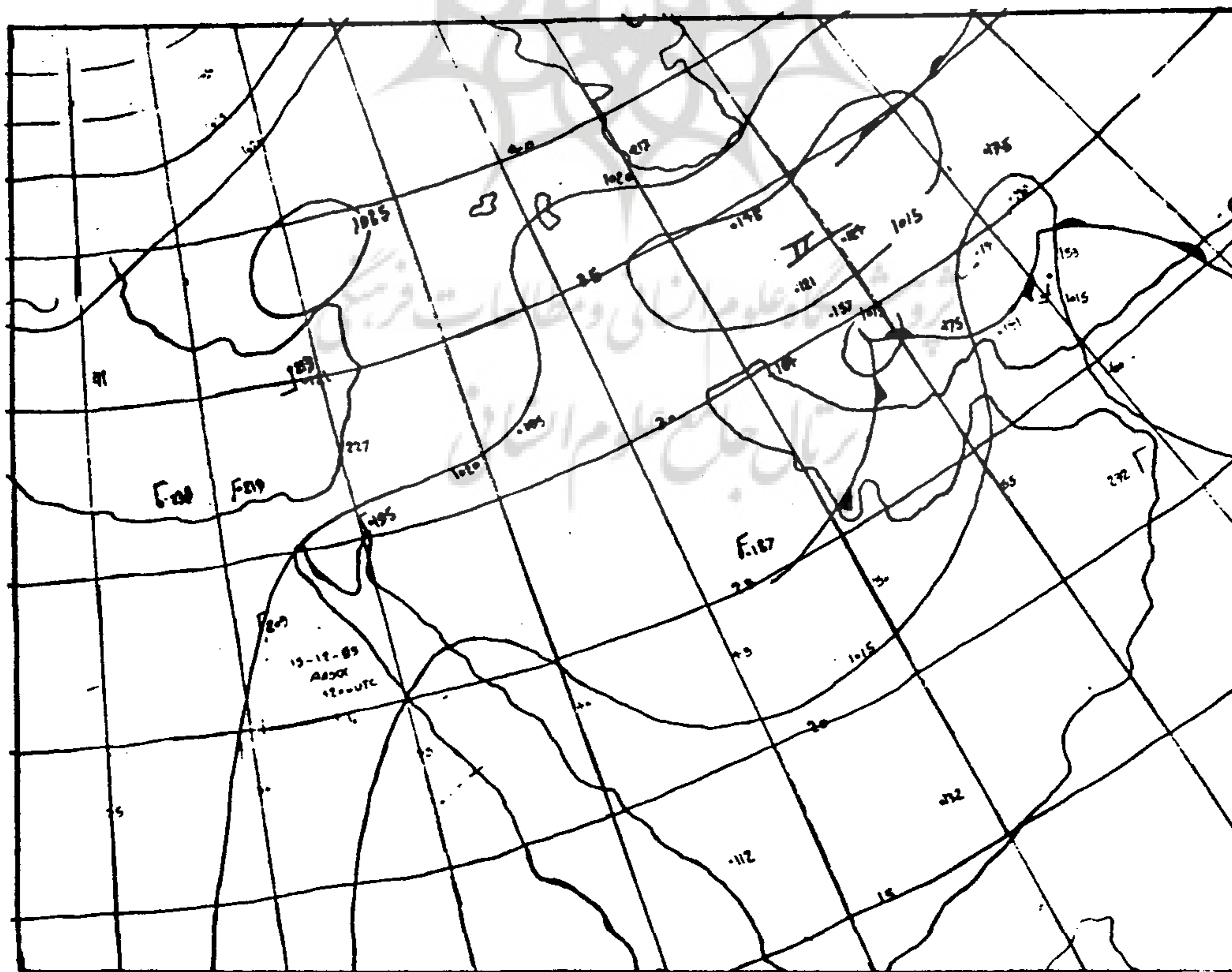
C.C.L و L.C.L به ترتیب در ارتفاع ۶۲۶ و ۶۶۰ هکتوپاسکال قرار دارند که اختلاف آنها از سطح زمین (فشار ایستگاه کرمان در این روز ۸۲۴ هکتوپاسکال بوده است) به ترتیب ۱۹۸ و ۱۶۴ هکتوپاسکال است. کف ابرهای کومه‌ای ناشی از ناپایداری گرمایی و مکانیکی از سطح زمین به ترتیب ۱۹۸۰ متر و ۱۶۴۰ متر می‌باشد. منحنی B در روی اشیاعی که از C.C.L و L.F.C رسم شده، منحنی دمای محیط را در فشار بالاتر از ۲۰۰ هکتوپاسکال قطع کرده و سطح بزرگی را بوجود می‌آورد و نشان می‌دهد که ضخامت ابر زیاد بوده و انرژی زیادی جهت آزاد شدن ناپایداری وجود دارد. مقدار آب قابل بارش در این روز، ۱۹/۲ سانتیمتر بوده که به بیشترین مقدار در این دوره بارشی (۱۳-۹ مه ۱۹۸۴) می‌رسد (شکل ۴).

۲- الگوی سیستم‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای

این الگو در نقشه سطح زمین و ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۵ دسامبر ۱۹۸۹ دیده می‌شود. در نقشه سطح زمین روز ۱۵ دسامبر در ساعت 1200UTC کم فشار مستقر بر روی شبه جزیره عربستان، تا نواحی جنوب و جنوبغربی ایران را در بر گرفته است و کلیه جریانهای جوئی در نیمه شرقی آن بصورت جنوبی و جنوبشرقی بوده، در صورتی که در قسمت غربی آن، جریان‌ها شمالی و شمالغربی است. پرفشار ۱۰۲۰ هکتوپاسکال در شرق و جنوبشرق ایران دیده می‌شود. جنوبغرب و جنوب ایران تحت تأثیر توده هوای حاره‌ای دریایی (mT) قرار دارد و بیشتر این نواحی، از هوای گرم و مرطوب دریای عمان بهره می‌گیرند (شکل ۵).



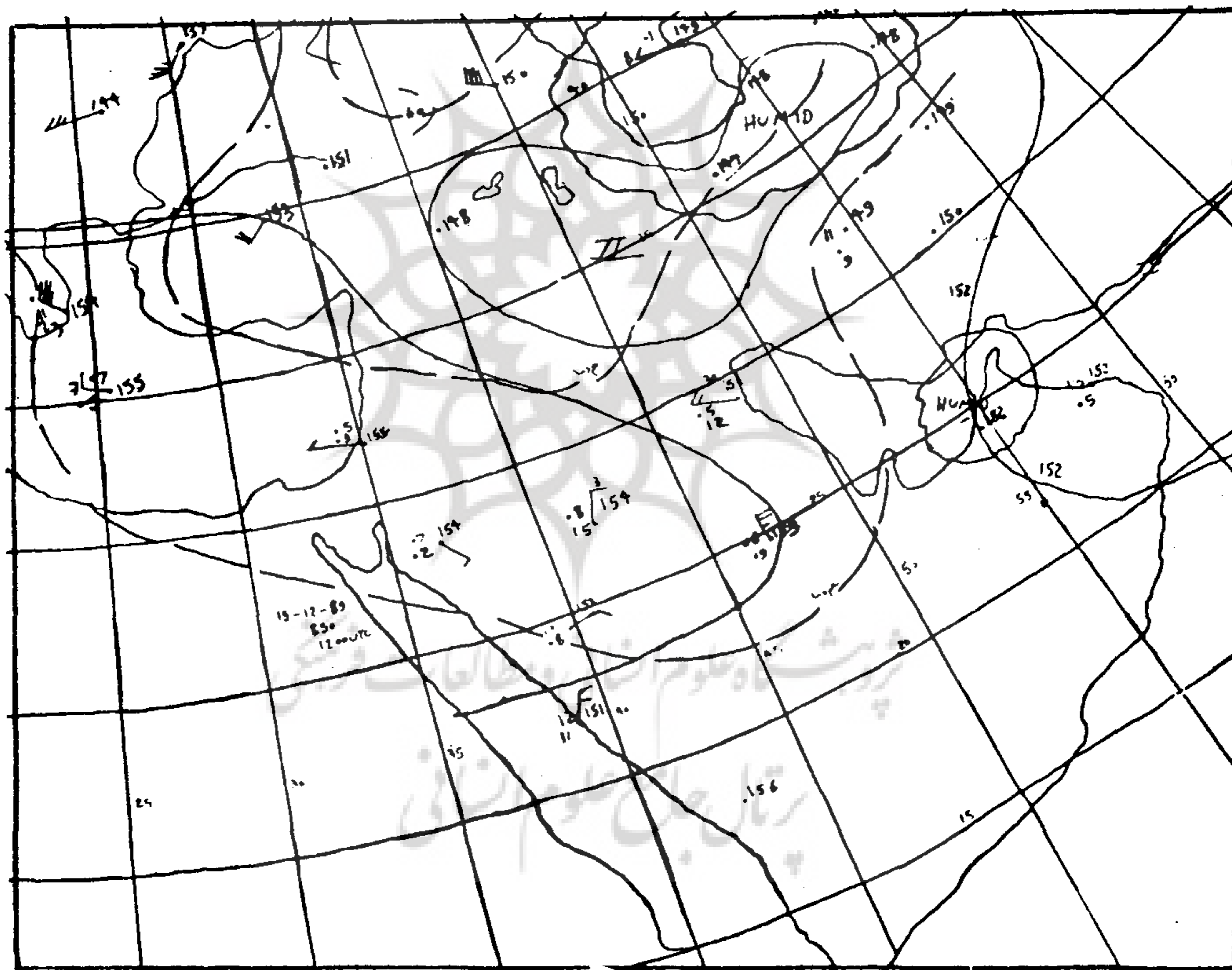
شکل ۴- نمودار ترمودینامیکی ایستگاه کرمان در ساعت 1200UTC روز ۹ ماه مه ۱۹۸۴



شکل ۵- نقشه سطح زمین در روز ۱۵ ماه دسامبر ۱۹۸۹ ساعت 1200UTC

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت 1200UTC بعلت گستردگی ناوه، دو خط ناوه دیده می‌شود؛ یکی در امتداد نصف‌النهار ۴۰ درجه شرقی و دیگری در امتداد نصف‌النهار ۵۰ درجه شرقی قرار دارد و بین آنها پشته ضعیفی دیده

می شود. در ۱۲ ساعت بعد، مرکز کم ارتفاع ۱۴۸ ژئوپتانسیل دکامتر بر روی عراق، غرب ایران و شمالغرب خلیج فارس قرار داشته که تمام نواحی ایران را تحت تاثیر خود دارد. خطوط هم دما، پربندها را با زاویه تندی قطع می کنند و فرارفت هوای گرم در جلوی ناوه و هوای سرد در پشت ناوه دیده می شود و مرکز پر ارتفاعی (۱۵۲ ژئوپتانسیل دکامتر) در شرق عربستان و جنوب ایران و دریای عمان مستقر است (شکل ۶). بنابراین، سیستم کم فشار سودانی بر روی عربستان با توجه به تغذیه خوب هوای گرم و مرطوب دریای عمان، از طریق پرفشار واقع بر روی شرق شبه جزیره و جنوب ایران تقویت شده و بتدریج با حرکت به سوی شمالشرق و ادغام با کم فشار ضعیف مدیترانه ای در این روز، نواحی جنوبی و مرکزی و منطقه کرمان را تحت تاثیر خود قرار داده است و سبب بارش های قابل توجه در این روز و روزهای ۱۶ و ۱۷ دسامبر ۱۹۸۹ در اکثر ایستگاههای منطقه شده است.



شکل ۶- نقشه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز ۱۵ ماه دسامبر ۱۹۸۹ ساعت 1200UTC

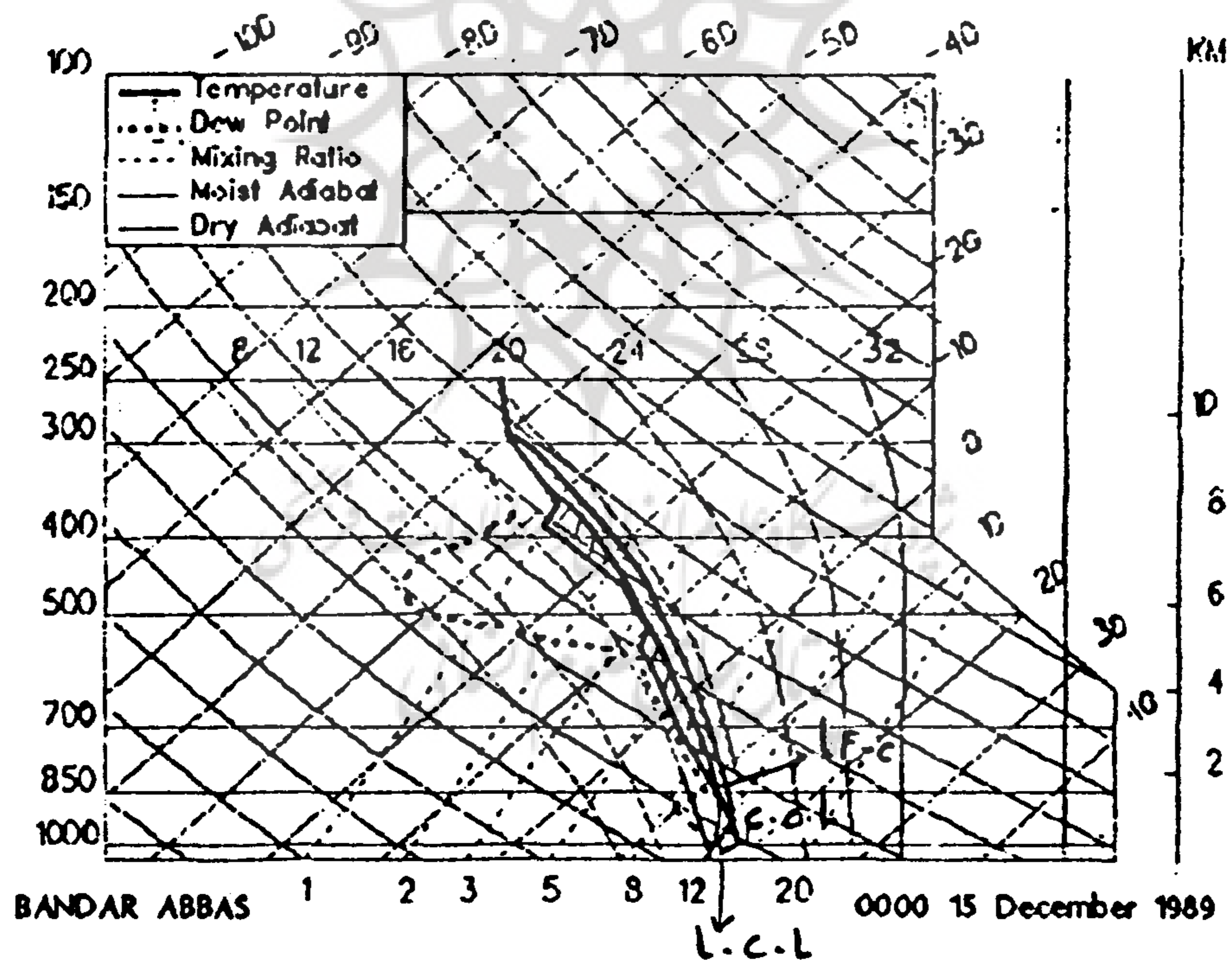
ساختار قائم دما و رطوبت ایستگاههای بندرعباس و کرمان در روز ۱۵ دسامبر ۱۹۸۹ به شرح زیر می باشد:
با مشاهده جدول شماره ۳ و توجه به دما، نسبت آمیزه و دمای پتانسیل خشک و تر، توده هوا در ایستگاه بندرعباس از نوع حاره ای دریایی است (mT).

C.C.L و L.C.L به ترتیب در ارتفاع ۸۸۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال قرار دارند. منحنی B در روی اشیاعی که از C.C.L رسم شده، منحنی دمای محیط را در ارتفاع ۲۸۰ هکتوپاسکال قطع می کند و سطح بزرگی را بوجود می آورد و

نشان می‌دهد که ناپایداری شدید بوده و ضخامت ابر به بیش از ۶۰۰۰ متر می‌رسد. مقدار آب قابل بارش $(^{(1)})$ ۳۱/۲۵ سانتیمتر بوده که به حداکثر خود در این دوره بارشی رسیده است (شکل ۷).

جدول ۳- ویژگیهای توده هوای ایستگاه بندرعباس در روز ۱۵ دسامبر ۱۹۸۹

نقشه	دما °C	نسبت آمیزه g/kg	دمای پتانسیل خشک °C	دمای پتانسیل تر °C	نوع توده هوا
سطح زمین	۱۷/۸	۱۱/۸	۱۶/۶	۱۶/۵	حاره‌ای
تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال	۱۱/۶	۹	۲۲	۱۶	دریایی
تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال	۲/۱	۶	۳۲	۱۷	(mT)
تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	-۱۲/۱	۰/۶	۴۴	۱۶	



شکل ۷- نمودار ترمودینامیکی ایستگاه بندرعباس در ساعت 0000UTC روز ۱۵ دسامبر ۱۹۸۹

۱- آب قابل بارش - شاخصی از گنجایش رطوبت هواست که می‌تواند بصورت عمق آب مایع بر واحد سطح زمین دریافت گردد (سازمان هواشناسی جهانی، ۱۹۸۹).

$$\omega = \bar{q} \Delta p / g l$$

ω - آب قابل بارش (Cm)

q - نم مخصوص متوسط یک لایه هوای مرطوب (g/kg)

Δp - عمق لایه هوا (Hpa)

g - شتاب جاذبه (Cm s^{-2})

l - چگالی آب (g cm^{-3})

ساختار قائم دما و رطوبت ایستگاه کرمان در این روز نیز تقریباً شبیه ایستگاه بندرعباس بوده و شرایط ناپایداری حکمفرماست و میزان آب قابل بارش آن به ۲۴/۳۵ سانتیمتر رسیده است. در نتیجه، در این دوره بارشی، سیستم ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای در منطقه مؤثر بوده و با شرایط مناسب سینوپتیکی، بارش‌های زیادی را در منطقه ایجاد کرده است.

۳- الگوی سیستم‌های مدیترانه‌ای

چون این سیستم‌های کم فشار از دریای مدیترانه می‌آیند و اکثر بارش‌های آنها در شیب‌های غربی زاگرس ریزش می‌کند، از رطوبت کمتری برخوردارند و نیز کمتر رطوبت از لایه زیرین به درون آنها تغذیه می‌شود و لذا بارش‌های کمتر و جبهه‌ای داشته که ممکن است یک ناپایداری موقت و کمی پس از عبور جبهه سرد در منطقه حادث شود که سبب بارش‌های کم و پراکنده در منطقه می‌شود، بطوریکه الگوی آن در نقشه سطح زمین و ترازهای فوقانی جو در روز ۲۹ دسامبر ۱۹۹۱ قابل مشاهده است. در ساعت 0000UTC این روز یک مرکز کم فشار (۱۰۱۰ هکتوپاسکال) در نیمه شرقی دریای مدیترانه مستقر بوده که سراسر منطقه خاورمیانه را تحت تاثیر خود قرار داده و در غرب و شمالغرب و جنوب دریای خزر مرکز پرفشار ۱۰۳۰ هکتوپاسکال مستقر است.

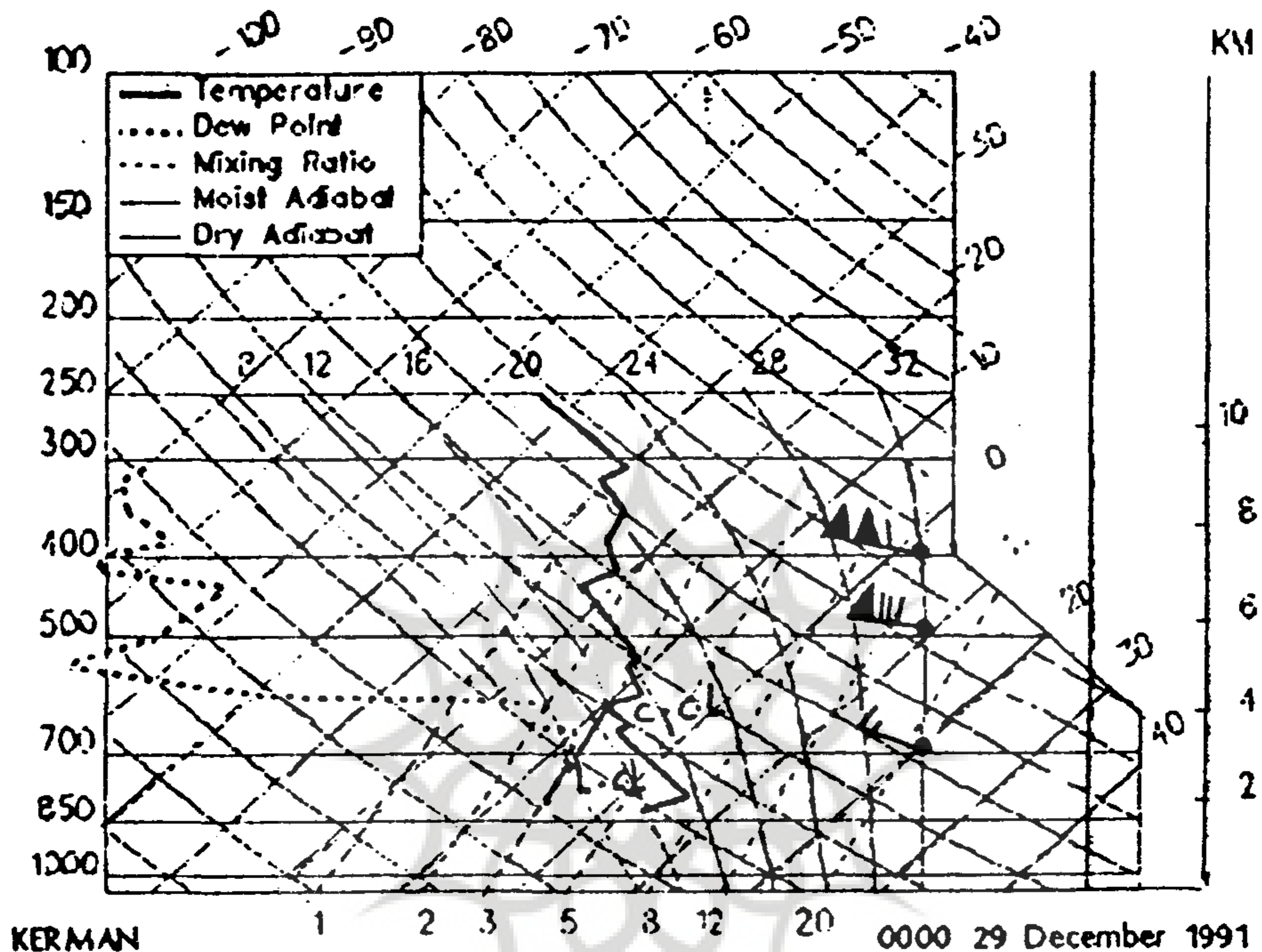
ساختار قائم دما و رطوبت ایستگاههای بندرعباس و کرمان در این روز به شرح ذیل می‌باشد:

در ایستگاه بندرعباس، دمای پتانسیل خشک و تر به ترتیب ۱۱/۸ و ۱۱/۲ درجه سلسیوس بوده که معرف توده هوای حاره‌ای دریایی (mT) است. سمت جریانهای جوی در سطح زمین ۱۹۰ درجه بوده که در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به ۲۲۰ درجه می‌رسد و تقریباً جنوبی و جنوبغربی می‌باشد، ولی تغییری در سمت باد در لایه‌های میانی و بالایی جو دیده نمی‌شود و بادها سمت غربی دارند. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، سمت باد ۲۶۰ درجه بوده و تندی آن به ۹۸ نات می‌رسد و نشان می‌دهد که فشار زیاد جنب حاره به عرضهای شمالی منتقل شده و در نتیجه هوای گرم و مرطوبی را از لایه‌های زیرین به همراه آورده است. C.C.L و L.C.L به ترتیب در ارتفاع ۷۹۶ و ۹۸۸/۵ هکتوپاسکال قرار دارند. منحنی B در روی اشیاعی که از آنها رسم شده، هیچکدام دمای محیط را قطع نمی‌کنند و دیده می‌شود که جو این ایستگاه کاملاً پایدار است. با مشاهده جدول ۴ مشخص می‌شود که در ایستگاه کرمان در این روز توده هوا، قطبی دریایی از نوع انتقالی است (T_{mp}). سمت باد در لایه‌های مختلف جو، شمالغربی بوده و مشخص می‌کند که پشته‌ای بین ایران و عراق قرار دارد و هوای سرد مناطق شمالی تر را به عرضهای جنوبی و ایران منتقل می‌سازد و جو پایدار و خشکی را در این ایستگاه بوجود می‌آورد (شکل ۸).

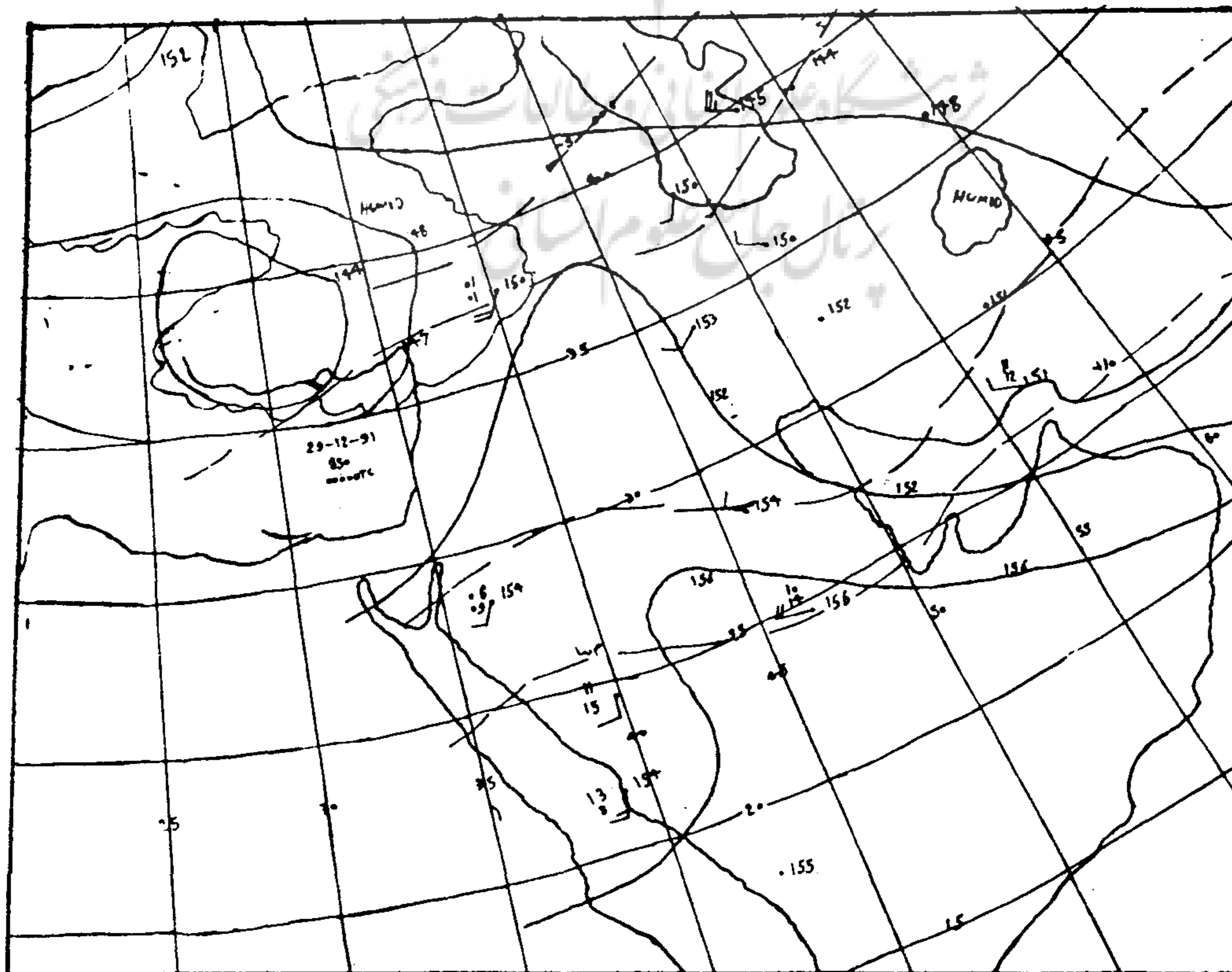
جدول ۴- ویژگیهای توده هوای ایستگاه کرمان در روز ۲۹ دسامبر ۱۹۹۱

نقشه	دما °C	نسبت آمیزه g/kg	دمای پتانسیل خشک °C	دمای پتانسیل تر °C	نوع توده هوا
سطح زمین	۲/۸	۳/۲	۱۸/۴	۹/۵	T _{mp}
۷۰۰ هکتوپاسکال	-۲/۵	۳	۲۷	۱۴	
۵۰۰ هکتوپاسکال	-۱۴/۹	۰/۱	۴۲	۱۴	

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت 0000UTC مرکز کم ارتفاع ۱۴۴ ژئوپتانسیل دکامتر در شرق مدیترانه مستقر بوده که از دامنه عمیقی برخوردار نیست و جریانهای ضلع جنوبی این ناوه اکثراً غربی است و مرکز پر ارتفاعی در ضلع جنوبشرقی شبه جزیره عربستان مستقر بوده و در این تراز مناطق غرب و مرکز ایران از رطوبت خوبی برخوردارند (شکل ۹).



شکل ۸- نمودار ترمودینامیکی ایستگاه کرمان در ساعت 0000UTC روز ۲۹ دسامبر ۱۹۹۱



شکل ۹- نقشه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ساعت 0000UTC در روز ۲۹ دسامبر ۱۹۹۱

در ۱۲ ساعت بعد، مرکز کم ارتفاع بسته شده درون ناوه، باز شده و ضعیف گردیده است؛ زیرا جریانهای مناسبی جهت تقویت این ناوه نبوده و بتدریج از عمق آن کاسته و اکثر جریانها غربی شده است. در نتیجه، این سیستم مدیترانه‌ای چندان فعالیتی نداشته و بارشهای ضعیفی را در منطقه سبب شده است؛ چون از پایداری نسبی بالایی برخوردار بوده و تغذیه رطوبت از طریق دریای عمان در زمان مناسب به درون این سیستم انجام نگرفته است.

نتیجه‌گیری

ساختار قائم دما و رطوبت ایستگاههای کرمان و بندرعباس در طی مطالعه دوره‌های بارشی نمونه، نشان می‌دهد که ۲ تا ۳ روز قبل از انتقال سیستم‌های کم فشار بر روی منطقه مورد مطالعه، جو هر دو ایستگاه شدیداً خشک و پایدار بوده و بتدریج با انتقال این سیستم‌ها به سوی منطقه کرمان، رطوبت کسب نموده و دما نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه ساختار دما و رطوبت جو ایستگاههای مذکور بتدریج ناپایدار شده و شرایط برای بارش فراهم می‌شود.

اکثر توده‌های هوایی که منطقه را مورد تهاجم قرار می‌دهند، در زمان اولیه از نوع حاره‌ای قاره‌ای (CT) بوده و بتدریج به حاره‌ای دریایی (mT) تبدیل می‌گردند.

سیستم‌های کم فشار سودانی چه بصورت تفکیکی و چه ترکیبی با سیستم‌های کم فشار مدیترانه‌ای بیشترین بارش را در منطقه بوجود می‌آورند و عامل مهم در تقویت آنها وجود یک سیستم پرفشار بر روی دریای عمان و استقرار یک سیستم کم فشار مناسب بر روی شبه جزیره عربستان و هماهنگی بین این سیستم‌ها در زمان معین بوده که اگر هم زمانی در انتقال گرما و رطوبت از دریای عمان به سوی سیستم‌های کم فشار مستقر بر روی شبه جزیره عربستان صورت گیرد، جریانهای کالی جو سبب می‌گردد که با یک حرکت ملایم و شیب‌دار، رطوبت و دما در لایه‌های زیرین جو به درون این سیستم‌ها تغذیه گردد و در نتیجه، این سیستم‌ها می‌توانند شرایط مناسب‌تری را جهت باروری ابرها و افزایش بارش در منطقه ایجاد نمایند.

سیستم‌های کم فشار مدیترانه‌ای چون از رطوبت و ناپایداری کمتری برخوردارند و کمتر رطوبت از لایه زیرین به درون آنها تغذیه می‌شود، در فعالیت باروری ابرها و پروژه‌های افزایش بارش (PEP)^(۱) نمی‌توانند نقش عمده‌ای داشته باشند.

منابع و مآخذ:

- ۱- اداره کل هواشناسی استان یزد، ۱۳۷۵، طرح باروری ابرها و بررسی وضعیت بارش در استان یزد.
- ۲- خیراندیش، محمد، ۱۳۶۳، هواشناسی سینوپتیکی، سازمان هواشناسی کشور.
- ۳- سازمان هواشناسی کشور، نقشه‌های سینوپتیکی سطح زمین و ترازهای ۸۵۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال.
- ۴- سازمان هواشناسی کشور، اطلاعات جو بالای ایستگاه‌های کرمان و بندرعباس.
- ۵- سازمان هواشناسی کشور، آمار بارش‌های روزانه منطقه مورد مطالعه برای دوره آماری مربوطه.
- ۶- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه.
- ۷- سرداری، محمد، ۱۳۷۴، بررسی آمار به دست آمده از عملیات باران‌زایی مصنوعی در حوضه آبریز رودخانه‌های کرج و جاجرود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته هواشناسی دانشگاه تهران.
- ۸- قائمی، هوشنگ، ۱۳۷۵، هواشناسی عمومی، انتشارات سمت، تهران.
- ۹- قبادیان، عطاءالله، ۱۳۶۴، سیمای طبیعی استان کرمان در ارتباط با مسائل کویری.
- ۱۰- واژه‌نامه ژئوفیزیک و هواشناسی، ۱۳۷۷، مرکز نشر دانشگاه، تهران.
- 11- Battan, L.J (1966), Silver Iodide Seeding and Rainfall From Convective clouds, J, Appl. Meteor, Vol, 5.
- 12- C.S.I.R.O Australia (1995), Precipitation Enhancement Workshop.
- 13- Crowe, P.R (1971), Concepts in climatology London.
- 14- Dennis, A.S (1980), Weather Modification by Cloud Seeding, Academic press, INC, Newyork.
- 15- Her majesty's Stationery office (1962), Weather in The Mediterranean, London, Vol 1.
- 16- Journal of Hydrology (1997), The Effect of randomized cloud seeding on runoff depth from a small watershed in central israel, No 191.
- 17- Warner. J (1978), Physical Aspects of the Design of PEP, W.M.O.PEP Design Document, Report No. 10.
- 18- W.M.O (1978), PEP Design Document, Report No 3.
- 19- W.M.O (178), The Climatology and Synoptic Weather Pattern at the proposed PEP Site in Spain, Report No. 10.
- 20- W.M.O (1978), PEP Design Document, Report No. 9.